

LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

POURQUOI LA GRANDE BLEUE EST... BLEUE

L'eau d'une bouteille est transparente, mais celle de la mer, ou d'une piscine, est bleue. Pour quelle raison? Parce que l'eau absorbe préférentiellement la lumière rouge à cause des vibrations de ses molécules.

Seul sur le sable, le regard posé sur l'eau, vous rêvez... et vous vous interrogez. Pourquoi l'eau de votre bouteille est-elle transparente alors que la mer qui s'étend devant vous est bleue? Et pour quelle raison un plongeur s'enfonçant dans les profondeurs est-il peu à peu entouré d'un bleu de plus en plus dense, puis de ténèbres? Pour répondre, on fait souvent l'analogie avec le bleu du ciel ou on invoque la présence de minéraux ou de microorganismes. Ce n'est pas faux, mais loin d'être suffisant. L'explication est ailleurs, au cœur des vibrations des molécules d'eau.

Si le ciel est bleu, c'est que dans l'air, chaque molécule diffuse une infime partie de la lumière du Soleil qu'elle reçoit dans d'autres directions. Cependant, ce phénomène est d'autant plus important que

la longueur d'onde (la couleur) est courte: le bleu est ainsi plus diffusé que le rouge et domine. Ce processus a aussi lieu dans l'eau. Or celle-ci contient par mètre cube environ 1300 fois plus de molécules que l'air: on s'attendrait donc à une diffusion plus de 1000 fois plus importante en amplitude.

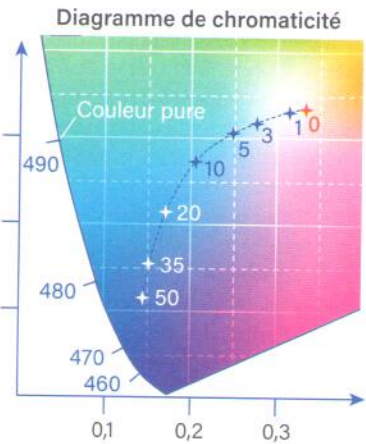
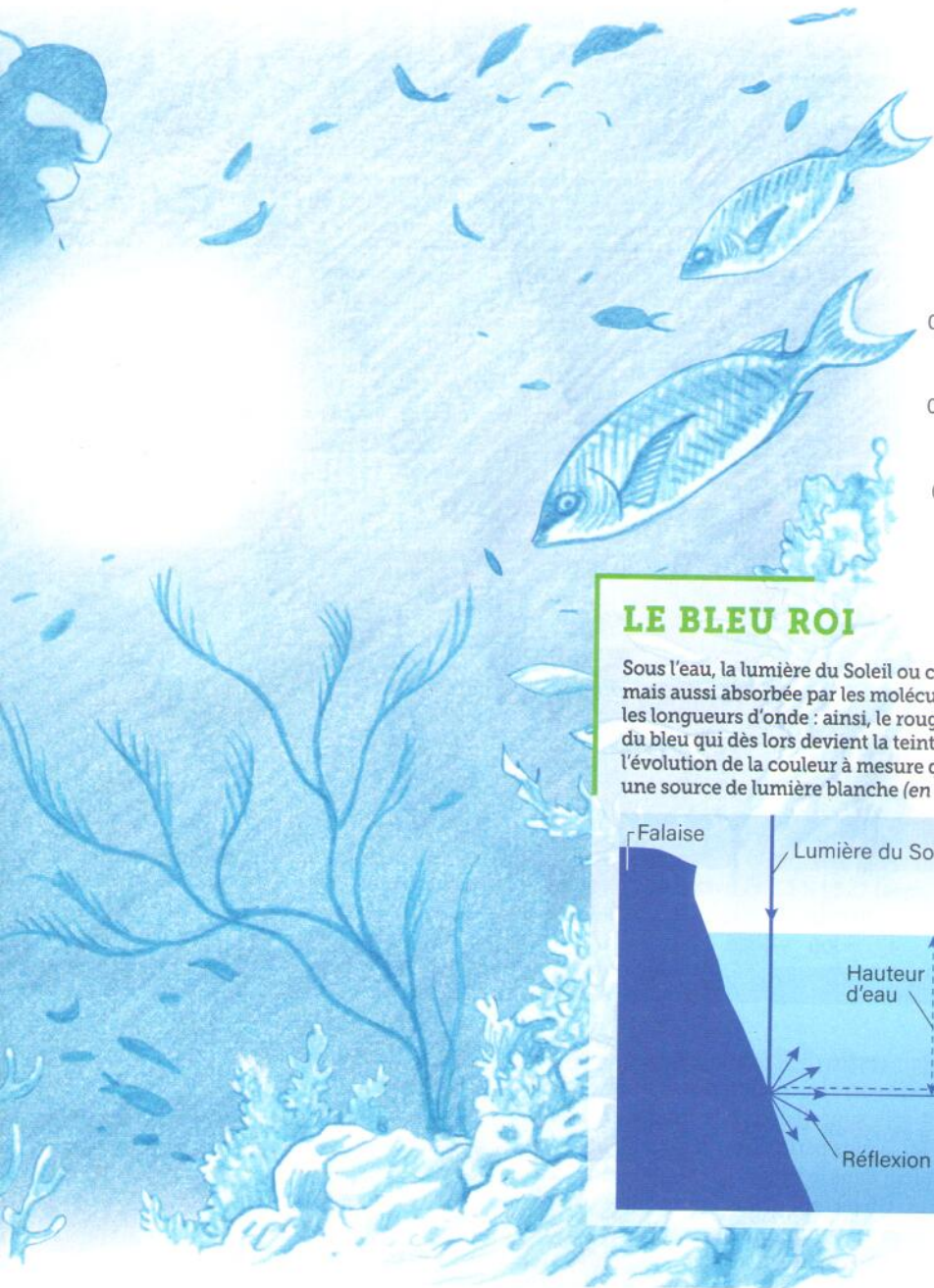
IL Y A LE CIEL, LE SOLEIL ET LA MER...

C'est compter sans le fait que la lumière diffusée par chacune des molécules interfère avec celle qui l'est par ses voisines. La diffusion est considérablement réduite sur les côtés lorsque de nombreuses molécules sont présentes dans un volume dont la taille est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière, ce qui

est le cas dans l'eau. L'important dans cette histoire n'est pas alors le nombre de molécules présentes dans ce petit volume, mais les fluctuations de ce nombre. Or celles-ci sont bien moins importantes dans un liquide que dans un gaz. En fin de compte, la diffusion contribue certes à la couleur bleue de l'eau, mais elle n'en est pas le facteur principal.

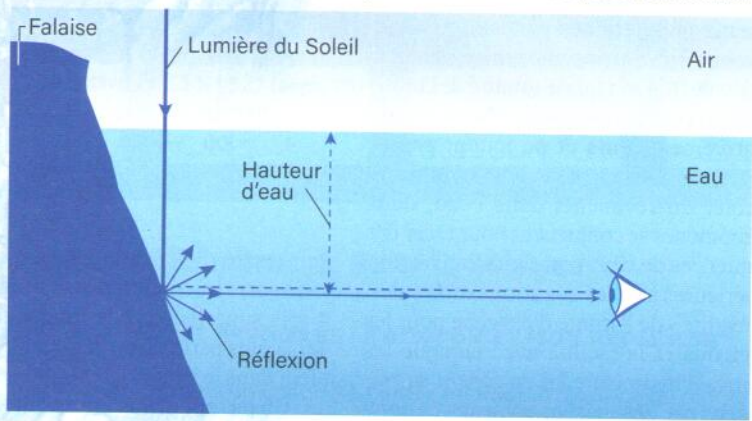
Pour mieux comprendre, plongeons avec masque et palmes dans une eau cristalline le long d'une falaise rocheuse. Près de la surface et de la paroi, disons à moins de 1 mètre, nous profitons pleinement des couleurs des poissons, des coraux et la roche a la même couleur sous l'eau qu'au-dessus. Mais quand nous nous éloignons, plongeons plus profondément ou regardons tout simplement la paroi

Le problème, et la beauté, de la mer, c'est qu'elle est bleue, car l'eau absorbe préférentiellement dans le rouge. Pour prendre des photos, on doit corriger ce phénomène avec un flash (de la lumière blanche) afin de redonner leurs couleurs aux poissons et aux coraux.



LE BLEU ROI

Sous l'eau, la lumière du Soleil ou celle réfléchiée par une falaise, est diffusée, mais aussi absorbée par les molécules d'eau. Ce phénomène varie selon les longueurs d'onde : ainsi, le rouge est rapidement absorbé, à l'inverse du bleu qui dès lors devient la teinte dominante. La figure ci-dessus montre l'évolution de la couleur à mesure que la distance parcourue sous l'eau entre une source de lumière blanche (en rouge) et l'observateur croît, de 1 à 50 mètres.



rocheuse plus loin, la lumière se fait moins vive, les couleurs s'estompent et bleuissent. Comment l'interpréter?

Avant d'atteindre notre œil, la lumière a depuis la surface traversé une certaine épaisseur d'eau et a été renvoyée par l'objet observé (voir la figure ci-dessus, à droite). S'il s'agissait d'un miroir, qui ne modifie en rien la lumière qu'il réfléchit, nous constaterions que seule l'eau est responsable du changement d'intensité et de teinte.

Dans les faits, l'eau absorbe la lumière : dans le jaune par exemple, l'intensité lumineuse est divisée par 2 pour un parcours de 7 mètres dans de l'eau pure. Sachant que la diminution suit une loi exponentielle avec la distance traversée, cette intensité baissera

de seulement 0,7% après un parcours de 7 centimètres, et d'un facteur 1 000 pour un parcours de 70 mètres. On comprend pourquoi l'eau de nos bouteilles d'eau minérale apparaît transparente : les distances en jeu sont insuffisantes pour une absorption décelable. Cela signifie que sous l'eau des objets vus de près ont la même apparence qu'à l'air libre. A contrario, plonger à des profondeurs au-delà de quelques mètres nécessite souvent de se munir d'une source de lumière pour prendre des photos (voir la figure en haut à droite) ou tout simplement voir son environnement quand on s'enfonce dans les abysses.

Le bleuissement observé résulte de l'absorption différente selon la longueur d'onde de la lumière, ce phénomène

augmentant à mesure que l'on passe du bleu au rouge. Ainsi, l'intensité d'un faisceau de lumière bleue (450 nanomètres, ou nm) est réduite d'un facteur 2 après 70 mètres alors que 70 cm suffisent pour la lumière rouge (720 nm). De la sorte, de la lumière blanche qui se propage dans de l'eau pure voit disparaître en premier sa composante rouge, puis la jaune... et se teinte progressivement en cyan, puis en bleu (voir la figure ci-dessus). On observe ce phénomène en regardant sous l'eau dans une piscine... à condition que ses

Les auteurs ont notamment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



parois soient blanches. Ce bleu dans lequel on a l'impression de baigner, c'est bien la couleur naturelle de l'eau!

Revenons à la diffusion évoquée plus haut. Elle a pour origine le mouvement des électrons des molécules et vaut pour toutes les longueurs d'onde, à l'inverse de l'absorption qui est un phénomène résonant: elle n'a lieu que si l'énergie des grains de lumière, les photons, coïncide avec l'écart entre deux niveaux d'énergie de la molécule. En d'autres termes, seules quelques longueurs d'onde bien précises sont absorbées. Avec des colorants par exemple, l'absorption de lumière visible correspond à des transitions entre des niveaux d'énergies électroniques de la molécule. Il en va autrement pour l'eau, dont les transitions électroniques à partir du niveau fondamental correspondent à de la lumière ultraviolette. En s'en tenant à ce seul effet, l'eau n'absorberait que les ultraviolets, et resterait transparente pour des yeux humains.

QUAND L'EAU VIBRE

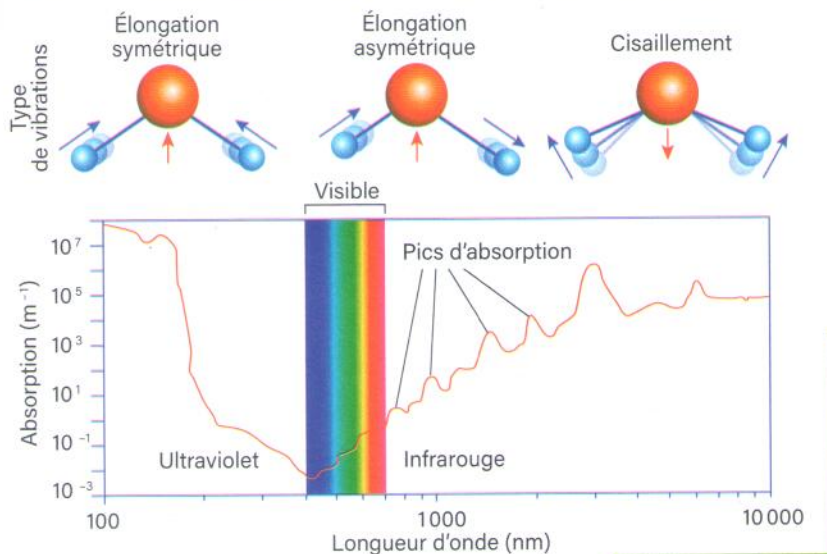
C'est qu'interviennent en plus ici des niveaux énergétiques particuliers associés aux vibrations mécaniques de la molécule. Dans la quasi-totalité des molécules, les mouvements de vibration sont relativement lents et ne jouent pas de rôle dans l'absorption de la lumière visible. En revanche, dans l'eau, deux phénomènes se conjuguent pour créer des fréquences de vibration significativement supérieures à celles des autres molécules. L'«avidité» de l'atome d'oxygène pour les électrons et la facilité avec laquelle les atomes d'hydrogène lui en cèdent se traduisent par des liaisons robustes et donc un «ressort équivalent» très rigide. Cette caractéristique, associée à la très faible masse de l'atome d'hydrogène, entraîne des fréquences de vibrations élevées, de même qu'un système masse-ressort vibre d'autant plus que le rapport entre la raideur et la masse est grand.

Dans le cas de l'eau, les divers modes de vibration (voir la figure ci-dessus) ont chacun un spectre en énergie avec des niveaux équidistants dont l'écart (et donc l'énergie des photons possiblement absorbés) correspond à de l'infrarouge moyen (vers 2 700 nm pour les modes de vibration de type élongation, 6 300 nm pour le cisaillement). Cela reste bien loin du visible, cantonné entre 400 et 700 nm!

Cependant, des photons peuvent être absorbés pour faire sauter la molécule d'eau vers un état vibrationnel plusieurs fois excité. Par exemple, si on part de l'état fondamental pour atteindre le quatrième

GOOD VIBRATIONS

La molécule d'eau vibre selon différents modes, par exemple les deux d'élongation (ci-dessous, à gauche) et celui de cisaillement (à droite). À ces vibrations mécaniques de la molécule sont associés des niveaux énergétiques particuliers qui peuvent être excités par l'absorption de photons: cela se traduit par des familles de pics d'absorption avec un fondamental dans l'infrarouge vers 2 700 nm pour les modes d'élongation et 6 300 nm pour le mode de cisaillement. Tous les niveaux vibrationnels peuvent être excités par l'absorption d'un seul photon, mais cette excitation est d'autant moins probable que le niveau est élevé: il en résulte une succession de pics d'absorption de moins en moins marqués de l'infrarouge moyen jusqu'au domaine du visible (en 400 et 700 nm). Finalement, le rouge est préférentiellement absorbé, laissant le bleu dominer et donner sa couleur à l'eau.



état excité d'élongation, l'énergie nécessaire entre les niveaux d'excitation devient 4 fois supérieure et la longueur d'onde 4 fois plus petite, c'est-à-dire 675 nm... en plein dans le rouge.

Un lecteur physicien, et retors, rétorquera qu'au cinquième état excité, la longueur d'onde n'est plus que de 540 nm c'est-à-dire du vert! C'est exact, mais plus le mode excité est élevé, plus la probabilité d'absorption d'un photon diminue. Aussi, dans le visible, les pics vibrationnels d'absorption pour l'eau les plus significatifs sont bien uniquement dans le rouge. Pour être quantitatif, il faut tenir compte de l'environnement de la molécule en phase liquide et notamment des liaisons hydrogènes avec ses voisines: l'absorption préférentielle dans le rouge de l'eau pure et liquide apparaît alors comme le bord d'une bande d'absorption autour de 760 nm. En fin de compte, l'eau est la seule molécule dont la couleur, difficile à appréhender, est reliée à ses vibrations. Vos questionnements sur la plage ont trouvé une réponse, et avec l'été qui s'achève, vous partirez à 100 000 lieues avec tellement de souvenirs... ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Vollmer et A. Mustard, **Blue : the color of (pure) water**, *Phys. Educ.*, 2019.

C. Braun et S. Smirnov, **Why the water is blue**, *J. of Chem. Educ.*, 1993.