

sion et une partie du silicium est alors retourné dans les silicates. Cependant, au total, le métal s'est enrichi en silicium : alors qu'il comprenait jusqu'à 17 pour cent de silicium à la pression d'incorporation maximale, il en contient encore neuf pour cent lorsqu'il est au

centre, dans le noyau. Ce modèle de formation rend inutile des scénarios de formation de la Terre où plusieurs types de matériaux auraient été successivement accrétés : la proto-Terre reçoit toujours le même matériau primitif et la différenciation des enveloppes

se fait, au cours de la formation, par des réactions chimiques qui évoluent en fonction de la pression et de la température. Cependant, vers la fin de l'accrétion, des comètes ont dû tomber pour expliquer la formation de l'atmosphère et des océans.

Protéger les plages

L'ensablement est plus efficace que les enrochements.

L'érosion des plages menace les activités touristiques associées au littoral. Des deux remèdes couramment employés, la mise en place d'enrochements et l'alimentation artificielle en sédiments, le second, peu pratiqué en France, est pourtant le plus efficace.

Dans notre pays, les enrochements placés sur le haut des plages, parallèlement au rivage, ont toujours la faveur des services techniques de l'État et des collectivités locales. Ils protègent les aménagements de bord de mer, mais ils accélèrent l'érosion : d'abord, ils isolent les plages d'une réserve de sable, les dunes qui les bordent ; ensuite ils renforcent le pouvoir érosif des vagues, qui déferlent sur un obstacle au lieu de perdre progressivement leur énergie sur le plan incliné de la plage. À Oahu, une des îles Hawaïi, la plage de Mokuleia est large de seulement 13 mètre là où elle est bordée d'enrochements, contre 27 mètres là où elle ne l'est pas.

Les enrochements dénaturent les rivages, mais surtout ils ne remédient pas à la cause fondamentale de l'érosion des plages, une carence en sédiments. L'alimentation artificielle en sédiments, au contraire, corrige cette carence. Elle maintient des plages larges qui, tout en conservant leur aspect de nature, mettent les aménagements de bord de mer hors de l'atteinte des vagues et peuvent accueillir des activités balnéaires. Aux États-Unis, depuis le début des années 1950, plus de 650 kilomètres linéaires de plage, surtout sur le littoral atlantique, ont été ainsi rechargés. Aux Pays-Bas, où le gouvernement a décidé le maintien de la ligne de côte sur la position qu'elle occupait en 1990, l'alimentation artificielle en sédiments est la seule méthode utilisée : on y déplace cinq à sept millions de mètres cubes de sable par an.

On extrait le plus souvent les sédiments de gisements sous-marins proches de la plage à reconstituer : leur nature, en particulier leur granulométrie, a toute chance d'être similaire à celle des sédi-

ments déjà en place. Le transport est aussi simplifié : on peut aspirer le sable par une drague flottante et le refouler sur les plages par une conduite immergée. Les prélèvements doivent être faits à des profondeurs suffisantes, en général à plus de 20 mètres, pour que les granulats ne participent pas aux mouvements sédimentaires littoraux.

Quelle est la longévité des rechargements ainsi opérés ? Sur la côte orientale des États-Unis, la moitié du volume de matériaux apportés sur la partie émergée de la plage a disparu en moins d'un an dans 26 pour cent des cas, en un à cinq ans dans 62 pour cent des cas et en plus de cinq ans dans 12 pour cent des cas. Ces durées dépendent des caractéristiques des sédiments utilisés, de la longueur du rivage alimenté, de la période de l'année pendant laquelle l'opération est effectuée.

Les plages de fond de baie, bien délimitées par des promontoires rocheux qui réduisent les fuites latérales de sédiments, se prêtent bien à des rechargements de longue durée. Ainsi, la plage de Cannes, alimentée artificiellement en sable dans les années 1960, a nécessité ensuite peu d'entretien. Inversement, la longue côte d'Aquitaine fortement érodée, frappée par de grosses houles du Nord-Ouest qui engendrent une dérive littorale puissante vers le Sud, convient mal à des rechargements.

Le coût de l'alimentation artificielle des plages en sédiments est souvent mis en avant par ceux qui lui préfèrent les enrochements. À Châte-

laillon, en Charente-Maritime, le mètre linéaire traité est revenu à environ 16 700 francs, tandis que le prix moyen d'un enrochement est de 5 000 à 7 000 francs pour la même longueur. Le surcoût est tempéré par la plus grande valeur touristique d'une large plage à l'aspect naturel, attractive pour le public. De plus, si les coûts de réalimentation sont importants, ne faut-il pas les analyser en valeur relative ? Aux Pays-Bas, le coût annuel de l'entretien d'un kilomètre de plage rechargée est inférieur à celui de la maintenance d'un kilomètre d'autoroute.

Roland PASKOFF,
Université Lumière, Lyon



La plage de Châtelaiillon, en Charente-Maritime, a été reconstituée par l'apport de 300 000 mètres cubes de sable entre 1989 et 1991. La construction de digues et d'épis entreprise dès la fin du XIX^e siècle n'avait pas empêché son érosion. Les courants littoraux ont partiellement déplacé vers le Sud (en bas) le sable apporté sur la zone centrale.

Éditions Pierron - Sirey/Lemétrie

Gyromètre superfluide

Un anneau d'hélium superfluide pour mesurer la vitesse de rotation de la Terre.

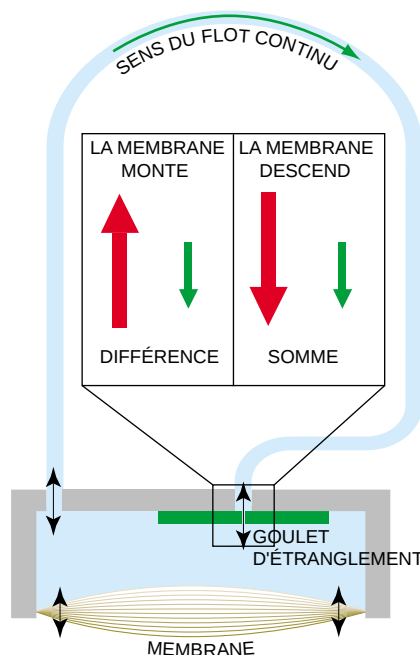
En 1851, Léon Foucault montra la rotation de la Terre à l'aide de son célèbre pendule, aujourd'hui visible sous la coupole du Panthéon. L'année suivante, cette étude l'amena à inventer le gyroscope : une toupie sur un ensemble de cadres mobiles. Pendule et gyroscope de Foucault permettent tous deux de mesurer des rotations, ce sont des gyromètres. L'étude des propriétés de l'hélium superfluide a débouché sur un gyromètre d'un nouveau genre : nous avons mesuré la vitesse de rotation de la Terre en mesurant la vitesse de déplacement de l'hélium superfluide contenu dans un anneau.

Lorsque la température est supérieure à 2,17 kelvins (-271°C), l'hélium 4 liquide est, comme l'eau, un liquide visqueux ordinaire. Au-dessous de cette température, son comportement change : tous les atomes sont dans le même état quantique et le superfluide s'écoule sans frottements. De plus, la circulation de la vitesse, qui est la vitesse du fluide multipliée par la longueur du chemin parcouru, est quantifiée : elle est égale à un multiple (n) du quotient de la constante de Planck par la masse d'un atome d'hélium. Peut-on utiliser cette propriété quantique, donc microscopique, pour mesurer un effet macroscopique ?

Considérons un anneau rempli d'hélium superfluide. La vitesse de rotation de l'hélium dans cet anneau ne peut prendre que des valeurs précises correspondant aux valeurs entières de n . Dans l'état $n = 0$, par exemple, l'hélium est immobile, et il le reste indéfiniment, indépendamment des rotations du récipient. Alors que le récipient est entraîné par la rotation de la Terre, l'hélium à l'intérieur reste immobile par rapport aux étoiles et se déplace donc par rapport aux parois du récipient. La valeur de cette vitesse de déplacement relative est une mesure de la vitesse absolue de rotation de la Terre dans l'espace. Tel est le principe du gyromètre superfluide.

Tout le problème consiste à mesurer la vitesse de l'hélium dans l'anneau, car elle est extrêmement faible (quelques micromètres par seconde). Pour contourner ce problème, on augmente d'abord localement la vitesse en plaçant dans la boucle un goulet d'étranglement. Avec un orifice micrométrique, on multiplie la vitesse par un million, car la vitesse est inversement proportionnelle à la sec-

tion de passage. Un écoulement superfluide sans dissipation ne subsiste qu'au-dessous d'une vitesse critique, laquelle, pour un petit orifice, est de l'ordre de quelques mètres par seconde. Lorsque cette vitesse est dépassée, il se crée un tourbillon au passage de l'orifice, qui détruit localement la superfluidité. La dis-



Pour mesurer la vitesse d'un flot continu d'hélium superfluide, on lui superpose un flot alternatif à l'aide d'une membrane oscillante. Lorsque la membrane monte, la vitesse du fluide dans le goulet d'étranglement est la différence de la vitesse alternative (en rouge) et de la vitesse du flot continu (en vert). Lorsque la membrane descend, ces deux vitesses s'ajoutent. En mesurant la différence de vitesse critique dans les deux cas, on déduit la vitesse du flot continu.

sipation qui en résulte ralentit brusquement l'écoulement, qui change d'état quantique.

À l'aide d'une pompe à membrane, on superpose au flot continu produit par la rotation de la Terre un flot alternatif dont on augmente progressivement l'amplitude. Dès que la vitesse dépasse la vitesse critique, l'écoulement ralentit et l'amplitude d'oscillation de la membrane diminue brutalement. En notant l'amplitude critique à laquelle cette brusque diminution se produit, on mesure la vitesse critique dans le goulet d'étranglement. Comment la vitesse critique est-elle liée à la vitesse de rotation de la Terre ?

Lorsque la membrane se déplace alternativement dans un sens et dans l'autre, elle produit un écoulement qui tantôt s'ajoute, tantôt se retranche à l'écoulement continu dû à la rotation de la Terre. On mesure ainsi la vitesse critique pour les deux sens de passage du flot (membrane vers le haut et membrane vers le bas). En soustrayant ces vitesses critiques, on déduit la vitesse du flot continu et donc celle de la rotation de la Terre.

À l'aide de notre expérience, nous avons mesuré la vitesse de rotation de la Terre avec une précision absolue de l'ordre de 0,5 pour cent et la direction du Nord géographique à 0,5 degré près. Une équipe américaine vient de mettre au point un appareil similaire dans lequel une différence de conception ne permet pas les mesures absolues, à l'inverse de notre appareil. La sensibilité de ces prototypes sera grandement améliorée. Reste à savoir s'ils pourront rivaliser avec d'autres gyromètres comme les gyro-lasers ou les interféromètres atomiques.

Olivier AVENEL et Éric VAROQUAUX,
SPEC, Saclay

Hibernation active

Le manchot économise l'énergie en abaissant la température de certains organes.

Le manchot royal est un plongeur remarquable. Il pêche jusqu'à 300 mètres de profondeur et reste immergé jusqu'à sept minutes et demie. En outre, il enchaîne les plongées pendant plusieurs heures, en les espaçant de deux minutes en moyenne. À titre de comparaison, l'homme atteint péniblement 100 mètres de profondeur et ne résiste pas à plus de quatre minutes d'apnée. La supériorité du manchot réside dans sa gestion de l'énergie : les organes inutiles pendant la

plongée sont refroidis à des températures exceptionnellement basses pour un animal à sang chaud.

Selon les observations du métabolisme d'animaux captifs, le manchot royal devrait épuiser ses réserves d'oxygène en deux minutes d'apnée. Comme chez tous les animaux plongeurs, un réflexe réoriente la circulation sanguine, donc l'apport d'oxygène, vers les tissus vitaux, qui doivent fonctionner à plein rendement pendant la plongée : les muscles propulseurs, le cerveau, le cœur. Les autres tissus, moins vascularisés, sont plus ou moins privés d'oxygène. Fonctionnent-ils en mode anaérobie ? L'acide lactique produit devrait ensuite être éliminé par un apport important d'oxygène : le temps de récupération indispensable entre deux plongées serait