

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

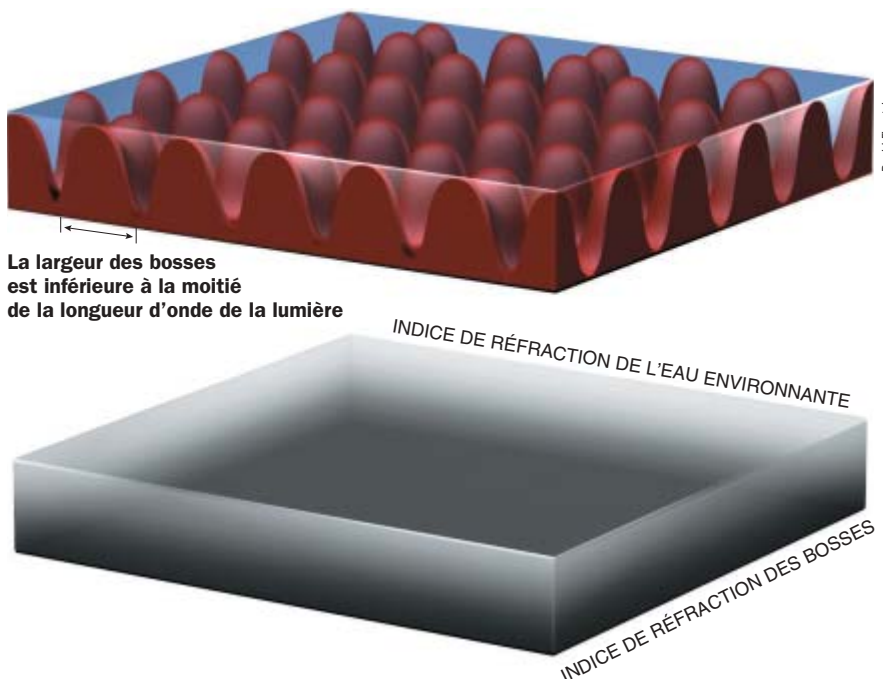
L'estomac est aussi un organe qui reste toujours visible. Non pas à cause de l'estomac lui-même, mais de son contenu (des animaux ou des végétaux en cours de digestion), qui est généralement opaque. Toutefois, chez certains animaux transparents, l'estomac est en forme d'aiguille et toujours dirigé vers 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.

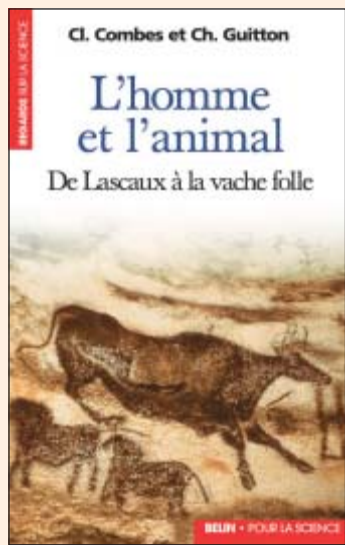
La diffusion est due à des variations de l'indice de réfraction. Quand la lumière passe d'un milieu à un autre, le changement d'indice de réfraction modifie la vitesse de la lumière. En outre, à moins que le faisceau lumineux ne pénètre perpendiculairement dans le deuxième milieu, la direction de propagation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

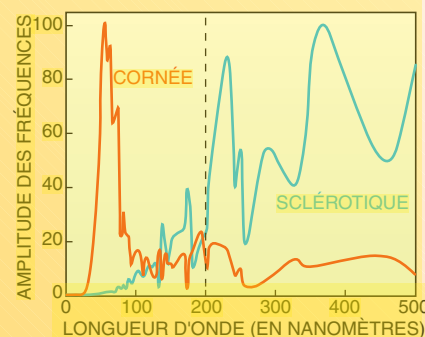
**Voir bon de commande
page 98**

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.