

profondeur, certaines de ces surfaces prennent un aspect spectaculaire : elles conservent des empreintes d'animaux qui les ont parcourues (dans l'eau) pendant qu'elles durcissaient.

Au maximum de la vitesse de montée des eaux et d'extension des mers, le bassin marin est sous-alimenté en sédiments d'origine continentale, alors que la vie y est aussi

intense et les restes fossiles aussi nombreux : la proportion de sédiments par rapport aux restes fossiles se réduit considérablement. Le maximum de proportion de restes animaux fossilisés dans les roches situe le maximum de recouvrement des mers (voir la figure 5).

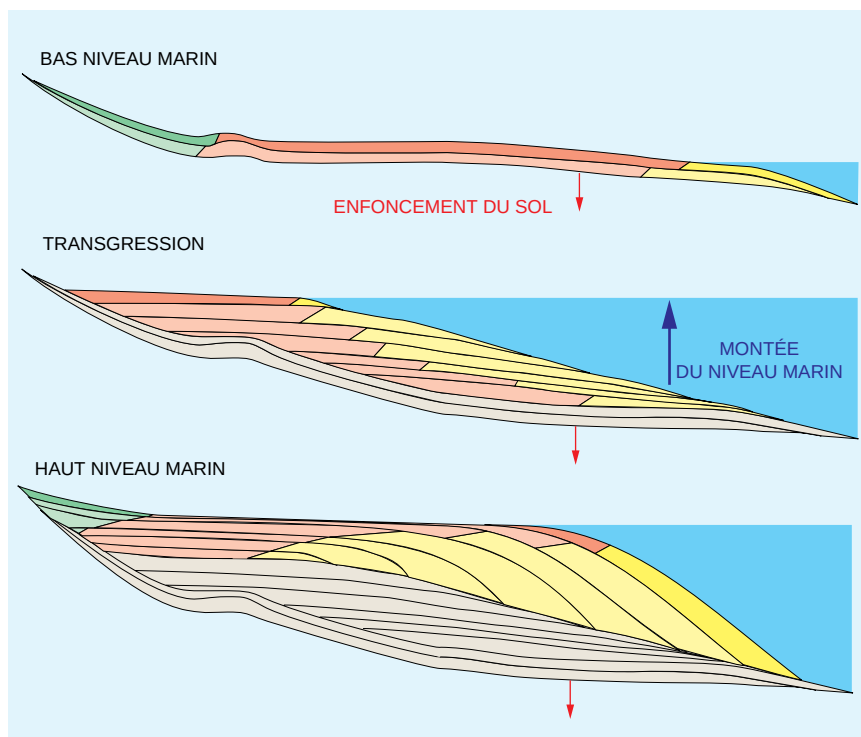
Après cette phase de transgression, le niveau marin, toujours élevé, se stabilise, puis commence à baisser lentement : les sédiments gagnent à nouveau sur la mer, et le rivage recule par régression normale. Les dépôts de haut niveau marin se superposent aux dépôts transgressifs en s'étendant vers le large : les couches, plus inclinées, se terminent en biseau sur la surface d'inondation maximale.

Reconnaître et raccorder les couches sédimentaires

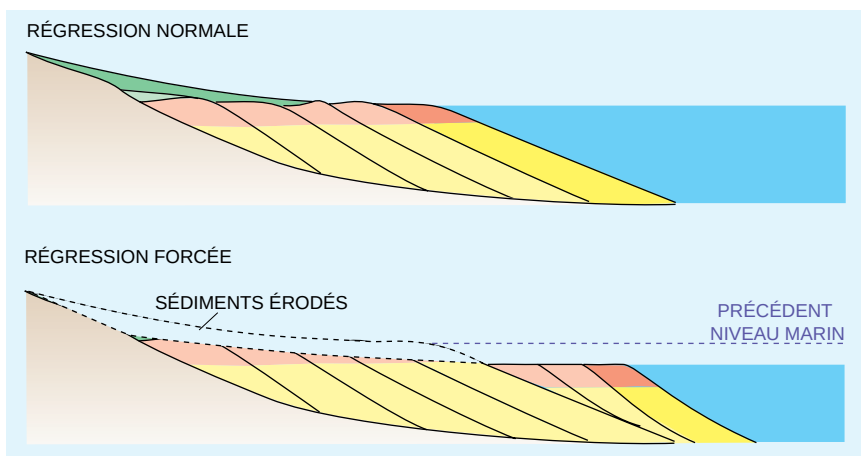
Depuis la publication de ce modèle, des géologues ont reconnu la succession de ces trois étapes, baisse du niveau marin, transgression et haut niveau marin, dans des empilements de roches sédimentaires marines de tous âges géologiques et dans toutes les régions du Globe. Ils associent pour cela diverses démarches. L'analyse des profils sismiques, obtenus par le suivi d'ondes de choc créées par des explosions, nous permet de reconstituer la géométrie d'ensembles de couches avec un pouvoir de résolution maximal de 25 mètres d'épaisseur environ : les ondes de choc se réfléchissent sur les discontinuités importantes qui séparent des roches différentes.

L'étude de puits de forage et des affleurements visibles en différents endroits d'un bassin sédimentaire permet de raccorder des couches entre elles et de les situer dans la chronologie géologique. L'examen de la nature minéralogique des roches et l'étude des structures sédimentaires, liées aux balancements des marées, à la houle, aux tempêtes ou à la décantation, donnent des informations sur l'épaisseur de la tranche d'eau sous laquelle elles se sont déposées. Les surfaces sédimentaires conservent des traces telles que les rides symétriques créées par la houle sous moins de cinq mètres d'eau, que l'on observe couramment sur les plages, ou des stratifications en mamelons créées par les tempêtes.

Le contenu paléontologique des roches est aussi riche en informations :



2. L'ORGANISATION GÉOMÉTRIQUE DES COUCHES sédimentaires, en prismes plus ou moins inclinés, et leur composition permettent de reconstituer des séquences de variation du niveau marin. Selon la nature des roches et la composition paléontologique des couches, on distingue les sédiments fluviaux (*en vert*), les sédiments littoraux (*en orange*) et les sédiments marins (*en jaune*). En période de bas niveau marin (*en haut*), la côte et les sédiments littoraux migrent vers le large. Le niveau de la mer remonte ensuite progressivement, au cours d'une période de transgression (*au milieu*). La ligne de rivage et les dépôts littoraux se déplacent vers le continent. Le niveau marin se stabilise enfin en position haute (*en bas*). Les sédiments font reculer la ligne de rivage par comblement progressif.



3. LA LIGNE DE RIVAGE SE DÉPLACE vers le large par régression normale (*en haut*) ou forcée (*en bas*). La régression normale se produit lorsque le niveau marin est stable : les sédiments apportés du continent combleront peu à peu l'espace disponible, sur le continent (sédiments fluviaux, *en vert*), sur le littoral (sédiments littoraux, *en orange*) et dans la mer (sédiments marins, *en jaune*). Une régression forcée est associée à une brusque baisse du niveau marin : la ligne de rivage se décale vers le large et les dépôts fluviaux et côtiers sont érodés (zone entourée d'un trait pointillé noir). Ils s'accumulent dans la mer et font encore reculer la ligne de rivage.

des fossiles microscopiques sont d'excellents indicateurs des périodes de bas et de haut niveau marin. Nous l'avons montré pour des foraminifères, animaux unicellulaires à coquille calcaire vivant au fond des mers, qui ont laissé de nombreux restes dans les sédiments anciens. Ils sont caractérisés par une grande diversité morphologique et une capacité à changer de forme, de façon réversible, au fil des générations, selon les conditions environnementales. Au sein d'une même espèce, des individus ont une coquille massive et entièrement enroulée, d'autres une coquille plus aplatie et partiellement déroulée. Dans des espèces voisines, les coquilles sont entièrement déroulées et plates.

Nous avons extrait plusieurs dizaines de milliers de spécimens de foraminifères de couches sédimentaires qui datent de 195 à 185 millions d'années, dans le bassin d'Aquitaine. Les dépôts de bas niveau marin contiennent une forte proportion de formes enroulées : 96 pour cent en moyenne. Les formes déroulées sont surtout présentes dans les couches de haut niveau marin : 30 pour cent du total. Ces changements morphologiques proviennent d'une adaptation aux conditions d'oxygénation. Les formes à coquilles droites ou partiellement déroulées ont, pour un volume identique, une plus grande surface d'échange avec l'extérieur : elles sont adaptées aux fonds mal oxygénés des périodes de hauts niveaux marins.

D'autres études, au Portugal et au Maroc, sur des sédiments d'âges différents, montrent que les foraminifères ont réagi par des changements

4. LA SUPERFICIE DES TERRES ÉMERGÉES (*en marron*) a considérablement varié au cours des temps géologiques. Leurs limites sont retracées grâce à la cartographie des anciens dépôts marins et continentaux. Il y a environ 155 millions d'années (*en haut*), seuls émergent au Sud-Ouest de l'Europe les massifs armoricain et ardennais, la région de l'Èbre et l'Ouest de la péninsule ibérique. La transgression marine recouvre presque toute la France. Il y a 65 millions d'années (*au milieu*) une régression découvre la majeure partie de la France et de la péninsule ibérique. L'Europe de l'Ouest n'a l'aspect que nous lui connaissons aujourd'hui (*en bas*) que depuis quelques dizaines de milliers d'années. Sur les deux premières cartes, l'esquisse des contours actuels des côtes permet de repérer le mouvement des plaques tectoniques, avec rotation et glissement vers l'Est de l'Ibérie, de la Corse et de la Sardaigne par rapport à la France (*flèche noire*).



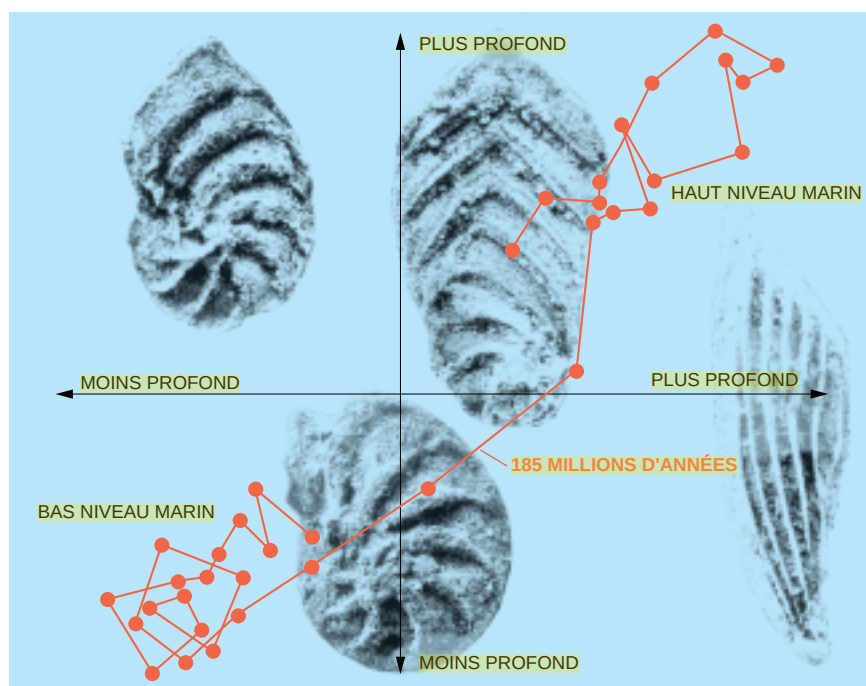
morphologiques aux variations de la profondeur marine. Toutefois ces changements diffèrent suivant la topographie et la géographie du bassin sédimentaire, et la richesse en matières nutritives. Ces micro-organismes

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 montrées 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-