

Par ailleurs, des modifications biologiques se déroulent au rythme des séquences de troisième ordre. Outre l'augmentation brusque du taux de renouvellement des foraminifères pendant les phases de baisse et de montée du niveau marin, des phénomènes comparables ont été récemment découverts dans des groupes beaucoup plus complexes, comme les céphalopodes (le groupe des pieuvres et des calmars).

Ces changements climatiques, associés aux variations de l'épaisseur de la tranche d'eau et des étendues respectives des terres et des mers, ont des conséquences importantes sur les écosystèmes. En milieu marin, les baisses brusques des eaux isolent certaines mers, favorisent les apports trophiques d'origine continentale et diminuent les profondeurs. Dans la zone littorale, les fonds sont mieux éclairés et plus agités. À l'inverse, les montées du niveau marin en période transgressive développent les communications entre mers, modifient les tracés des courants, diminuent les arrivées de matières nutritives issues des terres voisines et augmentent l'épaisseur de l'eau entre la surface et les fonds, plus sombres et plus calmes. Les variations du niveau marin ont donc joué un rôle dans l'évolution de la vie, par leurs conséquences sur les renouvellements de la faune, par effets de stress, adaptations à de nouvelles niches écologiques et migrations de populations.

Jacques REY est professeur à l'Université Paul Sabatier, à Toulouse. René CUBAYNES est professeur agrégé au Lycée Lapeyrouse, à Albi.

P. VAIL, J.-P. COLIN, R. JAN du CHENE, J. KUCHLY, F. MEDIAVILLA et U. TRIFILLIAFF, *La stratigraphie séquentielle et son application aux corrélations chronostratigraphiques dans le Jurassique du bassin de Paris*, in *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 8, n° 3, pp. 1301-1321, 1987.

C. WILGUS, B. HASTINGS, C. KENDALL, H. POSAMENTIER, C. ROSS et J. VAN WAGONER, *Sea-Level Changes : an Integrated Approach*, in *Soc. Economic Paleontologists and Mineralogists*, Sp. Public, n° 42, 1988.

J. REY, L. BONNET, R. CUBAYNES, A. QAJOUN et C. RUGET, *Sequence Stratigraphy and Biological Signals : Statistical Studies of Benthic Foraminifera from Liassic Series*, in *Paleogeography Palaeoclimatology-Palaeoecology*, vol. 111, pp. 149-171, 1994.

La localisation par satellite

THOMAS HERRING

À quelques milliers de kilomètres au-dessus de nos têtes, 24 satellites permettent une localisation à un millimètre près.

Pour la phase finale de l'approche, l'avion obéissait aux ordres du pilote automatique, sans utiliser le radioguidage de l'aéroport. En orbite à plus de 20 000 kilomètres d'altitude, les satellites du système de localisation GPS (*Global Positioning System*) fournissaient à l'appareil les informations nécessaires pour se guider.

Lorsque le GPS a indiqué que le sol n'était plus qu'à une centaine de mètres sous le train d'atterrissage, l'appareil a ralenti sa descente. Puis, brusquement, l'alarme du pilote automatique s'est déclenchée : il avait perdu le contact avec un satellite. Le pilote a rapidement repris les commandes et a remis les gaz pour éviter l'écrasement.

Cet incident s'est produit lors d'un atterrissage d'essai, organisé en octobre 1994 par une équipe de l'Université Stanford qui élabore un dispositif de guidage des avions par GPS. La cause en était une erreur dans le programme du satellite GPS. Celle-ci n'avait pas été détectée plus tôt, car personne n'avait jamais demandé au GPS une précision inférieure à 100 mètres (la longueur d'un terrain de football) : il y a quelques années, personne n'imaginait que le GPS serait assez précis pour guider l'atterrissage d'un avion. En Europe, cet exercice reste interdit, même pour des essais. Pourtant beaucoup d'astuce et de travail ont permis d'augmenter les performances du réseau bien au-delà de celles qui avaient été prévues lors de la mise au point, il y a plus de 20 ans.

Le Département américain de la Défense a commencé la mise en place de ce système de localisation au milieu des années 1970, afin de guider ses navires, ses avions et ses véhicules terrestres, n'importe où dans le monde. Puis les civils ont eu accès au réseau, mais avec une précision réduite : si un ennemi avait profité des mêmes informations, l'avantage militaire aurait été nul. Des ingénieurs civils ont

toutefois contourné ces limitations : aujourd'hui n'importe qui peut obtenir une précision nettement supérieure à celle que les concepteurs du système voulaient donner.

Grâce à des récepteurs GPS portables, des plaisanciers se dirigent dans des ports embrumés et des automobilistes trouvent leur chemin dans des régions qu'ils ne connaissent pas. Le système est même utilisé pour suivre les déplacements de conteneurs dans les zones de stockage du port de Singapour, et il permet aux géologues d'enregistrer des déformations de la croûte terrestre de quelques millimètres seulement, afin de prévoir les séismes.

Dès le premier satellite

Comment obtient-on des informations aussi précises ? Examinons d'abord la brève histoire de la localisation terrestre par satellite et les principes du GPS. Peu après le lancement du satellite *Spoutnik* par l'URSS, en 1957, des ingénieurs ont imaginé de calculer la position d'un récepteur terrestre à partir des émissions radio d'un satellite de position connue. Ils envisagèrent d'abord d'utiliser le décalage Doppler engendré par le passage du satellite au-dessus du récepteur : la fréquence des signaux radio reçus augmente quand le satellite approche du récepteur, et diminue quand le satellite s'éloigne, tout comme varie la tonalité de la sirène d'une ambulance qui s'approche puis s'éloigne.

Sur ce principe, la marine américaine a mis au point le système *Transit* de localisation par satellite, dans les années 1960. Toutefois la méthode était complexe, car elle nécessitait de cou-

teux équipements électroniques afin d'enregistrer deux passages du satellite au-dessus du récepteur : la localisation n'était obtenue qu'après plus d'une heure et demie d'attente et, dans les cas les plus favorables, même après plusieurs jours de mesures, la précision n'atteignait pas le mètre. Les applications semblaient limitées.

Avant même que le premier satellite du système *Transit* ne soit lancé, le Département américain de la Défense étudiait un système plus précis, qui permettrait à un pilote de chasse de connaître instantanément sa position exacte. Au lieu d'utiliser l'effet Doppler, les ingénieurs militaires envisageaient de se fonder sur des mesures de distances effectuées par plusieurs satellites.

Théoriquement, cette méthode permet un calcul immédiat de la position. Si nous mesurons qu'un satellite est à 20 000 kilomètres de nous, par exemple, nous savons que nous sommes alors sur une sphère de 20 000 kilomètres de rayon, centrée sur le satellite. Nous pouvons calculer précisément la position de cette sphère, car les mouvements du satellite sur son orbite sont connus et stables. Si nous mesurons simultanément la distance d'un deuxième satellite, nous déterminons une deuxième sphère de positions possibles (voir la figure 1). La mesure de la distance d'un troisième satellite permet d'en connaître une troisième. Or trois sphères n'ont que deux points communs. Comme l'un de ces points n'est généralement pas une position possible (il est situé dans les profondeurs de la Terre ou dans l'espace), la mesure des distances qui nous séparent de trois satellites indiquent notre position exacte.

1. DES SATELLITES dont on connaît la position précise permettent un repérage au millimètre près, à la surface du Globe. En recevant des émissions codées de ces satellites, on détermine à quelle distance se trouvent les satellites du système. À chaque distance correspond une sphère de positions possibles, centrée sur le satellite émetteur du signal (en violet et en vert). L'intersection de trois sphères donne, en principe, une position exacte.