

Gyromètre superfluide

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

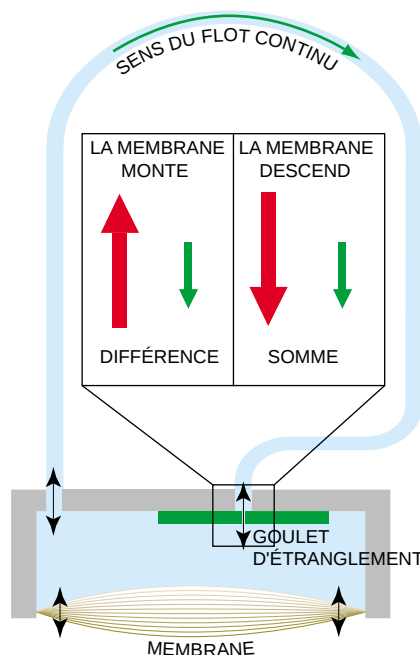
En 1851, Léon Foucault montra la rotation de la Terre à l'aide de son célèbre pendule, aujourd'hui visible sous la coupole du Panthéon. L'année suivante, cette étude l'amena à inventer le gyroscope : une toupie sur un ensemble de cadres mobiles. Pendule et gyroscope de Foucault permettent tous deux de 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.

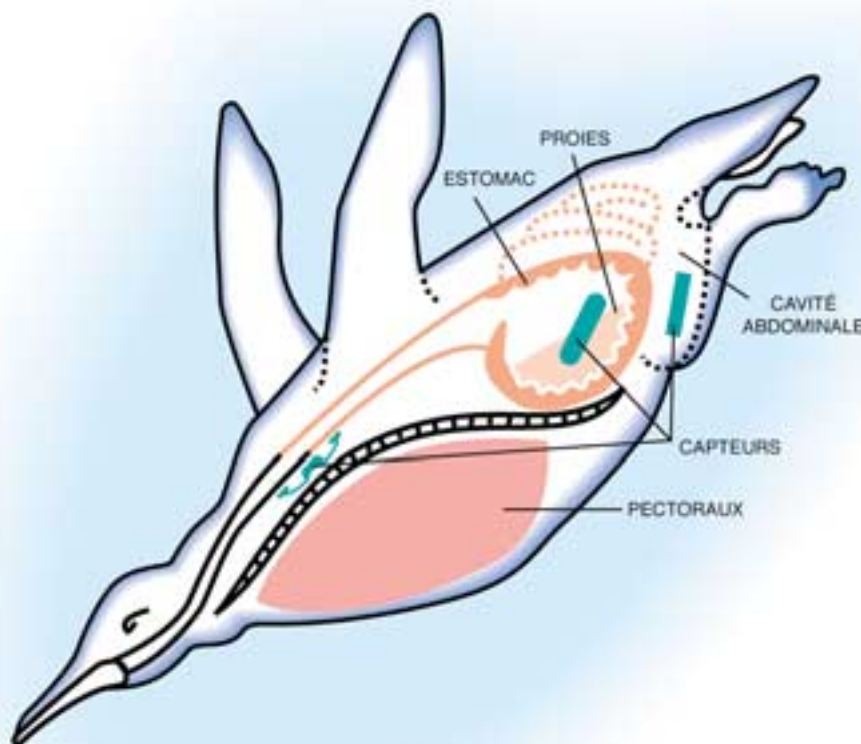
Selon les observations du métabolisme d'animaux captifs, le manchot royal devrait épuiser ses réserves d'oxygène en deux minutes d'apnée. Comme chez tous les animaux plongeurs, un réflexe réoriente la circulation sanguine, donc l'apport d'oxygène, vers les tissus vitaux, qui doivent fonctionner à plein 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

beaucoup plus long que celui que nous observons. Un ralentissement du métabolisme semblait la seule possibilité, sachant néanmoins que le manchot nage à neuf kilomètres à l'heure.

Afin de résoudre ce paradoxe, nous avons étudié les flux caloriques des manchots pendant qu'ils pêchent, à l'aide d'enregistreurs de température et de profondeur implantés en plusieurs endroits du corps. Le jour, la température de la cavité abdominale diminue de plus de 15 degrés. Ce refroidissement s'établit progressivement, plongée après plongée ; il est d'autant plus important que les plongées sont profondes. La nuit, le manchot nage au voisinage de la surface, et l'abdomen revient à la température normale de 38 °C. La température diminue à l'intérieur de l'estomac, à chaque ingestion de proies (la température de l'eau est voisine de 3 °C), mais elle reste supérieure de plusieurs degrés à celle de la cavité abdominale : l'hypothermie de cette dernière est donc bien liée à la plongée elle-même.

Les muscles propulseurs du manchot sont les pectoraux, situés à l'avant, et aucune fonction essentielle n'est assurée dans la partie postérieure du corps pendant la plongée, excepté la digestion. La forte baisse de température observée dans l'abdomen indique une « mise en sommeil » de cette partie du corps : des mécanismes cellulaires réduisent la dépense énergétique, donc la production de chaleur.

Ainsi les organes actifs sont correctement oxygénés, tandis que les organes inactifs sont placés en vie ralentie et produisent peu d'acide lactique.



Yan Robert-Coudert/PLS

Lorsque le manchot royal plonge pour pêcher, la température de sa cavité abdominale baisse d'une quinzaine de degrés : il économise ainsi l'oxygène. Son estomac est aussi refroidi par l'ingestion de proies, mais, comparativement, il reste plus chaud grâce à la digestion. Les muscles pectoraux, actifs pendant la nage, sont aussi plus chauds.

Il n'y a donc pas de dette importante en oxygène, et la récupération est rapide après la plongée.

Les manchots royaux pêchent par campagnes d'une dizaine de jours. Lors du voyage de retour vers la colonie, où les poussins les attendent, ils accumulent des proies dans leur estomac, sans

les digérer : ils les régurgiteront presque intactes. Les températures de l'abdomen et de l'estomac descendent alors au-dessous de 15 °C : toute la zone peut entrer en vie ralentie, économisant encore les ressources de l'animal.

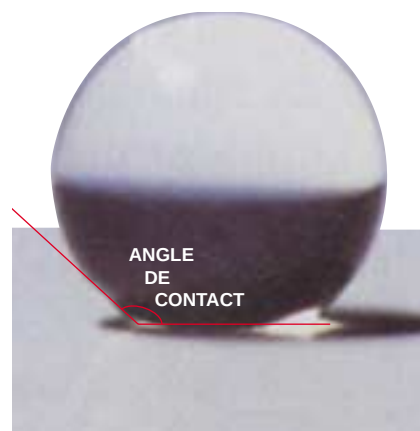
Yves HANDRICH, CEPE, CNRS, Strasbourg

Repoussantes surfaces

Les chimistes créent des surfaces que ne mouillent ni l'eau ni l'huile.

Une surface que mouille l'eau se tache : les matières colorantes dissoutes dans l'eau s'y déposent. Aussi les industriels ont-ils mis au point des surfaces que l'eau ne mouille pas : les nappes traitées sont parmi les innovations utiles qui ont facilité la vie quotidienne. Toutefois ces surfaces qui évitent le Charybde de l'eau tombent généralement dans le Scylla de la matière grasse, contre laquelle on a peu lutté : des matières plastiques qui ne sont pas mouillées par l'eau le sont par l'huile. Des chimistes japonais ont résolu le problème.

Leur idée de base est limpide : un matériau qui est peu mouillé par un liquide l'est encore moins quand sa surface est rugueuse. Pourquoi ? Imaginons un matériau qui ne soit pas mouillé par un liquide, c'est-à-dire un couple surface-liquide tel qu'il faille apporter de l'énergie pour établir un contact. Si une goutte de ce liquide est déposée sur une surface plane, elle reste sphérique, ne mouillant la surface qu'en un disque de diamètre inférieur au sien (l'énergie de contact est apportée par la pesanteur de la goutte). Imaginons maintenant que la surface soit rugueuse. Si la goutte formait le même disque de contact, la surface de contact réelle (en tenant compte de toutes les anfractuosités) serait bien supérieure à la surface de contact précédente, ce qui correspondrait à une énergie supérieure ; par conséquent,



Argewandte Chemie

Une goutte d'huile de colza posée sur une surface rugueuse et recouverte de groupes trifluorométhyle reste sphérique, avec un angle de contact de 150 degrés ; elle roule quand on incline la surface, sans coller à cette dernière.