

# L'opacité ne sera bientôt plus ce qu'elle était ?

Sylvain Gigan

Professeur  
Université Pierre et Marie Curie - Laboratoire Kastler Brossel

## La diffusion de la lumière

Le Soleil nous éblouit lorsque nous le regardons en pleine journée, un jour de beau temps. Ses rayons, directs, découpent la forme des objets, et projettent leur ombre au sol. En dehors de la direction du Soleil, il n'y a pas de lumière venant du cosmos, ou plutôt celle des étoiles est beaucoup trop faible comparativement à celle du Soleil. Le ciel du jour devrait donc être noir comme de l'encre, pourtant nous savons bien qu'il est lumineux, de couleur bleue. La raison est connue : les particules composant l'atmosphère rediffusent vers nous la lumière du Soleil, plus efficacement dans le bas du spectre visible, le bleu.



Nuages, illustration des différents régimes de diffusion :  
ballistique (soleil), diffusion simple (ciel bleu), diffusion multiple (nuages).

Un jour de nuage, par contre, non seulement le Soleil ne nous éblouit pas, mais sauf si la couche de nuage est fine, nous sommes bien en peine de le situer. La luminosité est bien là, seulement un peu moins intense, mais la lumière semble venir de partout, et du coup ne projette pas d'ombre nette. Imaginons maintenant que de sombres nuages menaçants s'avancent. Sont-ils noirs car absorbants ? Non. Ils sont noirs car épais et denses et la lumière du soleil peine à les traverser.

Les phénomènes que nous observons ainsi en levant les yeux vers le ciel, c'est le résultat de la diffusion de la lumière, phénomène quasi-omniprésent dès que la lumière se propage dans un milieu hétérogène. La lumière du soleil qui nous éblouit, c'est la lumière non-diffusée, ou lumière balistique. Le bleu du ciel, c'est la diffusion simple, où la lumière est diffusée une fois seulement avant qu'elle atteigne nos yeux. Enfin, dans les nuages, les gouttelettes d'eau en suspension sont présentes avec une densité telle que la lumière est diffusée de goutte en goutte de très nombreuses fois avant de traverser le nuage, donnant lieu au phénomène de diffusion multiple : elle perd totalement la mémoire de sa direction d'origine. On retrouve la diffusion dans de nombreuses situations, que ce soit dans un verre de lait, la neige, de la peinture sur un mur, le papier sur lequel vous lisez ce texte : tout matériau d'aspect mat et blanc est un matériau diffusant pour la lumière.

## **La lumière est un outil irremplaçable pour l'imagerie**

Les microscopes, maintenant partout, permettent d'imager\* à l'échelle de la longueur d'onde (le micron), voire très en dessous (comme l'a couronné le prix Nobel de chimie 2014). Cette échelle est critique car elle donne accès en biologie à la résolution subcellulaire, les cellules ayant une taille de l'ordre de dix microns. Outre l'information structurelle, comme la forme des cellules ou du noyau, qui permettent par exemple de distinguer une cellule tumorale bénigne d'une cellule maligne, on peut utiliser des marqueurs permettant de révéler un large spectre d'informations : depuis la présence d'une protéine, l'expression d'un gène, l'activation d'un neurone. Malgré tout, les tissus biologiques sont également des milieux diffusants pour la lumière : ils sont hétérogènes à toutes les échelles, depuis les protéines, le noyau, au cellules, jusqu'aux organes. La diffusion reste une difficulté majeure pour l'imagerie : toutes ces techniques restent limitées à l'imagerie d'échantillons très fins (par exemple une tranche de quelques microns placée sur une lame de microscope), ou à la surface des échantillons.

---

\* Imager : obtenir ou former une image



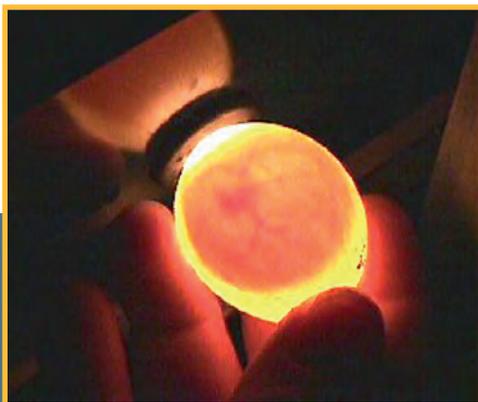
Illustration de la diffusion de la lumière dans les tissus biologiques : extrait du tableau *Saint Joseph charpentier*, peint en 1643 par le Lorrain Georges de La Tour. Observez la lumière de la bougie à travers la main de l'enfant. On ne voit pas la bougie, mais on voit sa lumière qui traverse la main.

Musée du Louvre de Lens © 2008 RMN / Jean-Gilles Berizzi

Pénétrer en profondeur dans un tissu reste un défi majeur pour l'imagerie optique, et un champ de recherche extrêmement actif. Peut-on vaincre la diffusion ? Rendre *transparent* un milieu opaque ? La mettre à profit pour améliorer la résolution ?

Un nouveau champ de recherche, pour répondre à ces questions, a émergé ces dernières années.

Effet de la diffusion de la lumière : le mirage des œufs, on éclaire un œuf par l'arrière avec une source lumineuse intense, afin de déterminer si l'œuf est fécondé et à quel stade de développement il se trouve.



© École de Verny, J. Moreau

## Optique adaptative et contrôle de front d'onde

Pour vaincre la diffusion, la communauté scientifique s'est inspirée de concepts et d'outils développés pour l'astronomie. Dans l'observation céleste depuis les télescopes terrestres, on a tout d'abord augmenté la qualité et le diamètre des télescopes afin d'améliorer la résolution et la quantité de signal collecté venant du ciel. C'est ainsi que Galilée a découvert les satellites de Jupiter. Cependant, les meilleurs télescopes d'aujourd'hui sont limités par les perturbations, même minimes, dues à la traversée par la lumière dans les ultimes kilomètres de l'atmosphère. Ces perturbations sont dues à la turbulence de l'air, similaire à ce que l'on peut observer lors d'une journée chaude en observant une route goudronnée chauffée par le soleil. L'optique adaptative, consistant à mesurer ces perturbations et à utiliser un miroir déformable pour les corriger en temps réel, équipe maintenant tous les nouveaux télescopes et a permis depuis vingt ans d'améliorer significativement la qualité des observations astronomiques, en imageant les étoiles avec une résolution donnée par la limite de diffraction permise par l'instrument.

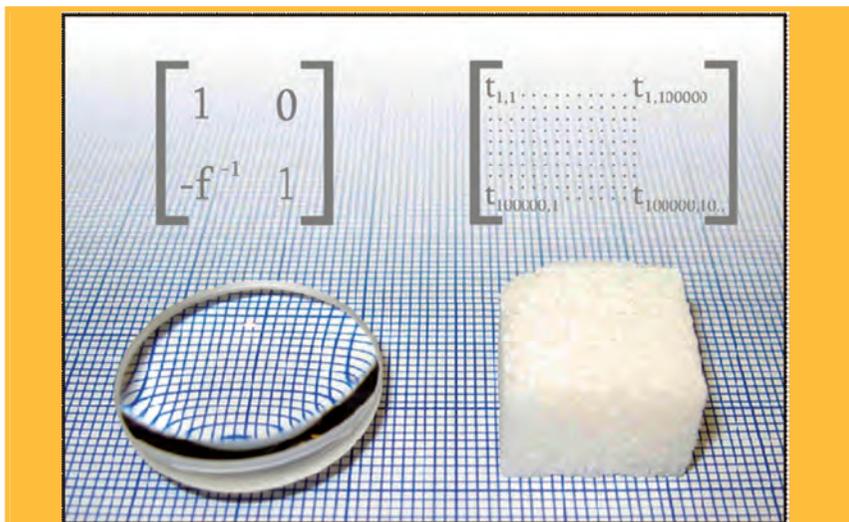


Effet de la turbulence de l'air : une tuyère souffle de l'air chaud qui brouille l'image de l'avion.

© Creative Commons, Mean as custard

Si on peut ainsi dynamiquement corriger les faibles perturbations dues à la turbulence, peut-on étendre cette idée à la diffusion ? Après tout, le phénomène est le même (des inhomogénéités du milieu de propagation), dans des régimes extrêmement différents. Cette idée peut paraître folle, quand on pense à la complexité du processus de diffusion.

Cependant, on dispose maintenant d'outils exceptionnels qui ont rendu cette prouesse possible : les modulateurs spatiaux de lumière. Ces dispositifs permettent, tout comme un miroir déformable, de contrôler spatialement une onde lumineuse, mais avec un nombre de pixels pouvant atteindre plusieurs millions (au lieu de quelques dizaines en astronomie), rendant ainsi possible de s'attaquer à un phénomène aussi complexe que la diffusion. Technologiquement, ils sont les cousins de produits grands publics que nous connaissons tous : écrans LCD, vidéoprojecteurs, afficheurs divers.,

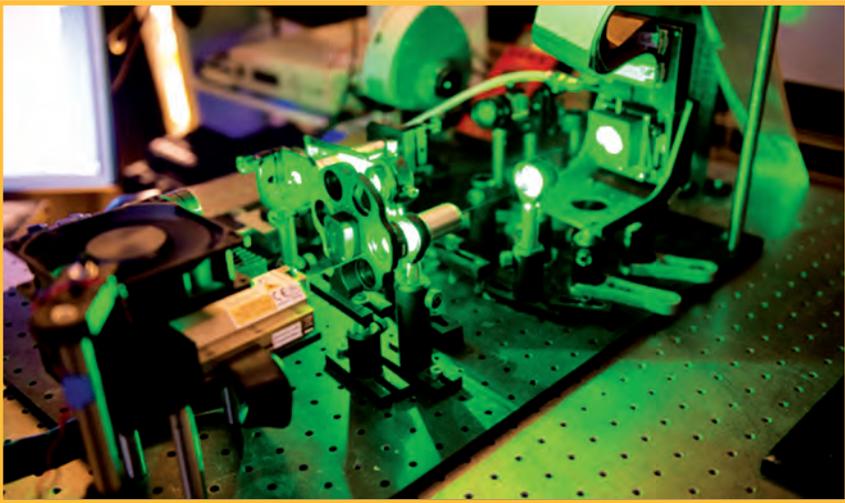


Un milieu diffusant, même très complexe, reste linéaire et déterministe, tout comme une lentille. Si on connaît sa *matrice de transmission*, on peut focaliser la lumière ou imager à travers lui.

© American Physical Society

## Imager en profondeur dans les milieux diffusants

Grâce à ces nouveaux outils, il a ainsi été montré qu'on pouvait focaliser ou imager à travers et dans les milieux complexes, en particulier en apprenant puis en exploitant la *matrice de transmission*, c'est-à-dire la fonction, très complexe, qui décrit la propagation de la lumière à l'échelle de la longueur d'onde, à travers un milieu linéaire, aussi complexe soit-il. Ce processus d'apprentissage, long, consiste à *interroger* le milieu à l'aide d'un modulateur spatial de lumière, et à enregistrer sa réponse à chaque excitation à l'aide d'une caméra. Une fois cette matrice connue, on peut à volonté concentrer la lumière à la limite de diffraction, ou retrouver l'image d'un objet, tant que le milieu complexe n'a pas bougé.



Expérience au Laboratoire Kastler-Brossel visant à pénétrer des milieux complexes.

© CNRS

Pour l'instant, les recherches en laboratoire se concentrent sur des milieux certes très diffusants, mais stationnaires, comme par exemple une fine couche de peinture blanche. Le brouillard ou les nuages restent encore hors de portée de ces techniques, car ils évoluent bien plus vite que les modulateurs spatiaux actuels : quelques microsecondes contre quelques dizaines de millisecondes à une fraction de milliseconde.

Néanmoins, focaliser ou imager à travers un milieu biologique, qui évolue plutôt à l'échelle de la fraction de seconde, reste envisageable. Mais de nombreuses questions pratiques ou fondamentales restent ouvertes. Cependant, ces concepts sont une révolution prévisible pour l'imagerie biologique.

La diffusion de la lumière dans les tissus reste une barrière opaque, mais pour combien de temps encore ?

**S. G.**