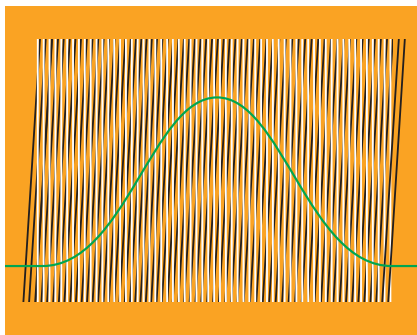


zontal, les figures moirées deviennent des ellipses (1c). À l'inverse, quand l'écartement diminue – le plan se redresse – les figures de moirés deviennent des hyperboles (1d).

Grâce aux figures de moirés, on peut recréer une courbe de Gauss en superposant deux séries de lignes parallèles. La courbe «en cloche» est fonction des probabilités d'une variable aléatoire soumise à de multiples causes indépendantes. La première série est composée de lignes verticales équidistantes. Les espacements de la seconde représentent les probabilités de chaque valeur que peut prendre la variable. En d'autres termes, les espacements de la première grille sont constants, ceux de la seconde sont plus serrés au centre. Les figures de moirés obtenues suivent la courbe de Gauss (voir la figure 2).

Les physiciens utilisent aussi les figures de moirés. Par exemple, une de leurs propriétés est d'amplifier les différences entre deux séries périodiques. Quand deux séries de lignes parallèles sont rigoureusement identiques, leur superposition est parfaite. À l'inverse, une légère différence dans la régularité ou dans les espacements apparaît quand les deux séries sont superposées (voir la figure à côté du titre).

En 1874, le physicien britannique Lord Rayleigh (1842-1919) a proposé d'utiliser cette caractéristique des figures de moirés pour vérifier la qualité des réseaux de diffraction : il s'agit de plaques (à l'époque en verre) transparentes striées de rainures régulièrement espacées. Ils sont employés pour étu-



2. Grâce aux moirés, on visualise les solutions du problème de l'interférence entre deux fonctions périodiques. Les lignes verticales blanches sont régulièrement espacées, alors que les espacements des lignes noires suivent une courbe de Gauss qui apparaît quand les deux grilles sont superposées.

dier la lumière. Ainsi, les imperfections du réseau testé sont immédiatement détectées lorsque ce dernier est placé sur un réseau original dont on est sûr de la qualité.

Poursuivons avec la lumière ! En cristallographie, les phénomènes de moiré rendent d'innombrables services. Par exemple, quand deux fines lames de cristaux identiques sont superposées, des figures de moirés apparaissent au microscope électronique. Cependant, lorsque les cristaux sont plus épais, les électrons du microscope n'ont pas suffisamment d'énergie pour traverser les cristaux trop décalés l'un par rapport à l'autre : ils ne passent que lorsque la superposition est parfaite.

Les motifs obtenus résultent des interférences créées lors du passage des élec-

trons à travers les réseaux atomiques. Ces figures de moirés fournissent de multiples renseignements : par exemple, l'amplification inhérente aux moirés que nous avons décrite met en évidence des anomalies cristallines d'une taille inférieure au diamètre d'un atome (de l'ordre de quelques dixièmes de milliardièmes de mètre), soit à une précision 100 à 1 000 fois supérieure à la résolution du microscope.

Les figures de moirés aident aussi les cristallographes à déterminer, à l'aide des rayons X, la structure atomique de certaines molécules, telles les protéines, quand celles-ci sont sous une forme cristalline. Par ailleurs, les moirés aident à vérifier la qualité d'une lentille. Celle-ci est placée entre deux grilles et deux lentilles «parfaites» qui corrigent le grossissement des motifs. Quand la lentille testée renferme des distortions, les lignes des moirés sont courbes.

Enfin, grâce aux moirés, on peut étudier la vitesse de dissolution, par exemple d'un sucre, dans une solution placée entre deux grilles de lignes parallèles : à mesure que le sucre se dissout, l'indice de réfraction de la solution évolue et modifie les figures de moirés que l'on observe.

Vasarély était très au fait de ce qui se faisait en science. Connaissait-il pour autant toutes les applications possibles des figures de moirés ?

V. VASARÉLY, *Monographie*, vol. 1, Éditions Griffon, Neuchâtel, 1965.

Fondation Vasarély, site Internet : www.fondationvasarely.com



3. En 1953, Victor Vasarély réalise les œuvres de la série *Transparence*. Elles sont composées, d'une part, d'un motif de lignes noires et blanches (ci-dessus, à gauche) peint sur un support opaque, d'autre part, du même motif (dans certaines œuvres, il

s'agit du motif en négatif) reproduit sur un support transparent que l'on superpose au premier. Les mouvements du support transparent, par exemple un décalage ou une rotation (au centre et à droite), créent des figures de moirés.



La plongée sous-marine

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

Qui veut évoluer sous l'eau doit respecter des règles strictes, dictées par la physique et par la physiologie.

Le masque se plaque sur le visage ; les oreilles font mal. Toute personne qui a déjà plongé le sait : la pression ambiante augmente à mesure que l'on s'enfonce sous l'eau (d'environ une fois la pression atmosphérique tous les dix mètres). À 20 mètres de profondeur, elle est ainsi le triple de la pression atmosphérique (c'est-à-dire la pression qui règne à la surface de l'eau plus la pression due à la couche d'eau). Les tissus mous qui constituent notre organisme sont à la pression ambiante. Composés pour l'essentiel de matières solides et d'eau, ils sont peu compressibles et ne changent quasiment pas de volume au cours d'une plongée.

En revanche, le comportement de l'air contenu dans le système respiratoire est tout autre. Les gaz sont beaucoup plus compressibles que les liquides (1 000 fois plus que l'eau). Dès le milieu du XVII^e siècle, l'Irlandais Robert Boyle et le Français Edme Mariotte énoncèrent une loi pour décrire leur compressibilité : «Le volume d'un gaz est, à température constante, inversement proportionnel à la pression qu'il subit.» Ainsi, quand la pression double, le volume qu'occupe un gaz est divisé par deux. Ceci explique que dès dix mètres de profondeur, le masque écrase le visage. Pour s'affranchir de cet inconvénient, les plongeurs munis de bouteilles doivent apprendre à insuffler de l'air dans leur masque par le nez à mesure qu'ils descendent. Pour éviter des douleurs dans les oreilles dues à une trop forte pres-

sion sur les tympans, ils soufflent par les voies nasales en se bouchant le nez, de sorte que la pression augmente dans les trompes d'Eustache (de petits conduits qui assurent l'équilibre de la pression sur les tympans).

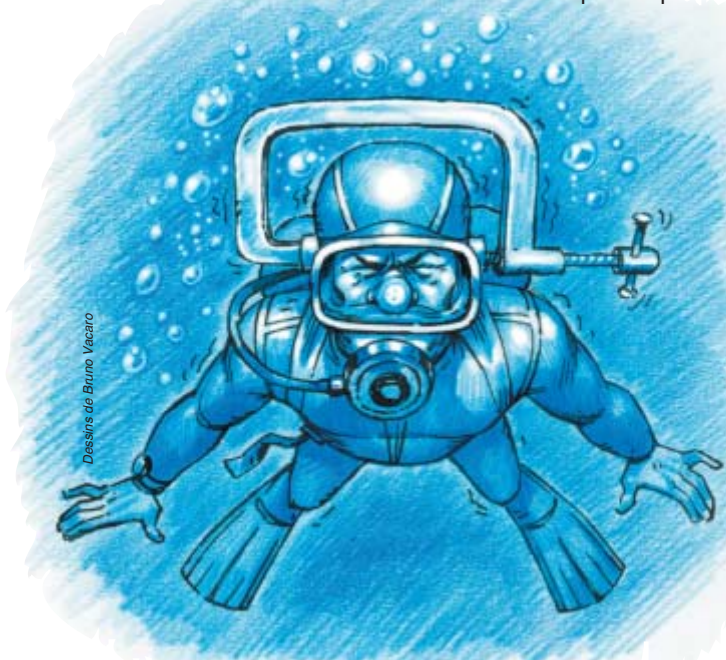
Les conséquences pratiques de la compressibilité de l'air sont encore plus nombreuses lorsque les plongeurs remontent. Après une expiration normale, la quantité d'air résiduelle dans les poumons est supérieure à trois litres, et elle n'est jamais inférieure à 1,5 litre, même lors d'une expiration profonde. Dans les poumons d'un plongeur qui remonte, cet air résiduel se dilate à mesure que diminue la pression ambiante. Si la remontée est trop rapide, le volume risque d'excéder la capacité maximale des poumons, qui avoisine six litres. Pour cette raison, les plongeurs qui remontent évitent de bloquer leur respiration ; ils expirent en permanence, de façon à éviter que les tissus qui composent leurs poumons ne se distendent jusqu'au point de rupture des membranes des cellules pulmonaires. Cet accident rare, mais redouté, est nommé la surpression pulmonaire.

Notons que la dilatation de l'air touche toutes les cavités intérieures, même celles dont on ne soupçonne pas l'existence ! Il arrive, par exemple, qu'un plombage mal réalisé contienne de minuscules cavités pleines d'air. En raison de la petite taille de l'ouverture qui les relie à l'extérieur, plusieurs minutes, voire plusieurs dizaines de minutes sont nécessaires pour que la pression qui règne à l'intérieur de l'une de ces petites bulles atteigne la pression ambiante. Toutefois, au bout d'une plongée de 40 minutes, par exemple, cet équilibre est atteint. Pendant la remontée, la pression dans les cavités n'a pas le temps de s'équilibrer. La surpression qui s'ensuit alors à l'intérieur des dents crée de violentes douleurs, peut faire éclater la dent, ou expulser le plombage. Si vous plongez, ayez un bon dentiste !

DISSOLUTION DES GAZ

Les gaz ne se logent pas seulement dans les cavités, mais se dissolvent aussi dans les liquides. On trouve ainsi dans le sang tous les gaz que contient l'air. En 1803, le Britannique William Henry remarqua que la quantité de gaz qui se dissout dans un liquide est proportionnelle à la pression que ce gaz exerce sur le liquide, et que la quantité de gaz qui se dissout dans un liquide donné à une pression donnée dépend de la nature de ce gaz et de celle du liquide. De l'eau en contact avec de l'air contient des proportions d'azote et d'oxygène différentes de leurs proportions dans l'air.

Un litre d'eau à la pression atmosphérique contient ainsi quelque 15 milligrammes d'azote et 8 milligrammes d'oxygène, alors que sous la même pression, l'air contient quatre fois moins d'oxygène que d'azote. L'air qu'un plongeur respire sort des bouteilles, puis passe par le détendeur, qui le met à la pression ambiante. Puisque la pression augmente au cours de la descente, de plus en plus d'oxygène et d'azote se dissolvent



La pression augmente avec la profondeur ; elle écrase le nez et enfonce les tympans. Les plongeurs s'affranchissent des effets indésirables de la pression ambiante en soufflant dans leur masque.

dans le sang, jusqu'à une concentration d'équilibre. L'augmentation de la concentration en oxygène dissous dans le sang n'a pas de conséquences physiologiques néfastes, car notre métabolisme en consomme de grandes quantités. La quantité d'oxygène nécessaire est quelque 50 fois supérieure à la quantité totale d'oxygène dissoute dans le sang à pression atmosphérique ; la majeure partie est transportée par l'hémoglobine.

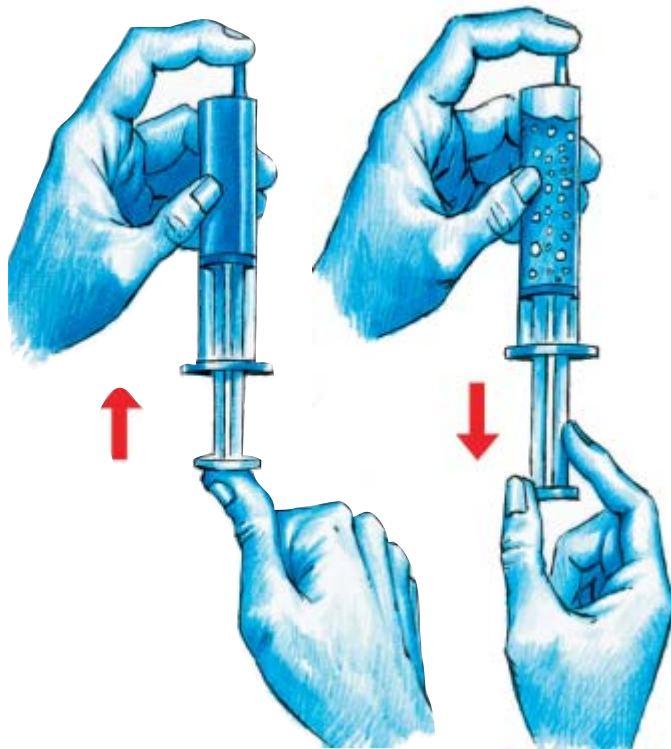
En revanche, l'augmentation de la concentration en azote dans le sang pose davantage de difficultés. Ce gaz se concentre dans le sang et dans tous les tissus de l'organisme, riches en eau. Quand une plongée dure longtemps, un équilibre s'établit entre la pression de l'azote dans les poumons et la quantité d'azote dissous dans les différents tissus. Lorsque le plongeur remonte, l'azote en excès repasse progressivement à l'état gazeux. Il est évacué petit à petit lors du passage du sang dans les poumons. L'évacuation est progressive et n'est possible que par les poumons : elle est longue. Lors des remontées trop rapides, l'azote dissous dans le sang et dans les tissus n'a pas le temps d'être éliminé. Des bulles de gaz restent piégées dans le sang et dans les tissus. Elles risquent de détériorer les tissus, créant des nécroses, voire, plus grave encore, de rester bloquées dans des vaisseaux sanguins, empêchant le sang de s'écouler et provoquant des embolies. On peut imaginer les dégâts causés par ce type de décompression trop rapide en examinant le volume de gaz libéré par une bouteille de champagne que l'on sabre. Maintenu sous une pression de six atmosphères, le champagne (0,75 litre) contient environ 10 grammes de dioxyde de carbone et peut libérer plus de cinq litres de ce gaz dès qu'il est à pression ambiante.

LES RISQUES DE L'AZOTE

La procédure de remontée d'une plongée relativement brève à faible profondeur veut qu'un plongeur gravisse moins de 15 mètres par minute (la vitesse des petites bulles qui l'entourent). En revanche, une plongée longue ou profonde doit être suivie d'une ou de plusieurs pauses pendant la remontée : ce sont les paliers de décompression. Pendant un palier, le plongeur reste à la même hauteur pendant plusieurs minutes, ce qui laisse le temps à l'azote libéré dans le sang et dans les tissus d'être éliminé par les poumons. Le nombre de paliers nécessaires et leurs durées sont indiqués dans les tables de plongée en fonction de la durée du séjour sous l'eau et de sa profondeur.

Que se passe-t-il quand les circonstances imposent de ramener rapidement un plongeur à la surface ? Pour éviter les risques de nécrose et d'embolie, celui-ci doit impérativement être placé, le plus vite possible, dans un caisson hyperbare : dans un tel dispositif, on augmente artificiellement la pression, de sorte que l'azote se redissout dans le sang et dans les organes. Ensuite, on fait des paliers de décompression progressifs, tels qu'ils auraient dû être

Le volume occupé par un gaz est inversement proportionnel à la pression à laquelle il est soumis. Ainsi, le volume d'un ballon d'air est divisé par deux à dix mètres de profondeur, par trois à 20 mètres de profondeur et par quatre à 30 mètres. Un apnéiste qui, pour remonter, se fait tracter par un ballon, accélère au cours de son ascension, car le volume augmentant, la poussée d'Archimède, dirigée vers le haut, croît également.



Cette expérience, facile à réaliser avec de l'eau pétillante, montre que la solubilité d'un gaz dans un liquide diminue quand la pression baisse. Sous pression, l'eau gazeuse contenue dans la seringue dont on bouche l'extrémité (à gauche) ne libère aucune bulle. Quand on abaisse le piston (à droite), la pression à laquelle est soumise l'eau diminue : de nombreuses bulles de gaz apparaissent dans le liquide.

pratiqués dans la mer et qui permettent l'élimination progressive de l'azote.

Indépendamment de ces difficultés, l'azote reste dangereux. Au-delà d'une certaine concentration dans l'organisme, il devient toxique, et déclenche l'«ivresse des profondeurs». Les facultés physiques et intellectuelles s'engourdissent ce qui est très dangereux, car les réactions d'un plongeur soumis à cette forme de narcose sont imprévisibles et généralement inadaptées. Or, au-dessous de 40 mètres, tout plongeur est plus ou moins narcosé ! Pour éviter ce danger, les plongeurs utilisent parfois, comme gaz de plongée du nitrox. C'est un mélange d'oxygène et d'azote contenant une proportion d'azote inférieure à celle de l'air. L'apport d'azote étant inférieur, le gaz redouté se dissout moins et plus lentement dans les tissus et dans le sang. En conséquence, moins de paliers de décompression sont nécessaires. Malheureusement l'oxygène lui-même devient aussi toxique au-delà d'une certaine pression !

Respirer de l'oxygène à plus de 1,6 atmosphère déclenche de graves malaises. L'oxygène entre pour 20 pour cent dans la composition de l'air. Pour un plongeur qui respire l'air contenu dans des bouteilles, l'oxygène devient toxique quand la pression ambiante atteint huit atmosphères, c'est-à-dire vers 70 mètres de profondeur. Qui veut descendre plus bas doit respirer un mélange à faible teneur en oxygène et en azote, tels l'héliox, un mélange d'hélium et d'oxygène, ou encore l'hydréliox, composé d'hydrogène, d'hélium et d'oxygène.

Fascinante, l'exploration des fonds sous-marins nécessite des connaissances en physique et en physiologie que seuls délivrent les moniteurs compétents.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. Jean-Michel COURTY est physicien, chargé de recherche au CNRS. Philip FOSTER, *La plongée sous-marine à l'air*, Presses Universitaires de Grenoble, 1993.

La plongée sous-marine, Encyclopedia Universalis.

