

LES AUTEURS



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

ÉCOUTER LA LUMIÈRE

En faisant varier périodiquement la lumière éclairant un milieu matériel, on engendre l'émission d'ondes acoustiques. Découvert à la fin du XIX^e siècle, cet effet trouve des applications très modernes.

Éclairée par une lumière modulée en intensité, une simple lame de verre recouverte de noir de fumée peut émettre un son audible ! C'est l'effet photoacoustique, mis en évidence vers 1880 par l'ingénieur d'origine écossaise Alexander Graham Bell, l'inventeur le plus célèbre du téléphone : une partie de l'énergie lumineuse absorbée par l'échantillon illuminé y est convertie en énergie acoustique. Ce n'est pas qu'une curiosité de laboratoire. Depuis la fin des années 1970, avec le développement des microphones et de sources lumineuses accordables en fréquence, cet effet a suscité de multiples applications allant de la détection de gaz à l'état de traces à l'imagerie médicale à haute résolution.

Bell recherchait avec son « photophone » un moyen de transmettre la parole par voie aérienne. Il utilisait la lumière du soleil, dirigée par un miroir vers son dispositif expérimental. Dans ses expériences, l'intensité de cette lumière était modulée périodiquement à une fréquence acoustique (de l'ordre de 1000 hertz par exemple) par un ensemble de deux disques percés, dont l'un était mis en rotation par une pédale à pied, avant d'être focalisée, grâce à un miroir parabolique, sur un échantillon de matériau (voir l'illustration ci-dessus).

Lorsque les ouvertures des disques coïncidaient, la lumière les traversait et atteignait l'échantillon ; lorsqu'elles étaient décalées, le dispositif était opaque

et l'échantillon n'était plus éclairé. En ajoutant une espèce de stéthoscope à l'ensemble, on entendait des sons.

PAS DE SON SANS MODULATION

Avec Charles Sumner Tainter, Bell a expérimenté et testé ainsi de nombreuses substances. Première constatation : beaucoup émettent un son, dont la hauteur dépend de la fréquence de la modulation lumineuse, mais pas du matériau utilisé. Pas de modulation, pas de son. Seconde constatation : à éclairage égal, l'intensité sonore est plus élevée pour les matières colorées et noircies. C'est donc que l'absorption de la lumière est à l'origine de l'émission du son. De quelle façon ?

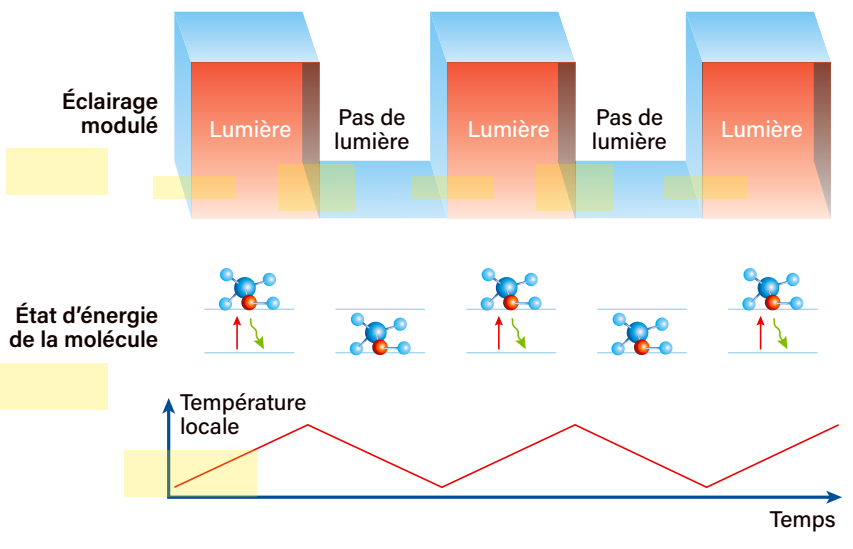


Dans cette expérience pionnière de Graham Bell, la lumière solaire est dirigée sur un couple de disques percés, dont l'un est mis en rotation par une pédale à pied. Lorsque les ouvertures des disques coïncident, la lumière passe et atteint un échantillon de matériau placé au foyer d'un miroir parabolique. Éclairé en alternance, le matériau émet un son de fréquence égale à celle de la modulation de l'éclairement.



L'EFFET PHOTOACOUSTIQUE

Supposons que l'on éclaire périodiquement un matériau à une fréquence correspondant à celle d'un son audible (entre 20 et 20 000 hertz). Lors des phases éclairées, une partie des molécules de la surface du matériau absorbent un photon et, de ce fait, passent dans un niveau d'énergie excité (flèche rouge). Ces molécules se dés excitent très vite (flèche verte) en cédant à leurs voisines leur énergie via les collisions avec elles. De ce fait, la surface s'échauffe et sa température monte. Lors des phases non éclairées, elle se refroidit. Ces variations de température se transmettent à la couche d'air en contact avec la surface. Cet air va alors se dilater et se contracter périodiquement, d'où des variations de pression qui engendrent une onde sonore de même fréquence que celle de l'éclairement. Dans les applications les plus intéressantes de l'effet photoacoustique, les variations de température (respectivement de pression) peuvent être extrêmement faibles, de l'ordre du microdegré au millidegré (respectivement du nanobar au microbar), ce qui pose des défis techniques.



Comme nous l'avons tous expérimenté, la lumière chauffe la surface des matériaux qui l'absorbent. Dans l'expérience de Bell, en l'absence de lumière, plus aucune chaleur n'est fournie au matériau, qui se refroidit donc. Dès que la lumière fait son retour, il s'échauffe de nouveau. Aussi, lorsque l'intensité de la lumière varie périodiquement à des fréquences acoustiques, il en est de même pour la température de la surface (voir l'encadré ci-dessus).

CYCLES DE TEMPÉRATURE ET DE PRESSION

L'oscillation de la température de surface fait aussi osciller la température de l'air au contact du matériau, sur une

épaisseur qui dépend de la période de la modulation. Cette couche d'air va donc périodiquement se dilater et se contracter au gré des variations de sa température et jouer le même rôle, pour l'air environnant, que les vibrations de la membrane d'un haut-parleur. Les variations de pression de cette couche d'air engendrent ainsi une onde acoustique que notre oreille ou un microphone pourront détecter.

L'un des intérêts de la photoacoustique, c'est que l'absorption de lumière n'est pas réservée aux surfaces noircies, car les molécules peuvent individuellement absorber des photons. Une molécule qui absorbe un photon passe dans un état excité, de plus haute énergie que son

état fondamental. Les états énergétiques accessibles correspondent à un changement de la configuration électronique de la molécule, de son état de vibration ou de son état de rotation. En l'absence de phénomènes de luminescence (dés excitation par émission d'un photon), ce qui est la situation la plus courante, la molécule revient très vite (en un temps de l'ordre du milliardième de seconde) dans son état fondamental par dissipation dans le milieu de l'énergie absorbée,

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



dissipation qui se fait au travers des collisions avec les molécules voisines.

Autrement dit, un échauffement local se produit autour des molécules ayant absorbé de la lumière, que celles-ci se trouvent dans un milieu gazeux, liquide ou solide. Au lieu d'advenir uniquement en surface, l'échauffement dans un gaz ou dans un milieu transparent se produit en volume, et est proportionnel à la concentration de molécules qui absorbent la lumière. Le résultat est toujours une émission de son si la lumière est modulée.

SPECTROSCOPIE ET IMAGERIE PHOTOACOUSTIQUES

Un autre intérêt de ce processus est sa sélectivité. Comme il implique une transition entre deux niveaux moléculaires d'énergie, il suffit de choisir la bonne fréquence lumineuse pour exciter préférentiellement certaines molécules. C'est particulièrement utile dans la détection de gaz à l'état de traces. Par exemple, de nombreux gaz polluants ou composés organiques volatils absorbent à certaines longueurs d'onde comprises entre 1 et 10 micromètres (dans l'infrarouge). L'amplitude de la réponse acoustique étant proportionnelle à la concentration du gaz sondé, on peut remonter à la valeur de cette dernière, indépendamment des conditions de température, de pression, de présence d'autres composés, etc.

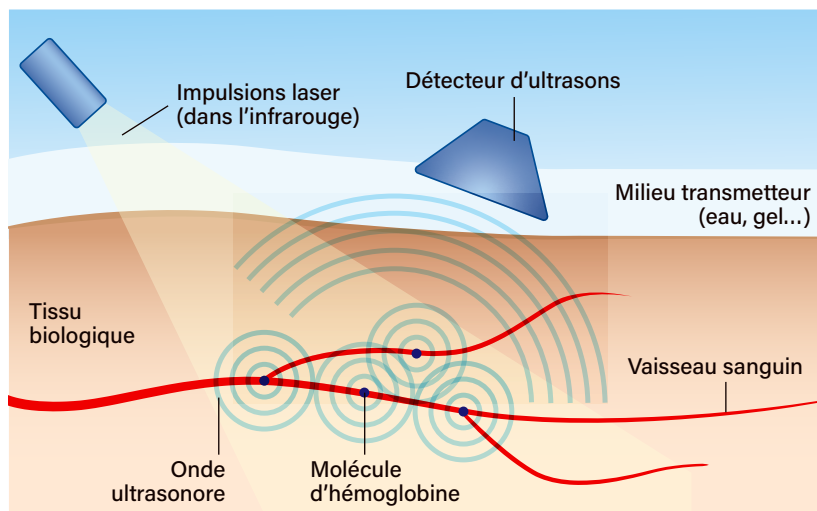
Les meilleurs dispositifs permettent ainsi de détecter dans l'air des concentrations d'éthylène ou d'hydrogène sulfuré inférieures à une partie par million. Dans le souci actuel de mieux vérifier la qualité de la ventilation, on trouve aussi désormais des détecteurs photoacoustiques de gaz carbonique. Par ailleurs, avec une source lumineuse accordable, il est possible de sonder plusieurs gaz à la fois en faisant varier la fréquence lumineuse.

Enfin, on peut inverser la démarche et étudier le spectre d'absorption lumineux d'un matériau en enregistrant sa réponse acoustique. C'est particulièrement judicieux lorsque le matériau absorbe très peu : le son qu'il émet est proportionnel à la quantité d'énergie lumineuse absorbée. Sa mesure se fait par rapport à une référence «sourde» (l'équivalent acoustique d'un fond noir), indépendamment de l'énergie lumineuse restante.

On retrouve ces avantages et d'autres encore dans un domaine très différent, celui de l'imagerie médicale (voir l'encadré ci-dessus). En effet, de nombreuses

IMAGERIE PHOTOACOUSTIQUE

L'effet photoacoustique a des applications en imagerie médicale. Si par exemple la longueur d'onde lumineuse est choisie de façon à correspondre à l'excitation des molécules d'hémoglobine, on peut visualiser les vaisseaux sanguins. Une source laser émet des impulsions lumineuses à une certaine fréquence f . En absorbant des photons et en se dés excitant, les molécules d'hémoglobine (ici quatre sont pointées) échauffent leur environnement immédiat lors des phases éclairées, d'où une alternance de dilatations et de compressions qui engendre l'émission d'ondes acoustiques de fréquence f . Ces ondes, qui se propagent sans déformation dans les tissus mous, sont enregistrées par des capteurs acoustiques. L'analyse des signaux permet alors de construire une image.



molécules naturellement présentes dans le corps humain ont une réponse photoacoustique forte, ce qui évite l'injection des «agents de contraste» utilisés dans d'autres techniques d'imagerie. C'est, par exemple, le cas de l'hémoglobine ; on obtient ainsi, avec la photoacoustique, des «images» de bonne résolution de la vascularisation sanguine, ce qui faciliterait le diagnostic précoce de certaines tumeurs (qui s'accompagnent de la création de nouveaux vaisseaux sanguins).

L'excellente qualité de ces images tient aussi au fait que les tissus mous du corps diffusent très peu les ondes acoustiques, contrairement au cas des ondes lumineuses. Grâce à cette transparence, les ondes acoustiques émises par les zones qui absorbent la lumière se propagent dans toutes les directions sans être déformées. En disposant un réseau de capteurs qui recueillent ces ondes à différents instants, il est possible de remonter à l'origine de l'émission de ces ondes et de reconstruire ensuite les images tridimensionnelles correspondantes : tel est le principe de la tomographie photoacoustique. Une bien belle descendance pour le photophone, invention que Bell tenait pour plus importante encore que le téléphone... ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Vilov *et al.*, **Imagerie photoacoustique biomédicale**, *Photoniques*, n° 94, pp. 24-29, 2018.

M. Duquesnoy *et al.*, **Détection de gaz par spectroscopie photoacoustique : principe et mise en œuvre**, *Photoniques*, n° 94, pp. 38-44, 2018.

A. C. Tam, **Applications of photoacoustic sensing techniques**, *Reviews of Modern Physics*, vol. 58(2), pp. 381-431, 1986.