

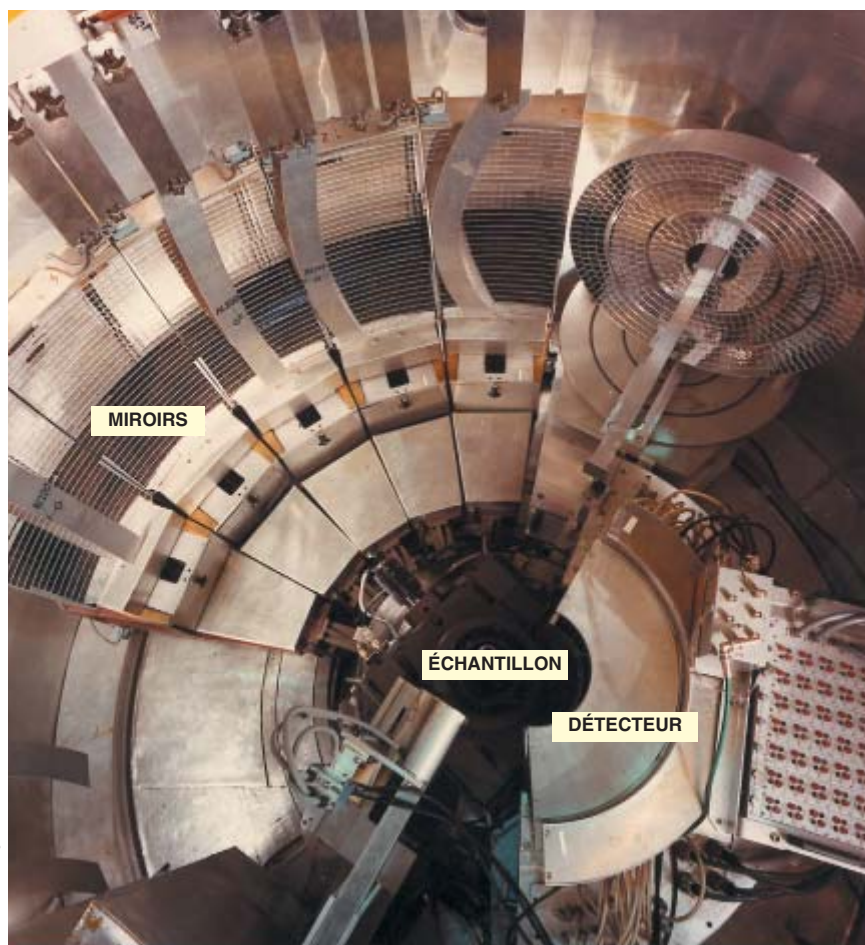
connues avec exactitude. De surcroît, les forces de Coulomb agissent à longue distance (plus de un nanomètre), donc les erreurs sur l'évaluation des charges s'accumulent. La méthode de calcul par un champ de forces dépend de trop de paramètres approximatifs, et les sondes à effet tunnel en ont révélé les limites.

Accord avec l'expérience

Nous avons cherché une autre méthode pour évaluer les interactions entre les atomes de l'aspirine, et pour établir une carte énergétique plus correcte. Au lieu de considérer les interactions intramoléculaires comme des ressorts plus ou moins rigides, nous avons tenu compte des nuages d'électrons entre les atomes, et nous avons fondé une partie de nos calculs sur les équations de la mécanique quantique. Nous avons ainsi dessiné les nouvelles vallées et les nouvelles collines sur la carte en relief. Après avoir fait tourner virtuellement le groupe méthyle dans ce nouveau paysage, nous avons comparé la valeur de l'effet tunnel calculée avec celle mesurée, pour l'ensemble des molécules étudiées. La concordance entre les résultats de l'expérience et ceux du calcul était ainsi améliorée.

Enfin, nous avons utilisé une dernière méthode, dite de la fonctionnelle de densité, élaborée dans les années 1960 par Walter Kohn et John Pople, qui ont reçu le prix Nobel de chimie en 1998, pour dresser la carte du relief énergétique de l'aspirine, ainsi que de 15 autres cristaux. Pour ce faire, on subdivise le cristal en petits volumes nommés mailles et l'on calcule la densité électronique par maille, et non par molécule. L'écart entre l'énergie de l'effet tunnel ainsi calculée et l'énergie déterminée expérimentalement est inférieur à cinq pour cent pour l'aspirine, ainsi que pour les 15 autres molécules que nous avons étudiées avec cette méthode et qui ont un groupe méthyle.

Grâce à l'effet tunnel des protons dans les groupes méthyle, nous avons validé les expressions des interactions faibles. Nous disposons ainsi de descriptions précises de ces interactions dans 15 molécules organiques simples, qu'un champ de forces bien affiné pourrait reproduire. Ces descriptions des interactions constituent des références fiables pour l'étude des protéines. Les



6. LA MESURE DE L'EFFET TUNNEL est fondée sur la diffusion des neutrons (ici, un spectromètre de rétrodiffusion à l'Institut Laue Langevin). L'échantillon, placé au centre de l'enceinte d'environ trois mètres de diamètre, est entouré de miroirs où se réfléchissent les neutrons avant d'être captés par le détecteur.

biologistes vont bientôt les extrapoler à des molécules plus complexes et valider ou améliorer le champ de forces utilisé dans leurs simulations. Ces expressions des interactions faibles sont en effet indispensables aux simulations des protéines, car les méthodes calculatoires qui déterminent explicitement la distribution électronique sont

trop lentes pour être appliquées à la simulation des grandes biomolécules, et les biologistes doivent donc – à ce jour – se contenter de la méthode classique du champ de forces. La simulation des structures des protéines et de leur dynamique pourrait ainsi gagner en précision, améliorant la compréhension du repliement des protéines.

Mark JOHNSON dirige le service de calcul scientifique de l'Institut Laue Langevin, à Grenoble. Gordon KEARLEY, professeur de physique des neutrons, est responsable des instruments à la source IRI (Interfaculty Reactor Institute) de Delft ; il a travaillé 20 ans à l'Institut Laue Langevin.

M. JOHNSON, M. PRAGER, H. GRIMM, M. NEUMANN, G. KEARLEY et C. WILSON, *Methyl group dynamics in paracetamol and acetanilide : probing the static properties of intermolecular hydrogen bonds formed by peptide groups*, in *Chem. Phys.*, 244, pp. 49-66, 1999.

M. JOHNSON, M. NEUMANN, B. NICOLAI, P. SMITH et G. KEARLEY, *The origin and temperature dependence of the single particle, methyl group rotational potential in acetic acid* in *Chem. Phys.*, 215, 343, 1997.

M. NEUMANN et M. JOHNSON, *Methyl group tunnelling-A quantitative probe of atom-atom potentials* in *J. Chem. Phys.*, 107, 1725, 1997.

M. JOHNSON et G. KEARLEY, *Quantitative atom-atom potentials from rotational tunnelling ; their extraction and their use*, in *Annual Review of Physical Chemistry*, 51, pp. 297-321, 2000.

Les animaux transparents



SÖNKE JOHNSEN

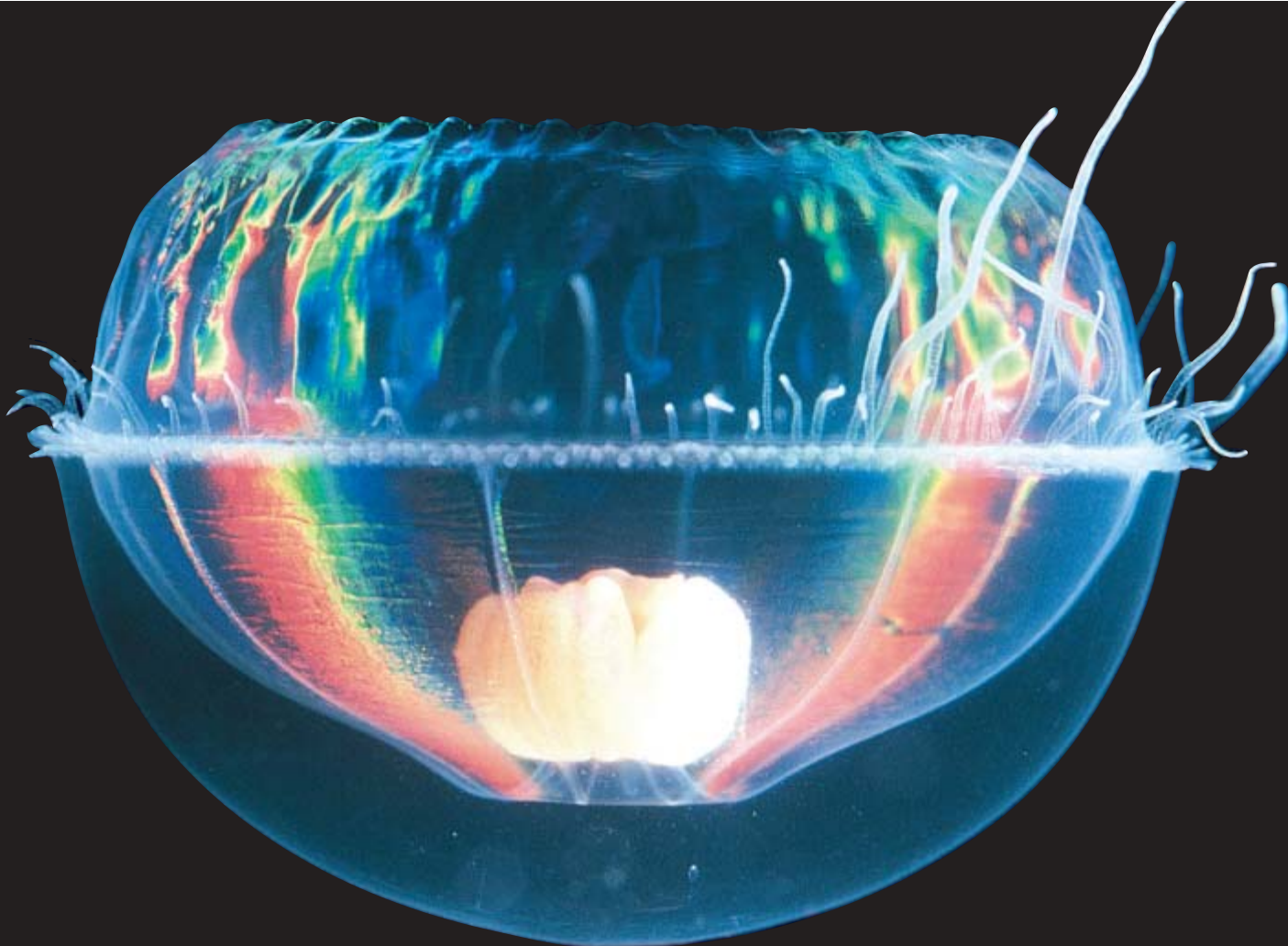
Grâce à d'ingénieuses adaptations physiologiques, de nombreux animaux marins sont devenus transparents.

G. Richard Harbison (M. Pincta), Eddith A. Woold (Physalia et Cnidaria)

À mesure que nous descendons, l'eau s'assombrit. À des centaines de kilomètres de la côte, nous ne plongeons pas sur un récif fourmillant de vie ou sur une épave légendaire, mais simplement en haute mer. Sous nous s'ouvrent les abysses, à plus de 3 000 mètres de profondeur. Dans ce monde uniforme, seuls de subtils dégradés de couleurs et de lumières signalent des changements de temps ou de lieu. À 18 mètres de profondeur, nous arrêtons de descendre. Reliés à une ligne de sécurité qui pend du bateau, nous entamons nos recherches. À mesure que nos yeux s'habituent, nous découvrons, autour de nous, des dizaines d'animaux transparents aux mouvements lents. Au milieu de cette étrange ménagerie de cristal, on distingue quelques méduses, mais nous ne reconnaissons pas la plupart des créatures. Ces animaux mesurent de quelques centimètres à une trentaine de centimètres. Alors que l'on en détecte certains grâce à la nourriture qui se trouve dans leur estomac, ou par des taches de couleur, ou des éclats irisés, d'autres sont si transparents qu'ils restent invisibles, même à quelques centimètres de nous. Nous sortons des bocaux de nos sacs et commençons la récolte.



L'estomac de la méduse *Punctata* (à gauche), une espèce du genre *Nausithoe*, est la zone à quatre sommets. On voit les huit gonades rouges de l'animal. *Phronima* (ci-dessus) aurait inspiré le monstre du film *Alien*. Il s'agit en fait d'une créature inoffensive, longue de deux à trois centimètres. On capture très rarement l'hydroméduse *Cunina* (au centre).



Laurence P. Madin (Whoi) (arctapodema) ; G. Richard Harbison (Pterosoma, Ctenophora et Vitreledonella richardi) ; Edith A. Widder (Cystosoma)

La ménagerie de verre

L'hydroméduse du genre *Arctapodema* (en haut, à gauche) se pare de couleurs irisées quand la lumière du flash du photographe se reflète sur les fines striations musculaires de l'animal. La rétine allongée du gastéropode transparent *Pterosoma* (en bas, au centre) capte les images ligne par ligne, comme une caméra de télévision. L'amphipode (en haut, à droite), connu sous le nom de *Cystosoma*, ressemble à un cafard en cristal de cinq centimètres de longueur. Sa carapace contient surtout de l'eau et un minuscule intestin en forme d'aiguille (invisible sur ce cliché). Rarement capturée, la pieuvre transparente *Vitreledonella richardi* (à gauche) est mal connue. Plus encore, l'animal (en bas à droite) n'a pas de nom, car il n'a été découvert que très récemment.



Une vie de gélatine

La plupart de ces animaux sont en grande partie constitués d'un matériau gélatineux qui leur confère de nombreux avantages. Puisque cette substance contient surtout de l'eau incompressible, les animaux ne sont pas écrasés par la pression due à la profondeur. Cette substance a la bonne densité pour leur permettre de flotter au-dessus des abysses. De plus, elle est inerte et facile à synthétiser ; les animaux qui en contiennent peuvent vivre même quand la nourriture est peu abondante. Lorsque les ressources abondent, les animaux se développent et se reproduisent à une vitesse considérable. En une semaine, certains constituent des colonies qui regroupent des milliards d'individus et couvrent des milliers de kilomètres carrés.

L'avantage probablement le plus important de cette substance gélatineuse, et la cause de son succès évolutif dans l'univers sous-marin, c'est la transparence qu'elle confère. Presque tous les animaux de haute mer, qui ne sont pas protégés par des dents, des

toxines, une vitesse élevée ou une petite taille, sont plus ou moins invisibles. En fait, la transparence ne devient rare qu'aux profondeurs où la lumière ne pénètre jamais : l'invisibilité ne conférerait plus aucun avantage.

Malheureusement, les animaux gélatineux sont lents et fragiles. Leur survie n'est liée qu'à leur caractère invisible, la forme suprême de camouflage ; c'est ainsi qu'ils échappent à leurs prédateurs et qu'ils capturent leurs propres proies.

Quel degré de transparence ces animaux peuvent-ils atteindre ? Quelles caractéristiques physiologiques leur confèrent leur transparence ? Quand on étudie la transparence, la première difficulté à laquelle on est confronté est la capture d'animaux en bon état. Vivants et en bonne santé, ils sont transparents, mais deviennent très rapidement opaques après leur mort. Comme ce sont des animaux fragiles, les turbulences de l'eau provoquées, par exemple, par le battement de la queue d'un poisson risquent de les déchirer. C'est pourquoi on doit les capturer dans leur habitat, en plongeant à grande profondeur ou avec un submersible.

Nous avons ainsi collecté une grande variété d'animaux transparents, pour la plupart en excellent état. Ensuite, dans un laboratoire de recherche, à bord du navire, nous avons mesuré leur transparence dans le spectre visible avec un spectromètre fonctionnant comme ceux que les ophtalmologistes utilisent pour mesurer la transparence du cristallin de l'œil humain.

Nous avons constaté que la transparence des animaux change : la quantité de lumière qui traverse les organismes étudiés varie de 20 à 90 pour cent ; les animaux les plus gros ont les tissus les plus transparents ; la transparence ne change pas avec la profondeur, les animaux capturés à 750 mètres de profondeur étant aussi transparents que les organismes prélevés près de la surface.

Pourquoi les animaux proches de la surface, où le milieu est mieux éclairé et où, par conséquent, il est plus difficile de se cacher, ne sont-ils pas plus transparents ? Inversement, pourquoi certains animaux des profondeurs sont-ils si transparents, alors que leurs prédateurs ne peuvent voir à plus de quelques centimètres ?

Pour comprendre une telle transparence, soulignons que la visibilité d'un objet dépend de son contraste,

c'est-à-dire de sa luminosité par rapport au milieu qui l'entoure. L'eau qui sépare un animal marin de son prédateur diffuse et absorbe la lumière réfléchie par l'animal. Ainsi, plus l'animal est éloigné, moins les contrastes sont marqués et plus il est difficile à distinguer. À une certaine distance qui dépend du contraste propre de l'animal et de l'absorption de la lumière par l'eau, le contraste diminue à tel point que le prédateur ne voit plus sa proie (dès lors en sécurité).

Transparence et structure

Contrairement aux autres formes de camouflage, la transparence concerne tout l'organisme, pas seulement sa surface externe ; l'évolution a trouvé plusieurs façons ingénieuses de tourner les difficultés que pose la transparence de tous les organes.

On peut en observer quelques-unes à l'œil nu. Parmi les animaux transparents, certains sont aplatis et minces : ils ont plus de chances de laisser passer davantage de lumière (si un organisme de un centimètre d'épaisseur laisse passer un neuvième d'un faisceau lumineux, un organisme de un demi-centimètre en laisse passer trois fois plus). De surcroît, plus un animal est mince, moins il est repérable quand il est vu de profil. Des animaux comme les leptocéphales, les larves d'anguilles, utilisent cette astuce à l'extrême et ressemblent à des lamelles mesurant seulement un ou deux millimètres d'épaisseur pour 10 centimètres de longueur. Certains cténaïres, dont le nom de « ceinture de Vénus » est évocateur, sont aussi longs et plats qu'une ceinture. Les jeunes langoustes sont aussi minces qu'une feuille de papier. Le seul moyen de détecter leur présence est d'apercevoir leur ombre furtive.

Les autres transformations évidentes concernent des parties qui, pour des raisons physiques, ne peuvent être rendues transparentes. Ainsi, dans la mesure où la rétine doit absorber la lumière pour fonctionner, une partie de l'œil au moins reste toujours visible. Trois solutions à ce problème sont apparues. Certains organismes portent leurs yeux à l'extrémité de longs pédoncules, afin de les éloigner le plus possible de leur corps. D'autres, à l'instar du crustacé *Phronima*, ont des rétines compactes et utilisent des sortes de fibres optiques où se propage la lumière. D'autres encore, comme le grand crustacé *Cystisoma*, possèdent des

Les siphonophores : des colonies prédatrices

Certains animaux transparents utilisent leur invisibilité à d'autres fins que le camouflage passif. Les siphonophores, des individus réunis en colonies, sont d'étranges cousins des méduses. La Physalie est le plus connu d'entre eux. La plupart des siphonophores sont transparents, mais certains ont des cellules urticantes regroupées en boutons clairs qui évoquent de jeunes poissons, de petites crevettes et d'autres proies attrayantes. Les animaux les poursuivent, mais, ne voyant pas l'animal transparent beaucoup plus gros auquel ils sont fixés, sont rapidement capturés. Les siphonophores de la famille des *Prayidae* sont ici (a) sous leur forme compacte qui mesure entre 10 et 12 centimètres seulement de longueur. Lorsqu'elle chasse, cette colonie s'étire jusqu'à atteindre un mètre de longueur ; ses cellules urticantes suspendues aux organes de flottaison se balancent comme un filet. Les siphonophores de la famille des *Forshalea* (b) chassent de la même façon.



La polarisation : l'arme secrète des prédateurs

Dans la course perpétuelle à l'armement engagée entre les proies et les prédateurs, ces derniers parviennent parfois à priver leurs proies de leur transparence. Dans l'océan, les molécules d'eau diffusent la lumière, produisant une lumière polarisée, dont les ondes oscillent en parallèle. L'homme ne discerne la lumière polarisée qu'au moyen de verres polarisants, mais de nombreux animaux, notamment les crustacés et les calmars, y sont naturellement sensibles. Cette aptitude les aide à chasser, car les tissus de certains des animaux transparents dont ils se nourrissent suppriment ou dévient la polarisation de la lumière qui les traverse. Détectant ces changements, les prédateurs devinent la présence de leurs proies. Un même copépode *Labidocera* est vu différemment selon que l'œil détecte les changements de polarisation (d) ou non (c).

On sait que les calmars utilisent leur aptitude à détecter la lumière polarisée pour trouver des proies transparentes et pour se transmettre des signaux. Au cours d'une expérience, on donne à des calmars le choix d'attaquer deux perles de verre. L'une des perles a un effet sur la polarisation de la lumière, l'autre non. On constate que les calmars préfèrent attaquer la perle qui modifie la polarisation de la lumière. Sous un éclairage polarisé (c'est l'état naturel de l'océan), les calmars détectent de plus loin les animaux qui agissent sur la polarisation.

yeux énormes dotés d'une rétine pâle et très mince située juste sous la cornée.

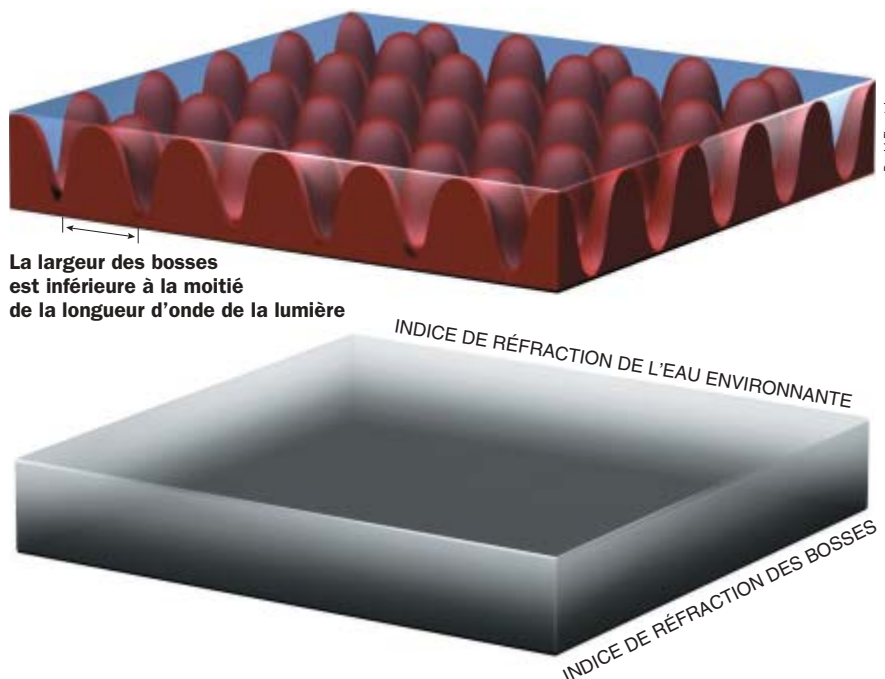
L'estomac est aussi un organe qui reste toujours visible. Non pas à cause de l'estomac lui-même, mais de son contenu (des animaux ou des végétaux en cours de digestion), qui est généralement opaque. Toutefois, chez certains animaux transparents, l'estomac est en forme d'aiguille et toujours dirigé vers le bas, quelle que soit l'orientation de l'animal. Cette méthode est efficace, car de nombreux prédateurs détectent leurs proies en cherchant les ombres qui se détachent sur la surface éclairée de l'eau (une aiguille verticale a une ombre minimale). Une autre stratégie consiste à tapisser l'extérieur de l'estomac d'un tissu réfléchissant. Comme un miroir, ce type de tissu est invisible en pleine mer, car il reflète la lumière environnante et se confond avec elle. C'est pour cette même raison que les poissons sont généralement couverts d'écailles argentées et miroitantes.

La peau est le troisième organe à poser des difficultés, car elle reflète toujours un peu de lumière. Certains animaux ont une forme simple qui minimise la surface corporelle et évite les reflets. Plus rarement, mais plus curieusement, certains animaux sont couverts de bosses microscopiques qui réduisent la réflexion de la lumière.

Cette stratégie dépend de l'indice de réfraction du matériau, qui indique à quelle vitesse la lumière le traverse. La lumière se propage plus lentement dans un matériau qui a un indice de réfraction élevé que lorsque l'indice est plus faible.

Quand une surface est couverte de bosses plus petites que la moitié de la longueur d'onde de la lumière reçue, la surface se comporte comme une substance uniforme dont l'indice de réfraction est une moyenne entre celui des bosses et celui du milieu environnant (l'eau, dans notre cas). Puisque les bosses sont plus larges à leur base qu'à leur sommet, l'indice de réfraction à la base est proche de celui du matériau (généralement supérieur à celui de l'eau), car ce matériau est sur un même plan, plus abondant que l'eau. En revanche, au sommet, où l'eau est majoritaire, l'indice est plus faible.

Ainsi, l'augmentation de l'indice de réfraction est progressive, de l'eau ambiante vers le corps de l'animal, ce qui réduit les phénomènes de réflexion. En réalité, ce système est si performant que les concepteurs de lentilles utili-



LES MINUSCULES BOSSES à la surface d'un animal transparent réduisent les reflets, ce qui améliore son camouflage. Les bosses dont la largeur est inférieure à la moitié de la longueur d'onde de la lumière qu'elles reçoivent ont un indice de réfraction intermédiaire entre celui des bosses et celui du milieu. Comme les bosses sont plus étroites au sommet, il y a davantage de matériau à la base. Ainsi, l'indice de réfraction passe progressivement de celui du matériau à celui du milieu environnant. Cette variation progressive interfère avec la capacité de la surface bosselée à refléter la lumière.

sent le même principe pour améliorer le revêtement des lentilles pour l'optique de précision. Il serait aussi employé pour réduire la réflexion des ondes radar par certains sous-marins.

Les conditions de l'invisibilité

La réduction des réflexions est une condition nécessaire, mais pas suffisante, pour qu'un animal soit invisible. La lumière doit aussi traverser le corps, ce qui nécessite que les faisceaux ne soient ni diffusés, ni absorbés sur leur parcours. Des deux phénomènes, la diffusion est le principal obstacle à la transparence animale, car très peu de molécules organiques absorbent la lumière.

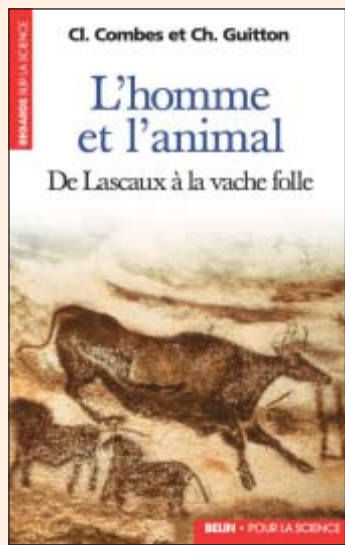
La diffusion est due à des variations de l'indice de réfraction. Quand la lumière passe d'un milieu à un autre, le changement d'indice de réfraction modifie la vitesse de la lumière. En outre, à moins que le faisceau lumineux ne pénètre perpendiculairement dans le deuxième milieu, la direction de propagation du faisceau change.

Les tissus animaux présentent en général de nombreuses variations de l'indice de réfraction, parce que les différents constituants nécessaires à la vie (les cellules, les fibres, les

noyaux, les nerfs, etc.) s'y côtoient. Même les animaux gélatineux, qui contiennent beaucoup d'eau, ont des indices de réfraction qui varient. La relation entre la variation de l'indice de réfraction et la diffusion de la lumière est particulièrement compliquée, et nous ignorons les détails de la répartition des indices de réfraction dans les tissus vivants.

Néanmoins, en utilisant des modèles simplifiés, et en supposant qu'un tissu requiert certains volumes de différents constituants pour vivre, j'ai examiné comment la taille, la forme et l'indice de réfraction de ces éléments agissent sur la quantité totale de lumière diffusée. Les fabricants de peintures pour le bâtiment utilisent des méthodes identiques pour améliorer la diffusion de la lumière et augmenter le pouvoir couvrant de leurs peintures.

Les facteurs les plus importants sont la répartition et la taille des constituants. Quand une cellule a besoin d'une certaine quantité de graisse pour survivre, mais qu'elle doit diffuser le moins de lumière possible, la meilleure stratégie est de diviser la graisse en un grand nombre de minuscules gouttelettes. La pire des stratégies serait de diviser la graisse en gouttes dont la



L'homme et l'animal

**Claude Combes,
Christophe Guittou**

«160 pages brillantes
d'érudition, de profondeur
et d'ouverture d'esprit.»

*Philippe Dorchies,
professeur de parasitologie,
La Dépêche vétérinaire*

...

«Une promenade plaisante,
claire et documentée, guidée
conjointement par un biologiste
et un vétérinaire.»

Eurêka

...

«Un livre riche et divertissant
alliant philosophie et sciences
grand public publié par deux
scientifiques de l'université
de Perpignan.»

Midi Libre

**Code 075012 • 95 F
160 pages**

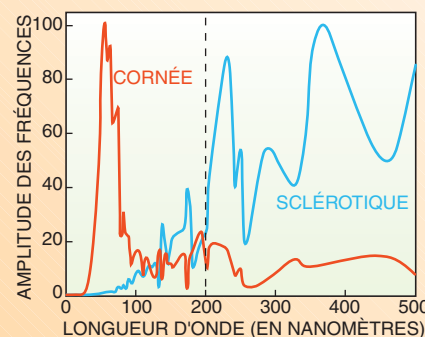
**Voir bon de commande
page 98**

BELIN • POUR LA SCIENCE

Pourquoi la cornée est-elle transparente ?

L'analyse de Fourier, qui détermine les fréquences prédominantes dans un ensemble d'ondes ou autres phénomènes périodiques, est utile pour étudier la transparence des animaux gélatineux, mais aussi de la cornée humaine. Comme le corps des animaux transparents, la cornée et le blanc de l'œil, nommé sclérotique, sont constitués de protéines fibreuses disposées périodiquement ou presque. Quand ces fibres sont régulièrement organisées et espacées d'une «longueur d'onde» inférieure à la moitié de la longueur d'onde la plus courte de la lumière visible, le tissu est quasi transparent. La lumière qui traverse directement le tissu se renforce, subissant des interférences constructives, tandis que la lumière diffusée par les côtés est éliminée par des interférences destructives.

Dans la cornée et dans la sclérotique, les fibres du tissu existent sous divers motifs répétitifs, qui ont tous des longueurs d'onde différentes. Sur le graphe, les longueurs d'onde sont indiquées en abscisse. En ordonnée, on a indiqué la prédominance des longueurs d'onde dans les deux tissus analysés. Dans la cornée, par exemple, les fibres qui se répètent avec une longueur d'onde d'environ 50 nanomètres sont les plus abondantes. Cette valeur est notablement inférieure à 200 nanomètres, approximativement la moitié de la longueur d'onde de la lumière violette, la plus courte que l'œil humain puisse observer. En revanche, les pics de la sclérotique sont supérieurs à 200 nanomètres, ce qui la rend opaque.



Laure Grace

taille serait proche de la longueur d'onde de la lumière. L'indice de réfraction de la graisse est peu important, et la forme des gouttelettes encore moins. Ainsi, on connaît les caractéristiques importantes que l'on doit rechercher quand on observe des animaux transparents au microscope.

Toutefois, des variations d'indices de réfraction n'engendrent pas toujours une diffusion. Quand l'amplitude des variations des indices de réfraction est inférieure à la moitié de la longueur d'onde de la lumière incidente, la lumière diffusée par toutes les variations est éliminée par des interférences destructives. Lors d'une interférence destructive, les ondes lumineuses s'annulent les unes les autres.

Par exemple, le blanc de l'œil (la sclérotique) et la cornée sont tous deux constitués de couches denses de fibres de collagène. Toutefois, dans la cornée, les fibres sont plus petites et arrangées plus régulièrement, de sorte que les variations de l'indice de réfraction sont toutes inférieures à la moitié de la longueur d'onde de la lumière. Il y a une forte interférence destructive, et l'organe est transparent. Sans cette interférence, la cornée serait opaque. La cataracte se produit chez les personnes âgées, lorsque cet assemblage uniforme de

fibres est perturbé, ce qui diminue l'interférence destructive.

La transparence est un extraordinaire exemple d'adaptation à des situations difficiles. Par des transformations ingénieuses de leur organes et de leurs cellules, ces fragiles animaux ont trouvé un moyen de survivre dans un milieu dangereux. Comme c'est souvent le cas, les solutions apparues naturellement rivalisent avec des découvertes techniques récentes, par exemple les fibres optiques ou les revêtements antireflets. Ces animaux, si courants et pourtant très mystérieux, ont des choses étonnantes à nous apprendre.

Sönke JOHNSEN travaille à l'Institut Océanographique de Cap Cod.

A.C. HARDY, *The Open Sea, Its Natural History : The World of Plankton*, Houghton Mifflin Company, 1956.

K. MADIN et D. KOVACS, *Beneath Blue Waters : Meeting with Remarkable Deep-Sea Creatures*, Viking Press, 1996.

S. JOHNSEN et E.A. WIDDER, *The Physical Basis of Transparency in Biological Tissue : Ultrastructure and the Minimization of Light Scattering*, in *Journal of Theoretical Biology*, vol. 199, n° 2, pp. 181-198, juillet 1999.

