

Que la lumière soit - polarisée



La polarisation de la lumière fut découverte par Huygens en 1690. Malus, professeur à l'École Polytechnique, a montré, en 1808, que la lumière réfléchie sur la surface du verre était polarisée. Malgré ses nombreuses applications celle-ci est assez méconnue, car elle est difficile à comprendre. Nous essayons d'en donner une explication simple et quelques applications.

La lumière est constituée de l'oscillation périodique d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{B} , comme l'onde de la radiodiffusion ou de la télévision. Assez loin de l'émetteur l'onde peut être considérée comme plane, et dans ce cas les vecteurs \vec{E} et \vec{B} sont perpendiculaires. La puissance rayonnée à travers une surface unitaire tendue perpendiculairement à la direction de la propagation est $\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{B} / \mu_0$, où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. La direction de \vec{P} est celle de la propagation (fig. 81.1). On appelle historiquement le plan $[\vec{E} \vec{P}]$ plan d'oscillation, et $|\vec{B} \vec{P}|$ le plan de polarisation.

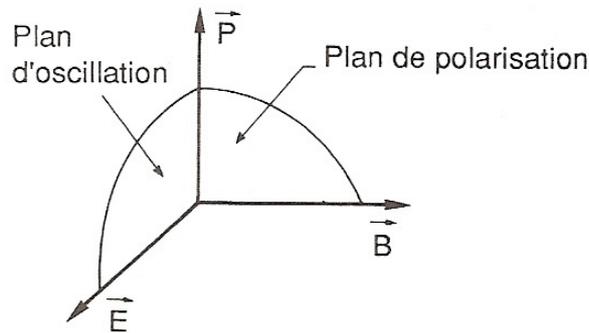


Fig. 81.1. Orientation des vecteurs champ électrique \vec{E} , champ magnétique \vec{B} et le vecteur de propagation $\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{B} / \mu_0$.

On dit que la lumière est « polarisée » si les plans $[\vec{E} \vec{P}]$ et $[\vec{B} \vec{P}]$ ont des orientations privilégiées dans l'espace. Si ces plans sont fixes, on dit que la lumière est polarisée linéairement (on dit aussi polarisation rectiligne). Nous ne discuterons ci-dessous que de certaines propriétés de la lumière polarisée linéairement.

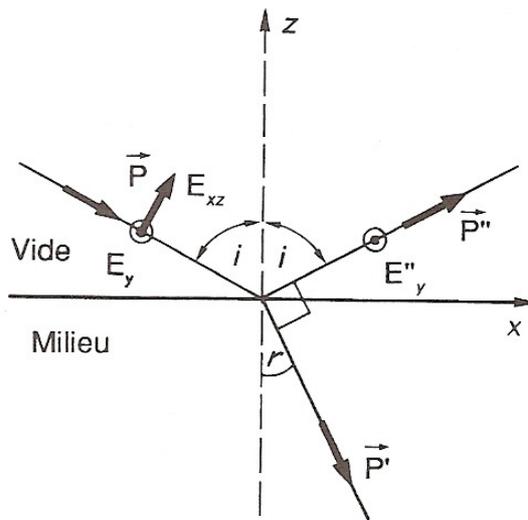


Fig. 81.2. Polarisation de la lumière réfléchi sur la surface de verre ; le faisceau incident est dans le plan $[xz]$; l'angle incident est représenté au cas où $i = i_B$.

La vibration de la lumière du soleil ou celle d'une lampe ne privilégie aucune direction. Sur la figure 81.2 nous représentons le vecteur du champ électrique qui est perpendiculaire à \vec{P} . Le plan horizontal $[xy]$ sépare le vide d'un milieu dont l'indice de réfraction est $n = \sqrt{\epsilon_r}$, où ϵ_r est la permittivité relative prise à la fréquence de la lumière. À la limite du milieu, la composante du champ électrique parallèle au plan $[xy]$ est la même dans les deux milieux, et aussi la composante $[xy]$ du vecteur d'excitation magnétique

$\vec{H} = \vec{B} / \mu_0$. Par rapport au faisceau incident, le champ électrique E'' du faisceau réfléchi a tourné vers le plan $[xy]$, alors que dans le faisceau réfracté E' est orienté davantage dans la direction de z . On peut montrer — le calcul est plutôt long — que, pour la lumière réfléchie, les rapports d'intensité des composantes perpendiculaires z et parallèles $[xy]$ sont :

$$\left(\frac{E''_z}{E_z}\right)^2 = \frac{\tan^2(i - r)}{\tan^2(i + r)}$$

et

$$\left(\frac{E''_{xy}}{E_{xy}}\right)^2 = \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)}.$$

Comme $i \neq r$, E''_{xy} ne devient jamais zéro, par contre, pour $i = i_B$ et $r = r_B$ (i_B : angle de Brewster) tels que $i_B + r_B = \pi/2$, la composante perpendiculaire du champ électrique disparaît : la lumière réfléchie perpendiculaire à la lumière réfractée est entièrement polarisée. Comme, suivant la loi de Descartes, $\sin i_B / \sin r_B = n$, on en déduit $\tan i_B = n$. La lumière réfractée ne devient, elle, jamais tout à fait polarisée. L'intensité de la lumière polarisée par réflexion partielle est faible.

La lumière diffusée par l'air (bleu du ciel) est aussi partiellement polarisée. La vibration d'un électron d'une molécule d'air excitée ressemble à celle du courant dans une antenne dipolaire (antenne de radiodiffusion, voir histoire 63). L'intensité du rayonnement émis, comme la capacité d'absorption de l'antenne sont proportionnelles à $\sin^2 \theta$ (où θ est l'angle entre l'axe du courant et la direction du rayonnement); nos yeux recevront de préférence le rayonnement des antennes microscopiques perpendiculaires au plan de diffusion (fig. 81.3). L'orientation préférentielle des dipôles électriques est donc horizontale, perpendiculaire au plan d'incidence, et le vecteur \vec{E} oscille préférentiellement, mais pas tout à fait, horizontalement. C'est ce que l'on peut vérifier avec des lunettes polarisantes, mais il nous faut d'abord expliquer comment on les réalise, en parlant des autres méthodes qui permettent de produire de la lumière intense avec un haut degré de polarisation rectiligne.

Certains cristaux anisotropes fournissent deux faisceaux réfractés qui sont polarisés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre (double réfraction ou biréfringence). Il suffit de se débarrasser d'un des deux faisceaux, et on dispose de la lumière polarisée. Le premier cristal qui, pendant plus de 200 ans, a fourni de la lumière polarisée pour toute étude de polarisation, était le spath d'Islande.

Les polariseurs d'aujourd'hui sont fabriqués suivant une idée de Land : il faut absorber sélectivement une des deux composantes polarisées. Le Polaroid est un film plastique étiré dans une direction. On crée ainsi une longue chaîne d'hydrocarbures. Une couche mince de petits cristaux anisotropes (un sel d'iode avec de la quinine) est appliquée à la feuille; les cristaux se fixent le long de la chaîne des hydrocarbures et libèrent des électrons de conduction qui peuvent se déplacer plus ou moins librement dans la chaîne moléculaire à laquelle ils appartiennent. Le Polaroid ressemble ainsi à une grille serrée formée de fils métalliques fins (fig. 81.4). Si le vecteur électrique de la

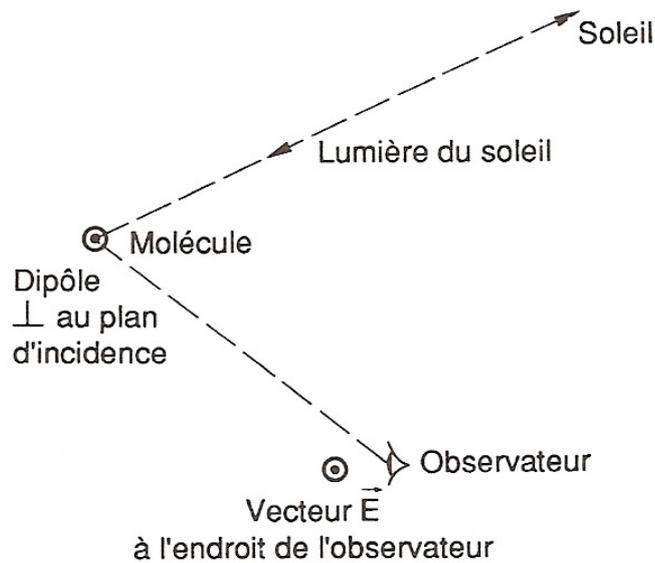


Fig. 81.3. Polarisation de la lumière du ciel : le vecteur du champ électrique est horizontal.

lumière incidente est perpendiculaire à ces fils, il ne peut pas accélérer les électrons, ne transmet donc aucune énergie à la feuille, et la lumière traverse le Polaroid sans être absorbée. Si le vecteur électrique est parallèle aux fils, il crée un courant alternatif le long du film et transmet ainsi de l'énergie au polariseur : cette lumière sera absorbée.

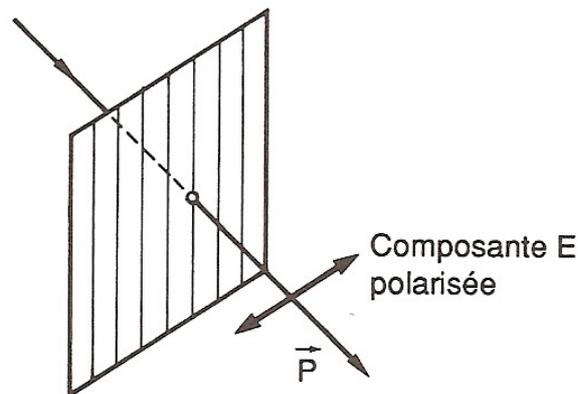


Fig. 81.4. Principe du Polaroid. Le vecteur électrique est perpendiculaire au sens de l'orientation des molécules de la feuille plastique.

Une paire de lunettes de soleil polarisantes est réalisée avec ces films polaroids : elle protège contre l'éblouissement du ciel. Les macromolécules sont orientées horizontalement et absorbent la lumière diffusée par l'atmosphère, dont le champ électrique est horizontal. La lunette joue dans ce cas le rôle d'un analyseur de polarisation.

Des tensions internes modifient la structure interne des matériaux: le verre soumis à des tensions perd son isotropie et devient légèrement biréfringent. Il y a des vitres de voitures dites trempées: lors de la fabrication, on les refroidit rapidement pour créer à l'intérieur une tension qui, en cas d'accident, fait éclater le verre en mille petits morceaux qui ne sont pas trop dangereux. Vue à travers des lunettes polarisantes, cette vitre montre le dessin des tensions.

Si nous regardons la lumière polarisée à travers un Polaroid (lumière polarisée par un autre polariseur), l'intensité lumineuse est inchangée si les axes des deux polariseurs sont parallèles, et la lumière est éteinte si les deux axes sont perpendiculaires. Si l'angle entre les deux axes de polarisation est α , l'intensité après l'analyseur est diminuée par un facteur de $\cos^2 \alpha$ (fig. 81.5); c'est la loi de Malus. Le système polariseur-analyseur permet de mesurer les propriétés polarisantes des matières transparentes ou translucides.

Certains cristaux et composés organiques font tourner le plan de polarisation. Ces composés sont appelés optiquement actifs. L'angle de rotation dépend de la substance chirale et du nombre de molécules actives. La rotation du plan de polarisation est utilisée, par exemple, à la mesure de la densité d'une solution sucrée (fabrication de sucre, vin).

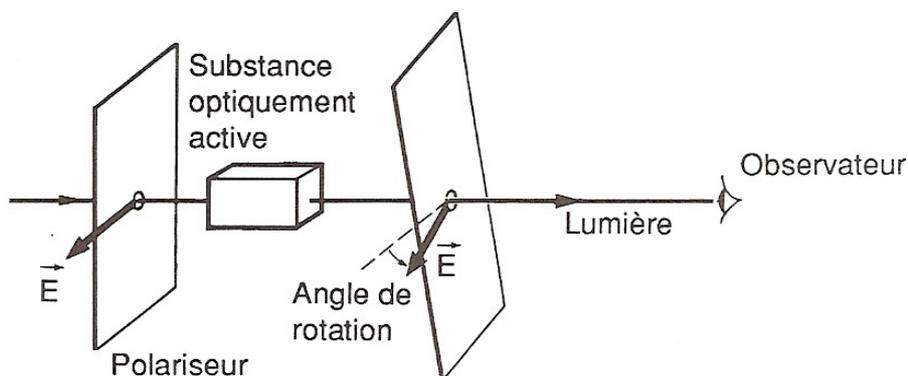


Fig. 81.5. Rotation de la polarisation par un composé optiquement actif.

Si le plan du vecteur électrique est tourné dans le sens contraire au mouvement des aiguilles d'une montre (la lumière est vue en face: direction $-\vec{P}$) le composé est lévogyre, dans le cas contraire, dextrogyre. Pasteur a été le premier à découvrir la chiralité (l'absence de symétrie de réflexion) des molécules organiques. À de très rares exceptions près, tous les acides aminés — qui sont les briques constituant les protéines — d'origine vivante, sont lévogyres et les sucres dextrogyres.

On a reproduit en laboratoire des conditions physicochimiques qui ont pu exister sur Terre quand les premières molécules organiques ont vu le jour. Ces expériences pro-

duisaient le même nombre de molécules lévogyres et dextrogyres. Il en est de même pour les acides aminés synthétisés par la nature dans l'espace.

Depuis que l'asymétrie de l'interaction faible est connue, de nombreuses hypothèses ont été émises pour expliquer comment cette interaction peut conduire à la préférence de la nature pour la vie lévogyre. On a repris cette étude à la lumière de l'interaction dite électrofaible, qui décrit à la fois l'interaction faible et l'interaction électromagnétique. D'après les calculs, l'énergie de liaison des acides aminés lévogyres excède celle des acides aminés dextrogyres de l'ordre de 10^{-19} eV. (Les énergies de liaison sont de l'ordre de l'eV.) Cette différence énergétique ne devrait produire, en équilibre thermique avec l'environnement, qu'un excès de molécules lévogyres $(L-D)/(L+D) \approx 10^{-17}$. Par contre, des réactions chimiques de polymérisation pourraient augmenter cette petite différence et produire à terme des protéines lévogyres et des sucres dextrogyres. D'autres calculs suggèrent que la phase dextrogyre des acides aminés pourrait se transformer spontanément en lévogyre à une température très basse (p. e. dans le vide interstellaire).

Aucune expérience ne peut répondre à nos jours à la question de base : l'asymétrie chirale de la nature a-t-elle une origine non biologique (comme les mécanismes décrits ci-dessus), ou bien biologique : les premières molécules autoreproductrices ayant été produites par hasard lévogyres, le mécanisme de la reproduction a augmenté exponentiellement cette population qui a submergé la population dextrogyre.