

subtil de piéger la lumière

Peut-on empêcher la lumière de se propager... mais sans pour autant l'absorber, c'est-à-dire sans placer, par exemple, un écran noir sur son trajet? La question a de quoi de surprendre. Elle semble ne pas avoir de sens puisque dès qu'une onde lumineuse est émise, et tant qu'elle n'est pas absorbée, on voit mal ce qu'elle pourrait faire d'autre que se propager. Une intéressante conjecture théorique prédit cependant l'existence d'un régime où la lumière serait localisée, c'est-à-dire ne pourrait plus se propager. Plusieurs équipes de physiciens cherchent actuellement à l'observer.

Un cas extrême.

Cette localisation de la lumière se produirait dans le cas extrême (et jusqu'à présent jamais atteint) d'un milieu très diffuseur. Nous verrons qu'il existe un critère, appelé critère de Ioffe et Regel, pour définir quantitativement ce qu'on entend par là. En pratique, on ne connaît pas encore de milieu optique où ce critère se trouve vérifié. Mais en théorie, il est possible qu'une lumière émise à l'intérieur d'un tel milieu y soit comme piégée ou engloutie. L'énergie lumineuse se retrouverait alors provisoirement stockée, de façon concurrente à tout mécanisme conventionnel d'absorption ou de dissipation.

Phénomène encore hypothétique et qualitativement nouveau, la localisation de la lumière est un processus d'autant plus difficile à imaginer qu'on n'en connaît que partiellement le scénario théorique. Pour l'instant, seul un effet précurseur de ce phénomène a pu être clairement démontré^(1,2), notamment dans une série d'expériences que nous avons réalisées⁽³⁾ à Grenoble (fig. 1). La mise en évidence de la véritable localisation, par la découverte d'un milieu très diffuseur où serait vérifié le critère de Ioffe et Regel, reste un défi formulé sans ambiguïté pour les expérimentateurs, défi que plusieurs équipes s'emploient déjà à relever, comme en témoignent les travaux publiés ces derniers mois^(4,5,6,7).

Au plan fondamental, l'enjeu de toutes ces recherches est important puisque la localisation optique est un cas particulier d'un phénomène plus général, appelé localisation par le désordre, ou localisation d'Anderson, qu'on s'attend à observer avec n'importe quel type d'onde classique ou quantique : électromagnétique, acoustique, mécanique, hydrodynamique, ou encore électrons (considérés d'un point de vue quantique sous leur aspect ondulatoire). Les recherches actuelles sont éga-

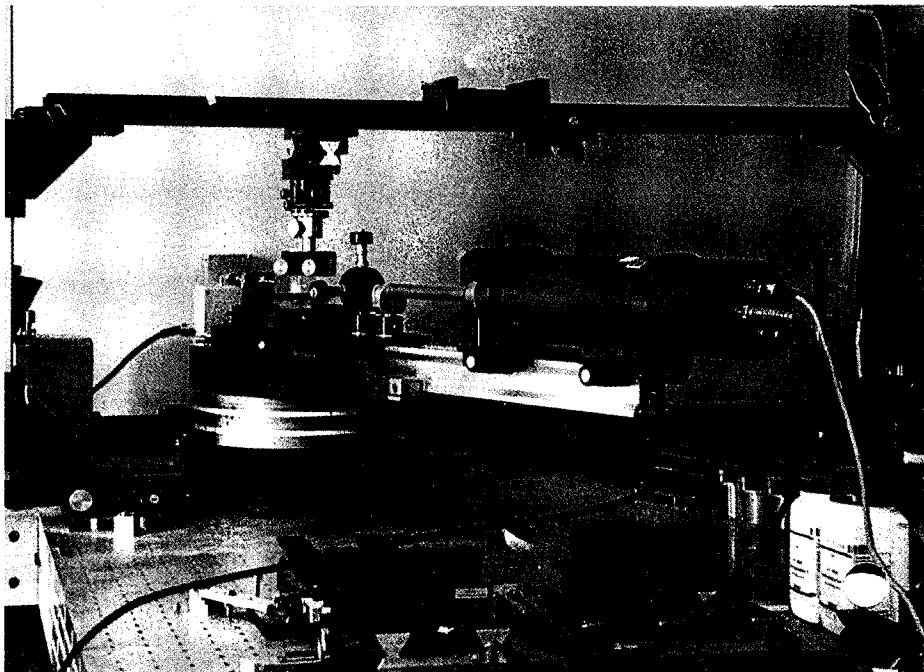


Figure 1. La diffusion multiple de la lumière, dans un milieu très diffuseur, a permis d'observer l'ultime phénomène d'interférence pouvant subsister dans un milieu désordonné, la rétrodiffusion cohérente. Ce phénomène a été observé dans une expérience réalisée à Grenoble par P.E. Wolf, du centre de recherches sur les très basses températures, et G. Maret, du laboratoire des champs magnétiques intenses (laboratoire commun CNRS-Max Planck Gesellschaft). Elle consiste à éclairer avec un faisceau laser une suspension de petites billes de polystyrène (petite tache blanche, en arrière-plan). Un miroir est intercalé entre la suspension et le détecteur (à droite, premier plan). Il sert à diriger le faisceau laser sur l'échantillon. En faisant tourner le détecteur, autour du porte-échantillon, on peut enregistrer l'intensité lumineuse diffusée par la suspension, au voisinage de la direction exacte de rétrodiffusion. Le renforcement de l'intensité rétrodiffusée est la signature de l'effet recherché. Au plan conceptuel, il s'agit là d'un effet important dans la mesure où il fait intervenir l'une des symétries les plus fondamentales en physique, l'invariance par « renversement du temps », et constitue un effet précurseur d'un phénomène activement recherché à l'heure actuelle : la localisation de la lumière. (Cliché auteurs)

lement intéressantes à suivre dans la mesure où l'on ne dispose que d'une théorie phénoménologique de la localisation et qu'il reste à en trouver une explication simple, profonde et complète. En un mot, c'est toujours un problème ouvert.

Etude incomplète.

Le concept de localisation n'est cependant pas nouveau puisqu'il a été introduit par P.W. Anderson⁽⁸⁾ dès 1958 et développé par N.F. Mott⁽⁹⁾ dans les années 1960. A l'origine, il s'agissait d'expliquer pourquoi et surtout comment un métal, normalement conducteur, peut devenir isolant. Un métal, comme le cuivre par exemple, est avant tout un cristal où les électrons sont « délocalisés ». c'est-à-dire pratiquement libres de se déplacer à travers le réseau cristallin. Cette mobilité explique pourquoi un métal est bon conducteur d'électricité. L'idée d'Anderson est que, dans un matériau présentant un désordre spatial suffisant, les états électroniques sont spatialement localisés et non plus délocalisés comme c'est le cas dans un système parfaitement ordonné ou faiblement désordonné.

Une description très originale du phénomène, a été formulée en 1979 par E. Abrahams, P.W. Anderson, D.C. Licciardello et T.V. Ramakrishnan⁽¹⁰⁾. Elle

repose sur une analyse des phénomènes de transport, comme la propagation des électrons, suivant une méthode de changement d'échelle. Cela consiste à examiner comment varient ces phénomènes quand on change l'échelle à laquelle ils se déroulent. Cette analyse a conduit ces derniers auteurs à proposer des lois d'échelles auxquelles obéiraient les coefficients de transport, comme la conductance électrique, et à en déduire un certain nombre de prédictions remarquables (voir « Quand une couche métallique devient isolante » dans notre numéro d'avril 1980). Certaines de ces prédictions ont été effectivement confirmées de façon indiscutable⁽¹¹⁾. Mais jusqu'à ce jour, l'étude complète de la localisation induite par le désordre est restée très difficile à mener dans les systèmes métalliques, en raison des interactions électromagnétiques qui s'exercent entre les électrons et dont il faut également tenir compte. C'est ainsi qu'il s'est avéré impossible d'observer intégralement la transition dite de localisation, qui rend un métal isolant sous l'effet du désordre et se traduirait ultimement par une conductance électrique nulle.

Pour s'affranchir de ces difficultés, S. John⁽¹²⁾ en 1984 et P.W. Anderson⁽¹³⁾ en 1985 ont proposé d'étendre le concept de localisation par le désordre au cas de la

lumière se propageant dans un milieu diffuseur. En effet, les photons n'ayant pas d'interaction mutuelle, contrairement aux électrons dans un métal, la localisation de la lumière serait un phénomène *a priori* plus simple. Leur proposition n'a cependant pas eu d'écho expérimental immédiat, peut-être parce que paraissant trop difficilement réalisable. L'affaire en serait donc peut-être restée là si, par ailleurs, Golubentsev⁽¹⁴⁾ en Union soviétique et deux d'entre nous⁽¹⁵⁾ n'avions suggéré de mesurer un phénomène précurseur de la localisation plus accessible à l'expérience : la rétrodiffusion cohérente de la lumière. Ce phénomène précurseur est parfois appelé « localisation faible » de la lumière, dans la mesure où on l'observe dans des milieux déjà très diffuseurs mais pas encore assez pour donner lieu à la « localisation forte » ou localisation d'Anderson. Pour comprendre ce que sont ces milieux, pourquoi ils sont difficiles à trouver, il est maintenant nécessaire d'en dire plus sur la diffusion de la lumière. C'est le cœur du problème.

**Bleu comme le ciel,
blanc comme le lait.**

En l'absence de toute diffusion, c'est-à-dire dans le vide, la propagation de la lumière est un phénomène simple, décrit par les équations de Maxwell. Mais dans un gaz peu dense, comme la haute atmosphère, cette propagation est perturbée par la présence de molécules, gouttelettes d'eau, aérosols, qui diffusent la lumière. Le terme « diffusion » décrit ici la situation où une onde plane progresse vers un centre diffuseur comme une vague vers un écueil. Celui-ci perturbe la propagation de l'onde et émet des ondelettes sphériques, sans changement de la longueur d'onde dans l'espace (diffusion élastique). Au siècle dernier, Lord Rayleigh a montré que, dans le cas des ondes lumineuses se propageant dans le ciel, cette diffusion variait considérablement avec la longueur d'onde λ : suivant une loi en $1/\lambda^4$. Les composantes de courte longueur d'onde, comme le bleu, sont ainsi beaucoup plus diffusées que le jaune ou le rouge. Et c'est la raison pour laquelle le ciel apparaît bleu dans toute autre direction que celle du Soleil.

Mais la diffusion Rayleigh ne permet pas d'expliquer la propagation de la lumière dans une atmosphère brumeuse ou bien dans le lait, c'est-à-dire dans un milieu plus dense où l'onde lumineuse subit des diffusions successives. De façon générale, on caractérise le pouvoir diffuseur d'un tel milieu par son libre parcours moyen l , qui est la distance moyenne entre deux diffusions successives subies par l'onde lumineuse. Lorsque les dimensions du milieu sont beaucoup plus grandes que cette distance, chaque onde secondaire émise par un centre diffuseur est diffusée à son tour par le milieu et ainsi de suite. La description de la propagation de la lumière dans une telle situa-

tion de *diffusion multiple* est un problème complexe car l'onde émergente dans une direction donnée est la superposition des ondelettes correspondant à toutes les différentes séquences possibles de diffusion multiple. Comment calculer en particulier l'effet des interférences entre toutes ces ondelettes ? Dès le début du siècle, Schuster puis Schwarzhild ont proposé un modèle simple pour décrire le transport de l'intensité lumineuse dans ce cas. Ce modèle apparente le trajet lumineux à un mouvement de marche au hasard, au sein d'un ensemble de centres diffuseurs désordonnés dans l'espace. Il repose sur l'hypothèse que — par suite du désordre — les interférences constructives et destructives entre les ondelettes se compensent. Dans ce cas, l'intensité diffusée par le milieu — principalement vers l'arrière, si ce dernier est assez épais — doit varier lentement avec l'angle d'observation. C'est bien ce qu'on observe avec les nuages, constitués de gouttelettes d'eau dont la taille est de l'ordre du micron, ou encore mieux avec le lait. Mais récemment, plusieurs ex-

periences ont montré que, sous certaines conditions, cette analyse peut être mise en défaut. diffusion cohérente. Elles interfèrent de façon constructive et leurs amplitudes s'ajoutent directement, donnant une contribution à l'intensité lumineuse double de celle prévue par la théorie classique. Dans toutes les autres directions, l'angle entre l'onde incidente et l'onde émergente introduit un déphasage entre les deux modes de cheminement (fig. 2). Il en résulte que l'interférence ne reste constructive qu'à l'intérieur d'un cône d'ouverture angulaire λ/l , où λ est la longueur d'onde de la lumière et l son libre parcours moyen dans le milieu diffuseur. En dehors, on retrouve le cas décrit par Schuster et Schwarzhild. Si le cône est trop étroit, le renforcement d'intensité dû à la rétrodiffusion cohérente est inobservable en pratique.

Cette sensibilité de la rétrodiffusion cohérente au libre parcours moyen explique pourquoi ce phénomène, bien que très général, n'a pu être observé avec certitude que dans des expériences réalisées ces trois dernières années. Il fallait disposer d'un milieu suffisamment diffu-

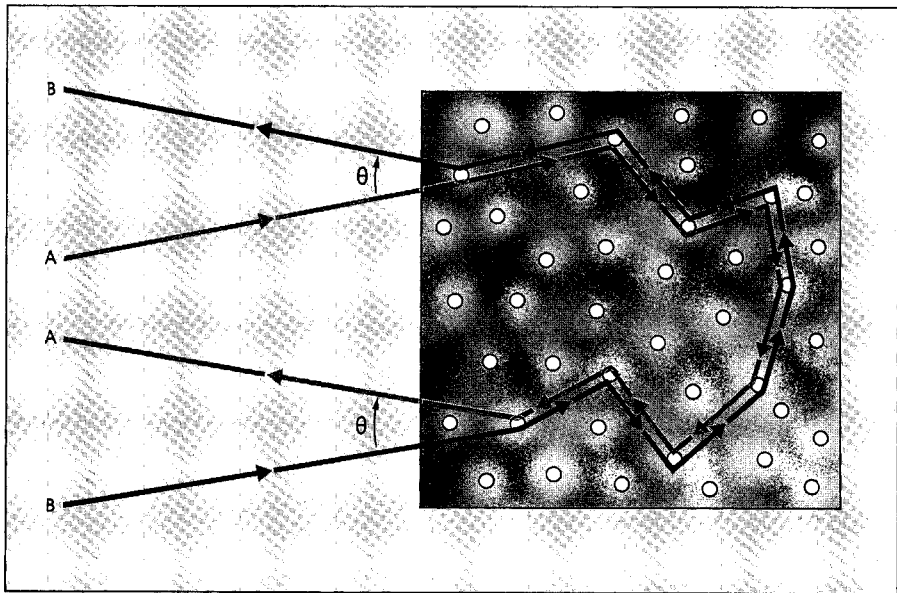


Figure 2. La diffusion de la lumière dans une suspension de petites billes de polystyrène donne naissance à de multiples ondelettes dont le trajet s'apparente à une marche au hasard. Les ondelettes A et B sont dites « renversées dans le temps », c'est-à-dire diffusées par les mêmes billes mais dans un sens opposé. Pour un angle θ nul, ces deux ondelettes sont toujours en phase et interfèrent, quel que soit le désordre du milieu.

périences ont montré que, sous certaines conditions, cette analyse peut être mise en défaut.

Ultime Interférence...

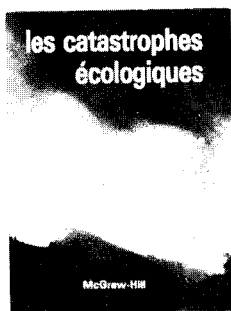
Contrairement à ce que suppose la théorie classique, une séquence donnée de diffusion multiple est en effet toujours corrélée avec sa séquence dite conjuguée, ou « renversée dans le temps », où l'onde est diffusée par les mêmes centres diffuseurs, mais dans un ordre exactement inverse. Dans la direction exactement opposée à celle du faisceau incident, dite de rétrodiffusion, les ondes diffusées suivant les deux types de cheminement sont en phase — d'où le terme de rétro-

seur, c'est-à-dire un milieu où le libre parcours moyen de la lumière soit suffisamment petit. A Grenoble, par exemple, nous avons initialement utilisé des suspensions concentrées de petites billes de polystyrène dont le diamètre — bien calibré — est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière incidente : une fraction de micron. En éclairant de telles suspensions avec un faisceau laser, nous avons ainsi pu confirmer l'existence de la rétrodiffusion cohérente. En soi, ce phénomène est conceptuellement intéressant puisqu'il s'agit de l'ultime effet d'interférence qui subsiste dans un milieu sans aucun ordre spatial : cette interférence reflète l'invariance par renversement du

McGRAW-HILL

FRANÇOIS RAMADE

les catastrophes écologiques

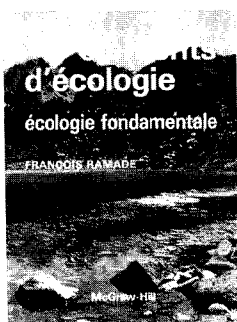


175 F

1987, 328 p., 137 fig.
50 tabl.

- l'explosion démographique
- les catastrophes géophysiques
- la déforestation et ses conséquences
- la désertification
- les pollutions globales
- l'ultime catastrophe : la menace nucléaire

éléments d'écologie écologie fondamentale



220 F

2^e tirage 1987, 410 p.
255 fig., 56 tabl.,
33 planches.



McGRAW-HILL
28, rue Beaunier
75014 Paris
Tél : 45.40.94.38

sens du temps, l'une des symétries les plus fondamentales en physique. Mais l'intérêt de la rétrodiffusion cohérente ne s'arrête pas là. D'une part, nous avons en effet montré que l'étude de la forme⁽⁶⁾ du pic d'intensité pourrait servir à caractériser les milieux très diffuseurs et très hétérogènes. D'autre part, sa mise en évidence a constitué une étape importante car elle a encouragé de nombreuses équipes à se lancer à la recherche de la localisation forte de la lumière.

... Et après ?

Que devient en effet la lumière dans un milieu encore plus diffuseur ? En d'autres termes, comment décrire la lumière dans un milieu où son libre parcours moyen est nettement inférieur à sa longueur d'onde ? C'est là un problème qui échappe à toute tentative d'analyse classique parce que les effets d'interférence négligés dans cette analyse deviennent complètement dominants. Mais une approche qui reste possible est celle consistant à décrire le transport de l'intensité lumineuse en termes de lois d'échelle — comme le transport de l'électricité dans les métaux impurs ou désordonnés. Ces lois d'échelles indiquent alors que, pour un milieu suffisamment diffuseur, le coefficient de transmission de la lumière doit décroître exponentiellement en fonction des dimensions du milieu — c'est le comportement analogue à celui attendu pour la conductance électrique dans le cas des métaux. Ce régime de localisation surviendrait au-delà d'une valeur critique du rapport λ/l qui, suivant le critère établi en 1960 par A.F. Ioffe et A.R. Regel⁽⁷⁾, serait est de l'ordre de 2π . Que signifie un tel changement de régime ?

Dans le cas d'une source lumineuse extérieure au milieu, nous avons vu que l'effet de rétrodiffusion cohérente renforce l'intensité rétrodiffusée dans un cône de largeur λ/l . A l'intérieur du milieu, on peut dire que le même effet renforce la probabilité qu'a l'onde diffusée de revenir en arrière et donc diminue sa probabilité de progresser vers l'avant. Cette sorte de « freinage » de la lumière diffusée est d'autant plus fort que le rapport λ/l est plus élevé. Il ralentit le rythme avec lequel le milieu est exploré par la marche au hasard de la lumière, de centre diffuseur en centre diffuseur. Pour de faibles valeurs du rapport λ/l , ce ralentissement est faible, d'où le terme de localisation faible. Ce terme est toutefois trompeur, dans la mesure où la lumière continue malgré tout à se propager. En revanche, au-delà d'une valeur critique de l'ordre de 2π , toute propagation sur une distance macroscopique serait bloquée. Si la source de lumière est à l'extérieur, l'onde ne peut plus pénétrer le milieu. Si elle est à l'intérieur, elle ne peut plus en sortir et reste piégée au voisinage de la source. C'est la véritable localisation ou « localisation forte ».

Le but poursuivi actuellement est donc

d'augmenter encore la valeur du rapport λ/l , de façon à pouvoir étudier la transition au régime de localisation. Mais il faut pour cela disposer d'un milieu encore plus diffuseur que le lait ou nos suspensions de billes de polystyrène, bref un milieu qui reste à trouver. Les valeurs les plus élevées du rapport λ/l atteintes jusqu'à présent sont de l'ordre de l'unité, soit cinq fois plus faibles que la valeur critique donnée par Ioffe et Regel. Ce résultat a été obtenu, par exemple, par A.Z. Genack⁽⁵⁾, du centre de recherche Exxon d'Annandale, avec un milieu constitué par des petites particules d'oxyde de titane. Mais même dans ces conditions, Genack n'a pu observer la localisation forte, ni même le régime critique précurseur.

Une autre tentative a été faite par G.H. Watson Jr, P.A. Fleury et S.L. McCall⁽⁴⁾, des laboratoires de recherche ATT-Bell de Murray Hill. Leur expérience consistait à mesurer le temps de vol de brèves impulsions de lumière de durée 50 picosecondes (50×10^{-12} seconde) à travers le milieu diffuseur. Cette méthode renseignerait directement sur l'une des prédictions fondamentales de la théorie, à savoir la façon dont le temps de parcours de la lumière diverge à l'approche de la transition de localisation. Mais là encore, faute d'un bon milieu, cette expérience n'a pu mettre en évidence qu'un comportement classique.

A défaut d'un tel milieu, on peut aussi imaginer de nouvelles voies pour observer la localisation optique. Pour beaucoup, une solution consisterait à utiliser des milieux bidimensionnels pour lesquels on estime qu'il y a toujours localisation⁽¹⁾. Mais réaliser une telle expérience ne serait pas si simple. En restant dans le cas plus usuel de milieux tridimensionnels. S. John⁽⁶⁾, du département de physique de l'université de Princeton, propose d'utiliser des microstructures à géométrie soigneusement définie en silicium, germanium ou oxyde de titane.

Un autre moyen pour observer cette localisation⁽⁷⁾ vient d'être proposé par D. Sornette, du laboratoire de physique de la matière condensée de l'université de Nice, et B. Souillard de centre de physique théorique de l'Ecole polytechnique. Il s'agit d'utiliser comme centres diffuseurs des objets qui présentent des états internes de résonance avec l'onde incidente. Le cas qui semble le plus prometteur est celui d'un milieu liquide, comme la bière par exemple, dont les bulles de gaz pourraient être excitées en résonance par une onde sonore (et non plus lumineuse). Le critère de Ioffe et Regel pourrait alors être réalisé. Après la localisation des électrons, puis celle de la lumière, la clé du problème consisterait-elle donc à changer d'onde, une nouvelle fois, pour passer de l'optique à l'acoustique ou, qui sait, à d'autres ondes ?

Pierre-Etienne Wolf, Eric Akkermans,
Georg Maret et Roger Maynard