

## Aphrodite en couleurs

*Un ver marin velu sert de modèle aux physiciens qui étudient les cristaux photoniques.*

Entre 1 000 et 2 000 mètres de profondeur, vous explorez les fonds marins à bord d'un sous-mersible : tout n'est que nuances de bleu dans le monde du silence. Tout? Non, au détour d'un récif, votre regard est attiré par un étrange ver velu, d'environ 20 centimètres de longueur sur cinq centimètres de largeur, et dont les soies, au gré de leurs mouvements, se parent de rouge, de bleu et de vert, selon l'angle d'incidence de la lumière. Cet animal est une aphrodite, un ver polychète, c'est-à-dire poilu, qui vit dans les vases et les sables sous-marins.

Cette apparence multicolore n'est pas due à une pigmentation comme chez de nombreux animaux : à une telle profondeur, la faible luminosité en atténuerait l'effet. L'équipe de G. Rouse, de l'Université de Sydney, a montré que ces soies iridescentes tirent leurs propriétés d'une structure identique à celle des cristaux photoniques. Ces cristaux sont des matériaux composites opaques à certaines longueurs d'onde, mais transparents à d'autres. Cette propriété est due à l'agencement régulier des éléments constitutifs : une fibre de silice percée de canaux creux régulièrement espacés selon un réseau hexagonal est un cristal photonique. Le motif répété, ici un canal entouré de ses six plus proches voisins, a une taille de l'ordre



des longueurs d'onde de la lumière visible (entre 450 et 800 nanomètres). Dans un tel cristal, selon la longueur d'onde et l'angle d'incidence, la lumière est complètement réfléchiée ou, à l'inverse, pénètre dans le cristal et y est piégée, en raison de phénomènes complexes de réflexion et de diffraction. Ainsi, selon l'angle d'incidence de la lumière, les longueurs d'onde piégées diffèrent, de sorte que la couleur observée, celle qui s'échappe, varie, de la même façon que celle de l'opale, elle-même un cristal photonique.

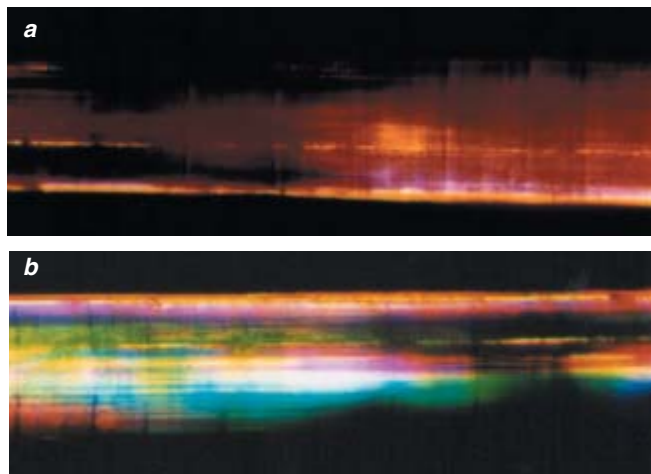
L'observation au microscope électronique d'une soie d'aphrodite a montré qu'elle ressemble aux fibres de silice décrites précédemment. Cette soie est constituée d'une série de cylindres creux dont la paroi est composée de chitine, une protéine présente dans la carapace des arthropodes. Ces cylindres sont agencés en un réseau hexagonal (chacun a six plus proches voisins), lui-même cylindrique, de 210 micromètres de diamètre. La distance qui sépare chaque

petit cylindre de son plus proche voisin est remarquablement constante le long de la soie.

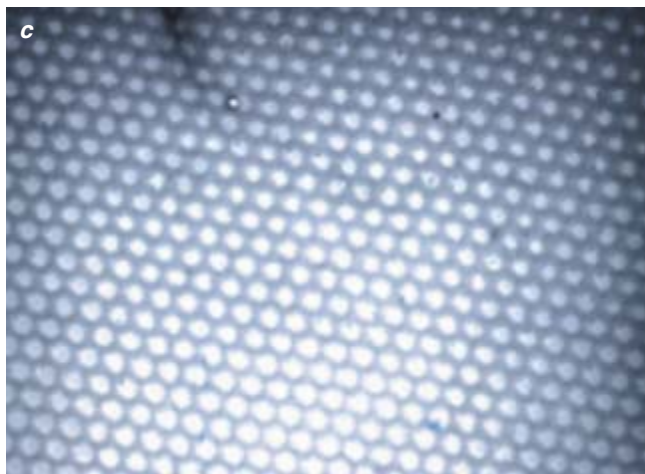
Dans une seconde étape, les zoologistes ont modélisé une soie afin d'en déterminer les caractéristiques optiques. Confirmant les observations sur l'animal, le modèle réfléchit les longueurs d'onde du rouge, du vert et du bleu, tandis que celles comprises entre 520 et 580 nanomètres sont complètement absorbées par la soie : elles ne sont pas transmises.

On ignore encore quels avantages des soies iridescentes apportent aux aphrodites : est-ce pour reconnaître leurs congénères, trouver un partenaire ou attirer les proies?

L'aphrodite n'est pas le seul animal doté d'une parure aux couleurs changeantes : les papillons en sont un autre exemple. Toutefois, à l'inverse de la structure complexe des ailes des lépidoptères, la simplicité géométrique des soies du ver marin en fait un modèle de choix pour les physiciens qui souhaiteraient en copier la structure.



L'aphrodite (en haut) est un ver marin qui mesure environ 20 centimètres de longueur et dont les soies latérales sont iridescentes : selon l'angle d'incidence de la lumière, les soies réfléchissent des couleurs différentes. Le diamètre des soies est de l'ordre de 200 micromètres. Elles apparaissent ainsi rouges (a), ou vertes et bleues (b). Cette pro-



priété est due à la structure périodique des soies qui sont composées d'une série de cylindres creux dont les parois sont en chitine (c). Chaque cylindre a un diamètre de un micromètre. Certains rayons lumineux sont piégés dans les soies, tandis que d'autres sont réfléchis : leurs couleurs changent selon l'angle d'observation.

## Agent double protéique

*Une protéine essentielle pour le fonctionnement des muscles, la dystrophine, commande aussi le débit du sang dans les artères.*

**P**endant une course, le rythme cardiaque s'accélère, le flux sanguin augmente dans les organes qui participent à l'effort, mais ralentit dans les autres. Ces variations sont commandées par les petites artères périphériques alimentant les capillaires qui irriguent les organes. Ces petites artères ont presque le même diamètre chez tous les mammifères ; seul leur nombre varie. Pour augmenter ou, au contraire, réduire le flux sanguin, elles se dilatent ou se contractent. Daniel Henrion et son équipe, dans l'Unité INSERM 541, à l'Hôpital Lariboisière, à Paris, ont constaté que la dystrophine, une protéine essentielle du muscle, intervient dans la régulation du diamètre des artères qui commandent l'afflux de sang pendant l'effort.

Les vaisseaux sanguins sont constitués d'un endothélium, c'est-à-dire d'une couche de cellules en contact avec le sang, et de cellules musculaires lisses, qui entourent les vaisseaux et en autorisent la contraction. Pour une pression et un débit sanguin donnés, un équilibre s'établit entre le muscle lisse, prêt à réduire le diamètre du vaisseau, et l'endothélium, qui tend, au contraire, à le faire augmenter. Les physiologistes s'interrogent depuis longtemps sur l'identité de la molécule qui active les signaux biochimiques de la contraction ou de la relaxation musculaire, selon le débit sanguin perçu par les cellules endothéliales ou la pression détectée par les cellules du muscle lisse. L'équipe de l'INSERM a eu l'idée d'évaluer le rôle de la dystrophine,

une protéine du cytosquelette qui confère leur forme aux cellules. Dans les muscles striés, la dystrophine relie des protéines de la membrane cellulaire et les filaments d'actine. L'absence de dystrophine est à l'origine de la myopathie de Duchenne.

Pour élucider le rôle de la dystrophine, les biologistes ont prélevé des petites artères sur des souris dont les tissus sont dépourvus de dystrophine en raison d'une mutation du gène correspondant, puis ils ont étudié leurs réactions à des augmentations de la pression ou du débit sanguin. Chez des souris normales, quand le débit augmente, les vaisseaux se dilatent, mais quand la pression augmente, c'est le «tonus myogénique», c'est-à-dire la contraction, qui croît. Chez les souris sans dystrophine, les artères se dilatent très peu quand le débit augmente, mais le tonus des vaisseaux s'accroît normalement avec la pression sanguine. En revanche, en présence d'agents qui déclenchent la dilatation, l'acétylcholine, par exemple, les vaisseaux se dilatent, même chez les souris qui ne produisent pas de dystrophine : les cellules musculaires restent fonctionnelles, malgré l'absence de dystrophine, mais les messages de dilatation ne leur sont plus transmis.

Lorsque le débit sanguin augmente, l'endothélium libère des agents qui déclenchent la dilatation des vaisseaux. Le monoxyde d'azote (NO) est le principal d'entre eux. D. Henrion et ses collègues ont comparé la libération de monoxyde d'azote par l'endothélium de souris normales ou de souris mutées ; ils ont constaté que l'absence de dystrophine diminue notablement la synthèse de monoxyde d'azote, comme si l'endothélium était moins sensible à l'action mécanique du cisaillement. Normalement, la paroi des artères est soumise à deux types de forces : une force perpendiculaire à la paroi qui est due à la pression sanguine et une force de cisaillement, qui s'exerce dans le sens du flux et qui résulte des frottements des cellules sanguines sur la paroi. Ceci montre, pour la première fois, que la dystrophine est un maillon indispensable entre le signal physique, le cisaillement, qui est associé au débit sanguin, et le signal biologique responsable de la dilatation, la synthèse de monoxyde d'azote. La dystrophine serait un «détecteur» de cisaillement et, une fois activée, elle déclencherait la synthèse de monoxyde d'azote par les cellules endothéliales, médiateur qui agit sur les cellules musculaires pour qu'elles relâchent ou, au contraire, resserrent leur contrainte. Ainsi, la dystrophine adapte le débit sanguin aux besoins des tissus.

Marie-Thérèse LANDOUSY

## Des piles à eau de mer

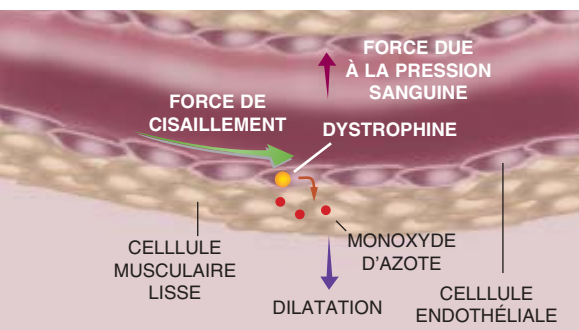
*Une source d'énergie qui utilise l'eau de mer fait avancer des robots sous-marins.*

**L**a mer n'a pas fini de livrer ses richesses, et l'homme d'y puiser son énergie. Après les usines marémotrices qui produisent de l'énergie grâce aux marées, les prototypes de centrales qui convertissent l'énergie des vagues ou de la houle, des physiciens ont mis au point une pile qui fonctionne avec l'oxygène présent dans l'eau de mer.

Les robots autonomes, militaires ou civils, sont de plus en plus utilisés pour le contrôle d'installations sous-marines. On dépose le robot au fond de l'océan, où il se déplace lentement pour surveiller des câbles, des pipelines ou pour détecter des mines, par exemple. Pour que le robot soit autonome, il doit fonctionner avec peu d'énergie. On limite au maximum les opérations qui consistent à le remonter en surface pour changer ses piles ou pour recharger ses batteries ; l'intervention est fastidieuse et coûteuse, car elle nécessite le déplacement d'un navire. Les piles au lithium, les plus performantes aujourd'hui, ont une durée de vie trop courte. Les piles à eau de mer sont une nouvelle possibilité : elles sont bon marché et durent longtemps.

Elles ont été inventées par des ingénieurs russes dans les années 1970, mais se développent véritablement depuis les années 1990. Elles contiennent une anode composée d'un alliage métallique (magnésium ou aluminium) et une cathode formée d'un matériau inerte, du cuivre ou des fibres de carbone, le plus souvent. L'oxygène dissous dans l'eau de mer sert d'oxydant à la réaction électrochimique, et l'eau de mer est l'électrolyte. Le principe est simple, mais la mise en œuvre l'est moins. La concentration en oxygène dans l'eau de mer est faible (0,3 mole par mètre cube en moyenne). La circulation d'eau de mer dans la pile doit être suffisante pour fournir assez d'oxygène à la cathode.

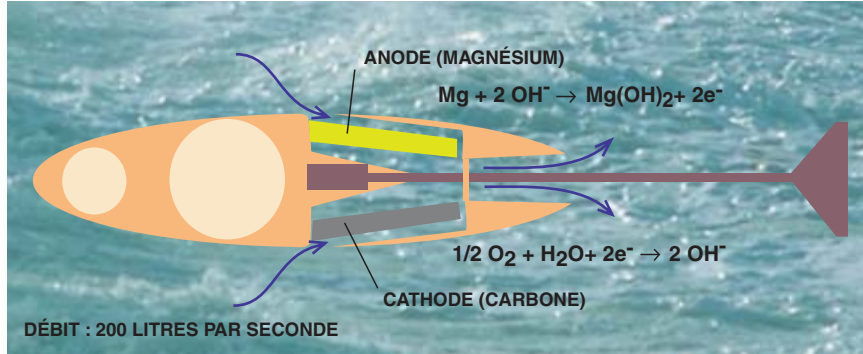
L'eau de mer, corrosive, débarrasse les électrodes des produits de la réaction (oxyde de magnésium...) qui s'accumulent et réduisent le courant dans la pile. Toutefois, des couches de calcaire se déposent sur la cathode et diminuent le rendement de la pile. Des «biofilms» se forment aussi : des bactéries ou des micro-organismes colonisent la surface de la cathode. Certaines détériorent la pile assez rapidement, lorsque le robot



La dystrophine, dans les cellules endothéliales, détecte le cisaillement dû aux frottements des globules rouges sur la paroi des vaisseaux et déclenche la production de monoxyde d'azote, lequel entraîne la dilatation de ces vaisseaux.

se déplace à faible profondeur. D'autres bactéries catalysent la réduction de l'oxygène, et le courant délivré par la pile augmente au cours des premiers jours passés sous l'eau. Il varie ensuite en fonction des fluctuations des paramètres auxquels les bactéries sont sensibles, telles que la température ou la luminosité.

Le courant délivré par la pile dépend aussi des mers où le robot évolue. Des essais ont été menés par l'Organisme de recherche militaire norvégien FFI dans la mer du Nord et dans la Méditerranée. Dans la Méditerranée, l'eau est plus chaude et plus salée, et sa conductivité est supérieure ; le courant délivré par la pile l'est aussi. En revanche, le dépôt calcaire, plus important, réduit la durée de



**Clipper, un robot autonome mis au point par la Direction générale de l'armement, utilise des piles à eau de mer pour sa propulsion. Il a la forme d'un cigare de quatre mètres de longueur sur un mètre de largeur. Il parcourt 1 000 kilomètres à quatre nœuds avec la même pile.**

vie de la cathode. Celle de la pile est surtout limitée par la taille de l'anode, laquelle dépasse parfois un mètre de longueur. Elle dépend aussi de la puissance demandée et du débit de l'eau de mer. Une pile à eau de mer est utilisée

pour la propulsion d'un robot sous-marin mis au point par la Direction générale de l'armement (DGA) et par le FFI. Des essais vont commencer au Bassin des carènes avant que le robot ne soit plongé dans de plus grands fonds.

## Les plus anciens dinosaures sauropodes

*Ils ont été trouvés en Thaïlande et ont plus de 200 millions d'années.*

**L**es sauropodes sont presque l'archétype du dinosaure, avec leur silhouette caractéristique : une petite tête, un long cou, un corps massif soutenu par des membres en forme de pilier, et une très longue queue. Ces grands animaux herbivores ont connu un succès évolutif considérable tout au long du Jurassique (–205 à –135 millions d'années) et du Crétacé (–135 à –65 millions d'années). Parmi eux figurent les plus grands animaux terrestres ayant existé : *Diplodocus* atteignait une trentaine de mètres de longueur, et on a estimé que *Brachiosaurus* pouvait peser jusqu'à 80 tonnes (et il ne s'agit là que de formes connues par des squelettes complets ; d'après certains restes fragmentaires, les animaux auraient été encore plus grands).

Jusqu'à une date récente, cependant, on ne savait rien de l'histoire des sauropodes avant le Jurassique. Le plus ancien spécimen connu, *Vulcanodon karibaensis*, trouvé au Zimbabwe, datait du début du Jurassique. De la période précédente, le Trias (–245 à –205 millions d'années), on n'avait signalé que quelques traces de pas fort douteuses au Lesotho. Tout cela a changé avec l'identification, par notre équipe franco-thaïlandaise, d'ossements de sauropodes dans le Trias de Thaïlande. Ces restes proviennent de grès rouges déposés en milieu fluvial, correspondant à une formation géologique (la Formation Nam Phong) qui a pu être

datée par des géologues pétroliers d'après les grains de pollen et les spores qu'elle contient : ces microfossiles indiquent un âge Trias supérieur (Norien supérieur ou Rhétien, soit entre –210 et –205 millions d'années).

Les premiers ossements ont été trouvés en 1998 par un habitant d'un village de la province de Chaityaphum (Nord-Est de la Thaïlande), qui chassait de nuit des écureuils volants dans une forêt et remarqua sur le sol des objets brillants au clair de lune. Ces objets se révélèrent être de gros ossements. Les paléontologues du Service géologique de Thaïlande ayant été alertés, des fouilles furent organisées et permirent de recueillir une partie d'un squelette, comprenant des vertèbres et des os des ceintures et des membres. Ce spécimen a été décrit sous le nom d'*Isanosaurus attavipachi* (le « reptile de l'Isan », nom du Nord-Est de la Thaïlande, où il a été découvert, et dédié au géologue thaï Pricha Attavipach). Il s'agit du plus ancien dinosaure sauropode connu à ce jour. L'animal ne semble pas avoir été très grand (du moins pour un sauropode) : sa longueur est estimée à quelque 6,5 mètres, mais sa croissance n'était pas achevée, comme l'indique le degré d'ossification de ses vertèbres. Les caractères de son squelette montrent qu'il s'agit bien d'un sauropode à part entière, et non d'un représentant des prosauropodes, autre groupe de grands dinosaures abondamment représentés dans le Trias. *Isanosaurus attavipachi* présente aussi des caractères primitifs : par exemple, les vertèbres du cou sont encore assez peu allongées, contrairement à ce que l'on voit chez des sauropodes plus évolués.

La découverte d'*Isanosaurus attavipachi* démontre de façon concrète que les sauropodes firent leur apparition dès

le Trias, ce que l'on supposait, mais de façon théorique faute de fossiles. On peut d'ailleurs penser qu'à la fin du Trias, ces dinosaures avaient déjà derrière eux une assez longue histoire, mais les prédécesseurs d'*Isanosaurus attavipachi* restent à découvrir. Quoi qu'il en soit, notre connaissance des sauropodes du Trias supérieur de Thaïlande n'en est encore qu'à ses débuts, et des surprises nous attendent sans doute. La preuve en est que quelques mois après la première découverte, une villageoise à la recherche de champignons dans la même forêt a trouvé à peu de distance du premier site les restes d'un deuxième squelette. Il appartient aussi à un sauropode, mais ses dimensions sont nettement plus imposantes que celles d'*Isanosaurus attavipachi* : d'après la taille de son humérus, l'animal aurait mesuré près de 13 mètres de longueur. Non seulement les sauropodes étaient déjà présents au Trias supérieur, mais dès cette période lointaine certains d'entre eux atteignaient une taille gigantesque.

Eric BUFFETAUT  
et le Groupe franco-thaïlandais de  
recherche sur les dinosaures



**Le fémur d'*Isanosaurus attavipachi*.**