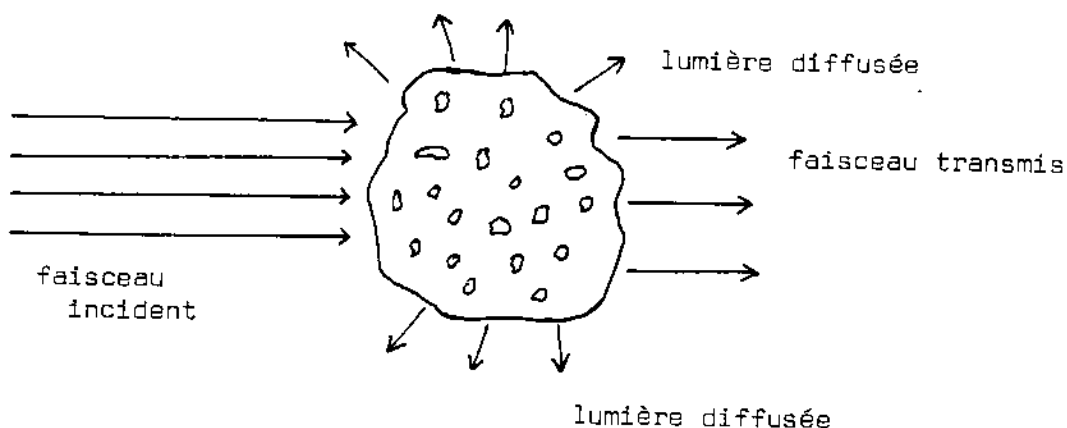


POURQUOI LE CIEL EST-IL BLEU ?

La couleur d'un ciel sans nuages, quoique généralement bleue, peut également passer par d'autres teintes tel le violet, l'orangé, le rouge au moment du coucher du Soleil ou bien lors de son lever.

Mais pourquoi le ciel prend-il donc ces teintes ?

La vraie nature de la couleur du ciel ne fut comprise que dans la seconde moitié du XIX^e siècle, avec les travaux des physiciens Brücke et Tyndall. C'est en 1869 que le physicien britannique John Tyndall démontra expérimentalement l'origine de la couleur bleue du ciel en analysant la diffusion de la lumière blanche par de petites particules.



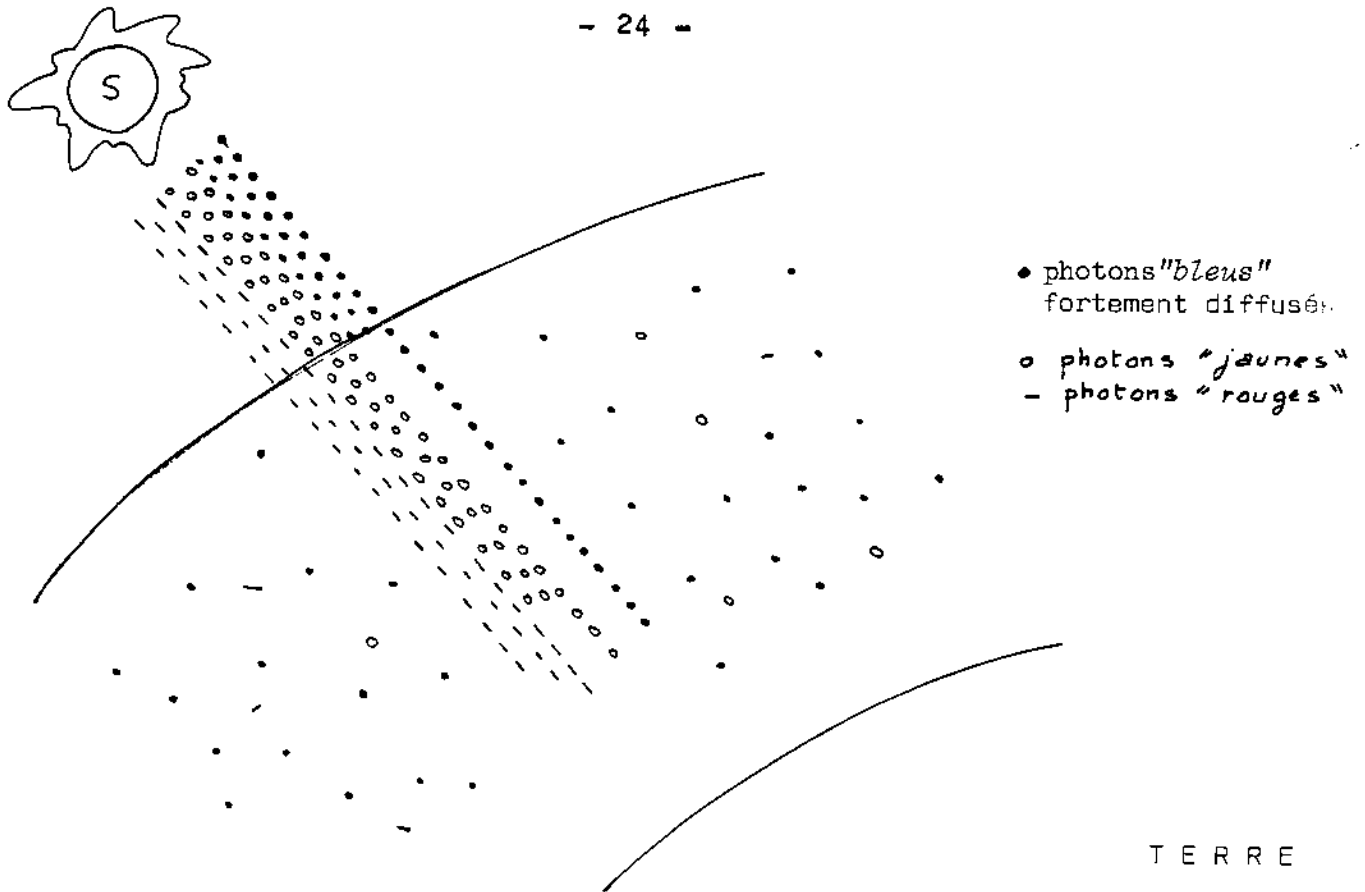
Un nuage contenant en suspension de fines particules est traversé par un faisceau de lumière blanche. Ces particules diffusent, dans toutes les directions, une partie de la lumière prélevée sur le faisceau incident. Celle-ci est en général blanchâtre sauf lorsque les particules sont très petites : elle devient bleue, et la lumière transmise rougeâtre. Tyndall appliqua ce résultat à la couleur du Ciel : le bleu du ciel provient de la lumière du Soleil diffusée par les particules de l'atmosphère terrestre.

Après la démonstration expérimentale de Tyndall, Lord Rayleigh, son contemporain entreprit une étude mathématique de la diffusion à partir de la théorie électromagnétique de Maxwell, récemment développée. Il montra que les particules dont la dimension était plus petite que le centième de la longueur d'onde

de la lumière incidente diffusait plus intensément les radiations de courte longueur d'onde que celles de grande longueur d'onde. Dans le cas de l'atmosphère terrestre, ce sont les molécules d'oxygène et d'azote qui jouent le rôle fondamental. Ces molécules diffusent les photons de fréquences élevées beaucoup plus fortement que les autres. Ce phénomène est connu sous le nom de "*diffusion Rayleigh*". L'intensité de la lumière diffusée est proportionnelle à la quatrième puissance de la fréquence. Ainsi les photons "*bleus*" sont-ils diffusés de façon quatre fois plus efficace^(environ) que les photons "*rouges*". Pour le domaine de sensibilité de notre oeil, ceci se traduit par le fait que la lumière du Soleil diffusée par l'atmosphère nous apparaît comme étant bleue car parmi le domaine de fréquence auquel notre oeil est sensible, ce sont les photons "*bleus*" ($\lambda \sim 4500 \text{ \AA}$) les plus abondants.

Une analyse microscopique de ce phénomène, nous apprend que la diffusion n'est qu'une des manifestations de l'interaction entre le rayonnement et la matière. La mécanique quantique nous permet de décrire ce phénomène de la façon suivante : quand un atome est exposé à un faisceau de photons dont l'énergie est égale à la différence entre l'énergie de l'état dans lequel se trouve l'atome et un état supérieur, le photon est absorbé par l'atome. Puis l'atome se désexcite après un intervalle de temps très court en émettant un photon, dans une direction quelconque par rapport à celle du photon incident, et dont l'énergie peut être légèrement différente de celle du photon incident.

Ainsi lorsqu'on regarde le Soleil au travers de l'atmosphère terrestre, il nous paraît plus jaune que vu à partir d'un véhicule spatial, car une partie des photons bleus, ne nous parvient pas; les photons sont diffusés par l'atmosphère terrestre dans toutes les directions et contribuent à rendre le fond de ciel bleu. Lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, son rayonnement traverse une épaisseur d'atmosphère plus grande et par conséquent un plus grand nombre de molécules participent à la diffusion. Alors, le Soleil nous paraît orangé et même rouge, car son spectre est privé d'un plus grand nombre de photons bleus.



La diffusion par les poussières contenues dans l'atmosphère terrestre n'est notable que lorsque le Soleil est bas sur l'horizon.

Ce phénomène s'applique à toute diffusion par l'atmosphère terrestre en particulier à la lumière de la Lune, à celle des étoiles... Mais leur intensité est si faible que la lumière diffusée dans ce cas est très peu intense. Malgré tout, regardons le ciel lorsque la nuit est transparente, l'expression "*bleu nuit*" prend alors tout son sens...

Hors de l'atmosphère terrestre, le fond de ciel est toujours noir, car il n'y a plus de diffusion. C'est ainsi que les astronautes le voient.

Les résultats de Rayleigh concernent également la diffusion des photons par des particules de tailles différentes. On peut les résumer ainsi : un faisceau de lumière blanche apparaîtra jaune, vu au travers de particules de petites dimensions; si les particules augmentent de taille, la lumière transmise devient bleue puis finalement verte car les grosses particules diffusent les photons rouges.

Le physicien allemand Gustave Mie étendit cette étude en décrivant la figure de diffusion propre à des particules de taille différente.

On peut maintenant également comprendre, à partir de cette théorie de la dif-

fusion, les phénomènes colorés, très rares, mais spectaculaires, tels que la Lune bleue ou verte : ceci est dû à de grosses particules, en suspension dans l'atmosphère terrestre. En 1950, après un formidable incendie dans les forêts canadiennes, un nuage, très dense flotta au-dessus de l'Atlantique rendant le Soleil, la Lune et les étoiles bleus.

Mais revenons à la couleur bleue du Ciel. Celle-ci n'est pas uniforme ainsi que nous avons pu le constater nous-mêmes. Ainsi, au dessus des villes, le ciel est fréquemment blanchâtre. Dans ce cas l'atmosphère est polluée par des fumées industrielles, donc des poussières dont la taille est très variable. Or, ces particules, diffusent de façon différentes les photons et ce que nous voyons, c'est la combinaison de ces photons diffusés à différentes longueurs d'onde d'où cet aspect du ciel, blanchâtre, car il y a mélange des fréquences.

On peut également se demander pourquoi les nuages sont blancs ?

Les nuages sont formés de gouttelettes d'eau en suspension. Ces molécules diffusent la lumière de façon analogue à celle des molécules d'oxygène ou d'azote, alors, pourquoi les nuages sont-ils blancs et non pas bleus ?

Si nous cherchons à analyser cette différence entre le bleu du ciel et la couleur des nuages, nous sommes inévitablement amenés à nous demander pourquoi, dans le cas de la diffusion de la lumière du Soleil par les molécules d'air, des interférences destructives ne se produisent-elles pas ? Une telle conclusion serait évidemment contraire à l'expérience : pour aucune direction, le ciel nous apparaît noir durant le jour. Or, la densité volumique des molécules d'air, qui est au sol d'environ $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ semble a priori suffisamment grande pour qu'à toute molécule A on puisse associer une molécule B distante d'une demi-longueur d'onde de plus de l'observateur telle que l'intensité diffusée par ces deux molécules se combine en une interférence destructive. Ainsi pour des angles de diffusion voisins de 90° , le ciel devrait-il être noir. Or il n'en est rien. Ce résultat d'interférence destructive nous est par contre familier dans le cas où nous observons, par exemple, le trajet d'un faisceau lumineux dans de l'eau pure. Nous savons qu'ici l'interférence destructive se produit : nous voyons au travers de l'eau le faisceau lumineux se propager, avec un petit étalement dû à la diffraction, mais avec une diffusion à 90°

quasiment nulle. Ces deux résultats proviennent de ce que, pour des molécules d'eau, les amplitudes du champ de rayonnement diffusé à 90° s'ajoutent et donnent une interférence destructive alors que pour les molécules d'air, ce sont les intensités qui s'ajoutent. (On montre que l'intensité de la lumière diffusée à 90° est proportionnelle aux nombres de molécules diffusantes).

Cette différence de comportement s'explique par le fait que les molécules d'eau sont très régulièrement espacées les unes des autres : à une molécule A on peut toujours associer une molécule B. Dans le cas de l'air, cette propriété n'est vraie qu'en moyenne. On dit dans ce cas que la diffusion est incohérente.

La description du trajet d'un faisceau lumineux que nous venons de donner pour l'eau est en réalité valable pour tout milieu où les molécules sont ordonnées régulièrement c'est-à-dire les solides et les liquides. Pour un tel milieu, lorsque la distance moyenne entre deux particules est petite comparée à la longueur d'onde du faisceau lumineux incident, les interférences entre les différents faisceaux diffusés se font de la façon suivante : il existe une série d'interférences constructives dans la direction du faisceau incident alors que partout ailleurs l'interférence est destructrice. On dit dans ce cas que la diffusion est cohérente. Ces interférences constructives forment le faisceau réfracté. En fait la structure atomique ou moléculaire d'un milieu n'est jamais parfaitement régulière : par suite de la température du milieu les molécules vibrent, et il existe toujours des imperfections dans la structure cristalline. Ces irrégularités créent une lumière diffusée ailleurs que dans la direction du faisceau réfracté, mais son intensité est extrêmement faible. A la surface incidente du milieu il existe une zone d'épaisseur $\lambda/2$ où les interférences destructives ne se produisent pas complètement. Il se forme alors un rayonnement "*réfléchi*" dont la couleur est blanche s'il en était de même pour le faisceau incident. Ce résultat peut paraître étonnant dans la mesure où ce faisceau est formé par diffusion et où l'on s'attendrait à y trouver principalement des photons bleus. Il n'en est rien car le rayonnement ré-émis est cohérent et le nombre de particules ré-émettant à la même fréquence est fonction de celle-ci. Ainsi la lumière réfléchie est-elle indépendante de la longueur d'onde. Il en est de même pour la lumière réfractée.

Ainsi la diffusion dans un milieu où les molécules sont uniformément espacées (structure cristalline par exemple), donne naissance à un faisceau réfracté et un faisceau réfléchi, mais sans changement de fréquence : c'est la différence fondamentale avec la diffusion dans un milieu gazeux où existe une forte dé-

pendance en fréquence.

Prenons par exemple la surface d'une vitre : nous savons par expérience journalière comment se manifeste le faisceau réfracté - nous voyons au travers de la vitre - alors que le faisceau réfléchi, nous permet de voir une image comme dans un miroir. Si cette vitre est dépolie, nous savons que ces deux images se brouillent. Dans ce cas, si la vitre est exposée à la lumière solaire, elle nous apparaîtra uniformément blanche que ce soit le faisceau réfléchi ou réfracté, si le faisceau incident est coloré, la vitre prend sa couleur. Ce résultat expérimental est valable lorsque le milieu est formé de particules dont la dimension est supérieure à la longueur d'onde des photons incidents. Dans ce cas, la lumière qui pénètre dans ce milieu subit de nombreuses réflexions sur les faces de ces particules, selon leur orientation et se forme en de multiples faisceaux réfractés dans le milieu et réfléchis à sa surface. Comme aucun de ces processus n'est sélectif en longueur d'onde, il en résulte pour l'observateur un faisceau diffus de lumière blanche qu'il soit réfléchi ou bien réfracté.

C'est ce phénomène qui explique par exemple la couleur blanche de la neige, celle des nuages. En effet, un nuage est formé d'une accumulation de gouttelettes d'eau, dont la dimension est supérieure à la longueur d'onde des photons "*visibles*". Ces gouttelettes sont suffisamment proches les unes des autres pour que la diffusion dans ce milieu soit cohérente et au trajet du faisceau lumineux solaire incident on peut appliquer les résultats énoncés précédemment. (à suivre ...)

M. GERBALDI

Quelques références bibliographiques:

- Cours de Physique Berkley - Volume 3 : Ondes - ed. A. Colin
- Scientific American, vol. 219, p. 60, 1968 : V.W. Weisskopf
- Scientific American, vol. 188, p. 69, 1953 : V.K. La Mer, M. Kerker
- Physics of the Air - W.J. Humphreys - ed. Dover.

=====