

A PROPOS DU BLEU DU CIEL

*Erratum : Nous vous demandons de bien vouloir ajouter à la lecture de l'introduction de l'article de L. Celnikier et de B. Leroy, "A propos d'une conception étrange du bleu du ciel" (Cahier Clairaut n°4) le paragraphe ci-après :*

*"Nous y apprenons que l'azur est dû à la diffusion de la lumière solaire par les particules de l'atmosphère terrestre. L'auteur nous explique ce mécanisme. La lumière solaire est absorbée par ces particules, portant leur état d'énergie d'un niveau moindre vers un niveau d'énergie supérieure, puis les particules se désexcitent en réémettant la lumière dans toutes les directions. Cette réémission est préférentielle, la probabilité de ce processus étant plus élevée, pour les hautes fréquences ( $\alpha \nu^4$ ). Ainsi, la lumière diffusée est-elle plus intense dans le bleu que dans le rouge. C'est pourquoi le ciel paraît bleu."*

*Quant à la phrase suivante, veuillez ajouter l'adverbe -ainsi- et lire : "Le mécanisme de la diffusion qui nous est-ainsi-expliqué invoque les transitions atomiques...etc..."*

-----  
*L'article "Pourquoi le ciel est-il bleu?" (Cahier Clairaut n°3) n'expliquait pas les détails du mécanisme de cette diffusion. Nous publions ci-dessous un article présentant une description de cette interaction matière-rayonnement.*

*La Rédaction.*

=====

INTERACTION DE LA LUMIERE AVEC LA MATIERE  
LE PROCESSUS DE DIFFUSION.

L'avenir d'un photon qui vient frapper un atome (ou une molécule) dépend de son énergie. Si elle est égale à l'une des différences d'énergie existant entre un état excité et l'état fondamental de l'atome, celui-ci avale goulûment le photon, s'excite et, après un court moment d'euphorie, retombe dans son état fondamental en évacuant un photon de même énergie. Ce type de réaction est une réponse résonante à la lumière incidente.

Bien souvent, le photon agresseur n'a pas une énergie aussi bien choisie; l'atome réagit cependant. Les principaux aspects de cette réaction peuvent être compris de façon très simple. A l'atome est substitué un système d'oscillateurs électroniques dont les fréquences propres correspondent aux transitions entre les divers états excités et l'état fondamental de l'atome. Comme les diverses transitions ne sont généralement pas équiprobables, chaque oscillateur est en outre doué d'une certaine "force", mesure de la probabilité de la transition qu'il représente. Ordinairement, la transition entre le premier état excité et l'état fondamental est la plus probable, l'oscillateur correspondant est donc le plus "fort". Ceci permet de remplacer dans la plupart des cas l'atome par un oscillateur unique. (*relatif à cette transition*).

Dans les liquides et les solides l'énergie absorbée par les atomes est rarement restituée intégralement sous forme de photons expulsés\*; une fraction de cette énergie est transformée en mouvement thermique. Du point de vue des oscillateurs, cela se traduit par un coefficient de frottement.

De même que dans ce modèle, la notion de niveaux quantiques est abandonnée, au photon peut être substitué l'onde électromagnétique classique. Pourvu que les oscillateurs électroniques soient convenablement choisis, les effets quantiques, sont pris en compte. La description de l'interaction est alors la suivante : le champ électrique de l'onde lumineuse incidente accélère sur son passage les électrons des atomes; les oscillateurs électroniques entrent alors en vibration. Le nuage électronique de chaque atome vibre sous l'influence de la lumière incidente, à la même fréquence que celle-ci et avec une amplitude correspondant à celle de l'un des oscillateur du modèle. C'est ce mouvement accéléré qui provoque l'émission de lumière qui nous permet de voir les objets de notre environnement.

La figure 1 résume les différentes réponses d'un oscillateur de fréquence propre  $\omega_0$  au passage d'une onde électromagnétique de fréquence  $\omega$ .

---

\* Comme c'est le cas dans les gaz raréfiés.

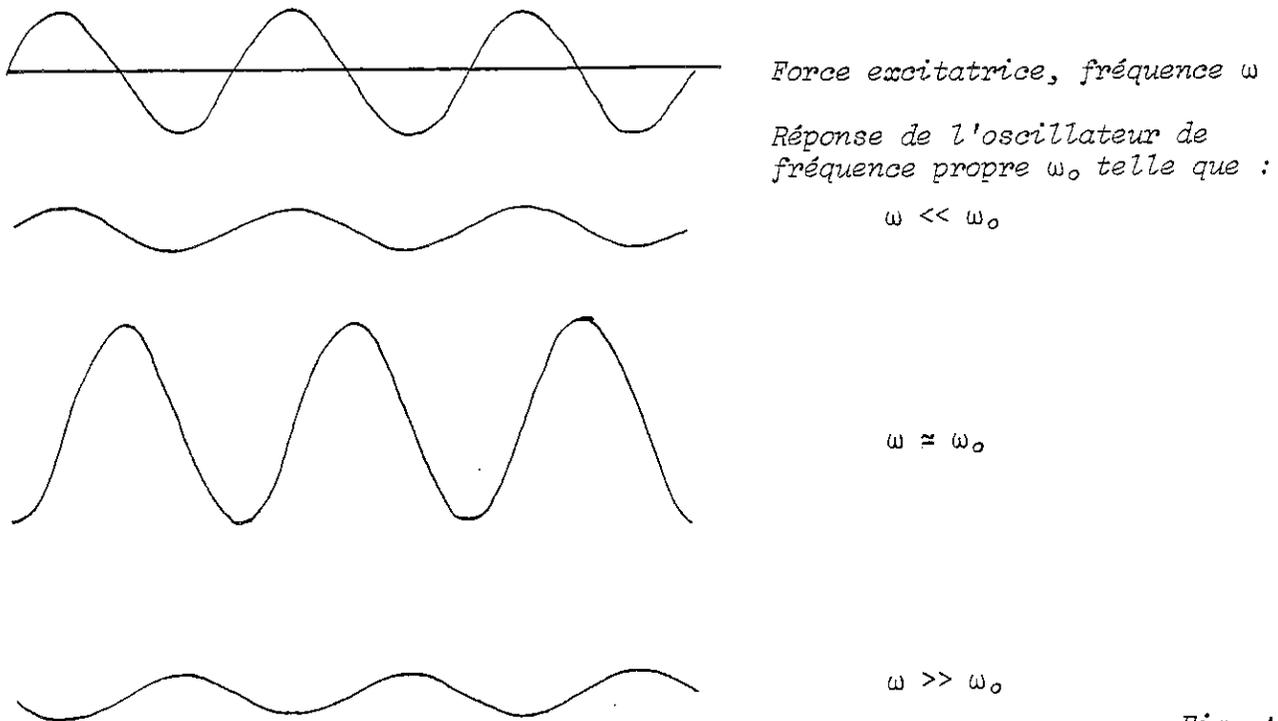


Fig. 1

Les atomes simples tels ceux d'hydrogène, de carbone, d'oxygène et d'azote ont des résonnances dans l'ultraviolet. Les molécules, par contre, peuvent aussi effectuer des vibrations dans lesquelles les atomes bougent l'un par rapport à l'autre. Par suite de la grande masse des atomes, ces vibrations ont des fréquences très basses, généralement dans l'infrarouge. Ainsi la plupart des molécules<sup>\*</sup> doivent être décrites à l'aide de deux types d'oscillateurs :

un oscillateur électronique et un oscillateur "lourd". Dans ce dernier, la masse oscillante a la masse d'un atome. Lors du passage d'une onde électromagnétique sur la molécule les deux oscillateurs réagissent, mais les amplitudes respectives de leurs vibrations sont dans le rapport de leurs masses; par conséquent, l'amplitude de l'oscillateur "lourd" est bien moindre que celle de l'oscillateur électronique. Pour cette raison, seul celui-ci sera pris en considération par la suite.

Une onde électromagnétique de fréquence  $\omega$  passe sur un oscillateur électronique de fréquence propre  $\omega_0$ . ( $\omega_0 \gg \omega$ ) situé à l'origine d'un système de coordonnées rectangulaires. Si le faisceau est supposé se propager suivant la direction  $oz$ , le champ électrique de l'onde s'écrit:

$$\vec{E} = (E_x^0, E_y^0, 0) \cos \omega t$$

\* Telles  $O_2, N_2, CO_2, H_2O$ .

Puisque  $\omega \ll \omega_0$ , l'amortissement de l'oscillateur peut être négligé\*, et l'équation du mouvement de l'électron s'écrit\*\* :

$$m\ddot{x} = -m\omega_0^2 x + e E_x,$$

où  $m$  est la masse de l'électron et  $e$  sa charge électrique. La solution est classique, elle est :

$$x(t) = \frac{e E_x^0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t \simeq \frac{e E_x^0}{m\omega_0^2} \cos \omega t.$$

L'accélération que l'électron acquiert au passage de l'onde vaut donc :

$$\gamma(t) = \ddot{x}(t) = -\omega^2 x(t) \propto \omega^2 \cos \omega t$$

Seule la dépendance en fréquence de la puissance moyenne rayonnée est importante. Aussi des calculs détaillés sont-ils inutiles, et l'analyse dimensionnelle en l'occurrence fera bien l'affaire. La puissance rayonnée  $\mathcal{P}$  par une particule de charge  $e$  et d'accélération  $\gamma$  ne peut dépendre que de  $e, \gamma$  et  $c$ . (La vitesse de la lumière doit intervenir, car les ondes émises sont des ondes électromagnétiques). Les dimensions respectives de ces grandeurs sont :

$$[e] = M^{1/2} L^{3/2} T^{-1} \quad (e = 4.803 \times 10^{-10} \text{ cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}),$$

$$[\gamma] = LT^{-2}$$

$$[c] = LT^{-1}$$

par conséquent, la puissance  $\mathcal{P}$ , dont les dimensions sont  $M L^2 T^{-3}$ , s'écrira : \*\*\*

$$\mathcal{P} \propto \frac{e^2 \gamma^2}{c^3}$$

c'est-à-dire :

$\mathcal{P} \propto \omega^4 \cos^2 \omega t$ , soit  $\mathcal{P} \propto \frac{1}{\lambda^4}$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde correspondant à la fréquence  $\omega$ .

La puissance moyenne rayonnée sera donc proportionnelle à  $\omega^4$ . C'est la fameuse loi de diffusion de Rayleigh : lorsqu'une molécule (ou un atome) est éclairée par un faisceau de lumière blanche, elle se met à osciller et réémet une lumière essentiellement bleue, car la puissance rayonnée

\* son importance n'intervient pratiquement qu'à la résonance  $\omega = \omega_0$ .

\*\* On ne considérera que la composante  $x$ , puisque, par raison de symétrie, la composante  $y$  donne des résultats semblables.

\*\*\* La formule exacte est :  $\mathcal{P} = \frac{2}{3} e^2 \gamma^2 / c^3$

dans le bleu est environ 16 fois plus forte que celle rayonnée dans le rouge. Si donc on regarde le ciel, mais pas directement vers le Soleil, il paraît bleu. La Terre photographiée depuis l'espace apparaît également bleue, en dehors des formations nuageuses. Si l'on regarde le Soleil à l'aube où à la brune, il est bas sur l'horizon et la lumière traverse une grande épaisseur d'atmosphère avant de parvenir au lieu d'observation. Comme l'intensité diffusée est plus forte dans le bleu que dans le rouge, la conservation de l'énergie\* montre que la lumière bleue est plus atténuée que le rouge à la traversée de l'atmosphère. (L'énergie rayonnée est prise sur le faisceau incident). C'est pourquoi aux moments du lever et du coucher, le Soleil paraît plus rougeâtre ou même très rouge selon la densité des basses couches atmosphériques. Ceci explique aussi que le Soleil observé au Zénith paraisse jaune et non blanc : l'épaisseur d'atmosphère traversée par la lumière est moindre au zénith qu'à l'horizon.

La diffusion Rayleigh est cependant un phénomène très faible; chaque molécule diffuse très peu de lumière. Par exemple, un faisceau de lumière verte parcourt environ 150 km dans l'atmosphère avant que son intensité ne soit réduite de moitié. C'est pourquoi on peut voir les montagnes à des centaines de kilomètres.

Le ciel est bleu, mais les nuages sont blancs. Pourquoi? Ils sont composés de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air. Les molécules d'eau ont des résonances dans l'infrarouge et l'ultraviolet plus ou moins semblables à celles de l'oxygène et de l'azote; elles devraient donc réagir à la lumière solaire de la même façon que celles-ci, pourtant une différence capitale existe : les molécules d'air dans l'atmosphère sont réparties aléatoirement dans l'espace, de sorte que les rayonnements des divers oscillateurs dans une direction quelconque autre que celle de la lumière incidente sont indépendants. Ce n'est plus le cas lorsque les molécules (ou les atomes) sont arrangées de façon plus ou moins ordonnée, comme elles le sont dans les solides et les liquides, et en particulier dans les gouttelettes des nuages. Les oscillateurs n'étant plus répartis

---

\* L'énergie re-rayonnée doit provenir de la lumière solaire incidente. Dans un premier temps, l'énergie incidente est convertie en énergie mécanique de vibration des oscillateurs; dans un second temps, elle est re-rayonnée par ceux-ci; et le re-rayonnement étant plus intense aux fréquences élevées, plus d'énergie doit être prise sur celle de la lumière solaire aux hautes fréquences.

au hasard dans l'espace, les ondes qu'ils émettent interfèrent. Plus précisément, l'interférence est constructive dans la direction du trajet lumineux et destructive dans toutes les autres directions. L'onde ainsi résultante est l'onde réfractée. Si les oscillateurs sont disposés régulièrement, la destruction dans les autres directions est totale; à cause de l'agitation thermique un peu de désordre est toujours présent, de sorte qu'il y a toujours un peu de lumière diffusée en dehors de la direction de l'onde réfractée. Cette diffusion incohérente reste cependant toujours incomparablement plus faible que la diffusion Rayleigh dans l'air.

Que se passe-t-il lorsqu'une onde lumineuse frappe la surface d'un solide ou d'un liquide? Au sein du matériau la vibration des oscillateurs provoqué par la lumière incidente engendre des ondes lumineuses qui, la faible diffusion incohérente précédente mise à part, s'additionnent pour former une onde réfractée. Au voisinage de la surface, il en va autrement. Il existe en effet, une fine pellicule (dont l'épaisseur est environ  $\lambda/2$  dans laquelle les interférences destructrices ne se produisent pas totalement, formant ainsi l'onde réfléchie (fig.2).

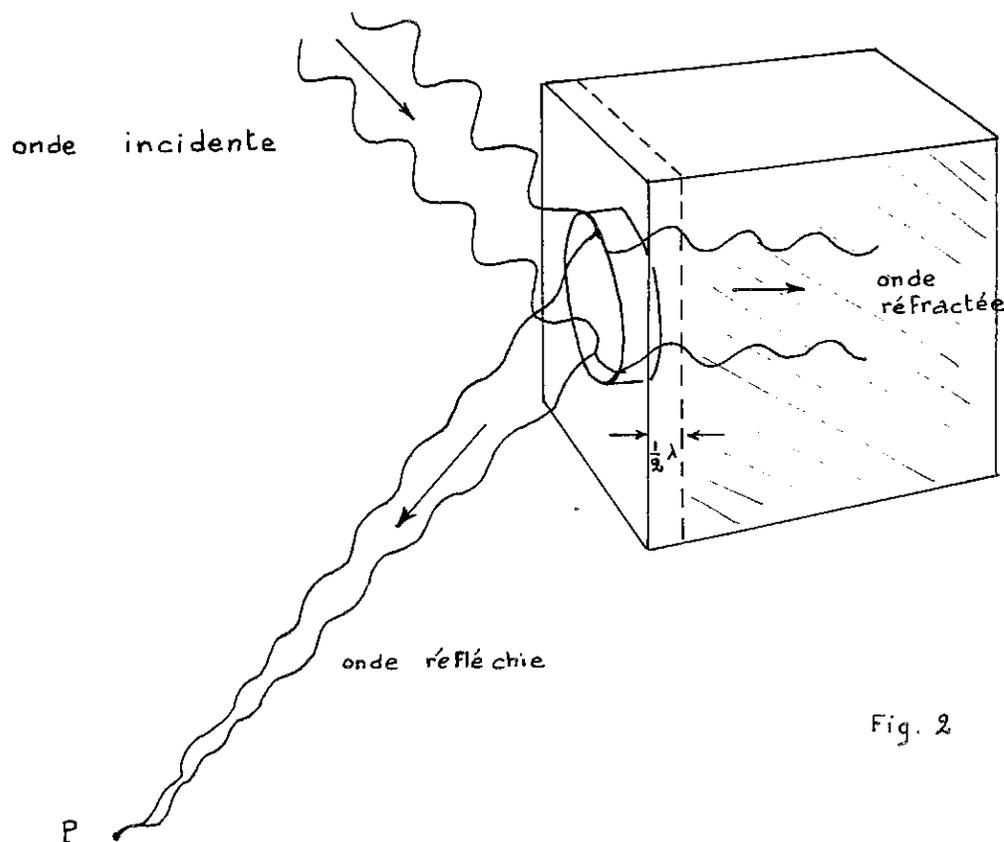


Fig. 2

Pour une lumière incidente blanche, la couleur de l'onde réfléchie n'est pas bleue, mais blanche. En effet, les oscillateurs dans la fine pellicule superficielle rayonnent en phase; ainsi, s'il sont en nombre  $N$ , l'intensité de l'onde réfléchie est proportionnelle à  $N^2$ . Or, puisque l'épaisseur de la couche responsable de l'onde réfléchie est de l'ordre de  $\lambda/2$ , le nombre  $N$  dépend de  $\lambda$ . Pour connaître la relation entre  $N$  et  $\lambda$ , il faut estimer l'aire de la couche qui produit l'onde réfléchie observée en un point  $P$  donné (fig. 2). Pour simplifier, le point  $P$  sera supposé être situé sur une perpendiculaire à la surface du matériau. Celle-ci peut alors être imaginée découpée en anneaux concentriques tels que les ondes réfléchies émanant de deux anneaux consécutifs présentent en  $P$  une différence de marche égale à  $\lambda/2^*$ . Si le nombre des anneaux est pair, alors aucune onde réfléchie n'est observée au point  $P$ . Si l'on observe une onde réfléchie, c'est que leur nombre est impair, et l'aire de la couche qui contribue effectivement à l'onde réfléchie est celle du premier anneau. Elle dépend de la géométrie de la surface réfléchissante et de la longueur d'onde incidente  $\lambda$ ; typiquement elle est proportionnelle à  $\lambda$ . Nous voyons alors que le nombre  $N$  des oscillateurs incriminés dans la production de l'onde réfléchie, étant proportionnel au volume de la couche considérée, est proportionnel à  $\lambda^2$ . Chaque oscillateur rayonne une intensité proportionnelle à  $\omega^4(\lambda^{-4})$ , l'intensité totale de la lumière réfléchie est par conséquent proportionnelle à  $N^2 \omega^4$ , c'est-à-dire indépendante de la longueur d'onde incidente. Si la lumière incidente est blanche, la lumière réfléchie l'est aussi. C'est pourquoi les nuages sont blancs.

Dans tout ceci nous n'avons tenu compte ni de la taille des gouttelettes d'eau formant le nuage, ni de la densité des particules dans le gaz où la diffusion se produisait.

Dans le cas du nuage, si la taille des gouttelettes ne peut pas être considérée comme étant grande devant la longueur d'onde incidente, la réflexion et la réfraction ordinaire ne peuvent avoir lieu, faute d'un nombre suffisant d'oscillateurs dans les gouttelettes. C'est l'explication, par exemple, de la disparition d'un nuage par une journée sèche : les gouttelettes s'amenuisent par évaporation, jusqu'à ce que le nuage paraisse bleu.

---

\* Ces anneaux sont appelés zones de Fresnel.

Dans le cas de la diffusion par un gaz, c'est-à-dire lorsqu'on peut considérer que les oscillateurs sont répartis au hasard, la loi de Rayleigh s'applique si la taille des particules diffusantes est petite devant la longueur d'onde de la lumière incidente (environ plus petite que  $0.1$  à  $0.2 \lambda$ ), mais lorsque la densité des particules devient importante, il faut également tenir compte de ce que l'onde incidente subira des interactions multiples ce qui complique l'analyse du phénomène; regardons par exemple la colonne de fumée formée par un feu de bois : elle nous paraît blanche là où elle est la plus épaisse, alors qu'à l'extérieur elle est bleutée.

Quand la taille des particules est grande (par exemple  $0,01$  mm) la diffusion se fait sans introduire de changement de couleur. Dans le domaine intermédiaire des valeurs de la taille de ces particules, l'intensité diffusée varie comme  $\lambda^{-P}$ , où  $0 < P < 4$  (loi de la diffusion de Mie), ce qui explique les diverses colorations observées autres que le bleu, lors de la diffusion de la lumière blanche par des particules un peu plus grosses que les molécules de l'atmosphère terrestre.

M. GERBALDI

B. LEROY

*Ce texte a été rédigé essentiellement à partir de l'article:*

*"How light interacts with matter", V.F. Weisskopf - Scientific American, 1968, page 219.*

