

Polarisation rotatoire et Effet Faraday

La polarisation rotatoire est un phénomène que nous avons rencontré en TP. Il se manifeste par la rotation du plan de polarisation autour de la direction de propagation de la lumière dans certains matériaux.

L'effet Faraday est une polarisation rotatoire induite par un champ magnétique, mais avec une différence importante par rapport à la polarisation rotatoire naturelle.

1 Polarisation rotatoire naturelle

1.1 Mise en évidence expérimentale

On place un morceau de quartz entre polariseur et analyseur croisés. L'axe optique du quartz est placé parallèlement à la direction de propagation de la lumière. Il n'y a ainsi pas de biréfringence observable. Cependant, de la lumière traverse l'analyseur. Cela montre que le morceau de quartz a tout de même un effet sur la lumière.

Si la lumière est monochromatique, on retrouve l'extinction en tournant l'analyseur. Cela montre d'une part que la lumière est restée polarisée linéairement à la sortie du quartz (sinon pas d'extinction) et d'autre part que le plan de polarisation a tourné d'un certain angle α .

1.2 Quelques définitions

- Un corps pouvant faire tourner le plan de polarisation de la lumière est dit *optiquement actif*. On dit qu'il présente de l'activité optique, ou un pouvoir rotatoire, ou encore une biréfringence circulaire (voir plus bas pour la justification de ce nom).
- La rotation du plan de polarisation peut se faire dans un sens ou dans l'autre. Pour une personne voyant venir la lumière vers elle, la substance active sera dite dextrogyre (tournant à droite) s'il faut tourner l'analyseur vers la droite pour retrouver l'extinction. Elle sera lévogyre (tournant à gauche) s'il faut tourner l'analyseur vers la gauche.
- Pour le quartz, certains cristaux sont dextrogyres, d'autres lévogyres. On compte l'angle α positivement pour les substances dextrogyres et négativement pour les lévogyres.

1.3 Interprétation de la polarisation rotatoire

1.3.1 Origine microscopique de la polarisation rotatoire

Une substance optiquement active doit cette propriété à une absence de plan de symétrie ou de centre de symétrie, soit à l'échelle de la molécule (la molécule n'a pas ces symétries : l'activité optique se manifeste alors aussi lorsque la molécule est sous forme de gaz ou en solution, c'est à dire sous une forme macroscopiquement isotrope), soit à l'échelle du cristal (le quartz fondu ne présente pas d'activité optique car les molécules qui le constituent sont symétriques, par contre dans le quartz cristallisé, ces molécules se placent suivant des hélices droite ou gauche et donnent lieu à un milieu dextrogyre ou lévogyre).

1.3.2 Théorie de la polarisation rotatoire

L'idée, due à Fresnel, est de considérer qu'un milieu optiquement actif transmet des polarisations circulaires gauche et droite sans déformation, mais avec des vitesses différentes. C'est

pour cela qu'on parle aussi de biréfringence circulaire.

En utilisant la notation de Jones, on voit qu'une polarisation linéaire $(1; 0) = \frac{1}{2}(1; i) + \frac{1}{2}(1; -i)$ peut s'écrire comme la somme d'une polarisation circulaire gauche et d'une polarisation circulaire droite. Supposons que la circulaire gauche se propage avec l'indice n_g et la droite avec l'indice n_d . La différence de phase entre les deux polarisations circulaires à la sortie d'un milieu optiquement actif d'épaisseur e est : $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_g - n_d)e$. La polarisation à la sortie du milieu optiquement actif est $\frac{1}{2}(1; i) + \frac{1}{2}e^{i\phi}(1; -i) = \frac{1}{2}(1 + e^{i\phi}; i(1 - e^{i\phi}))$. En factorisant $e^{i\phi/2}$ et en utilisant $-i = 1/i$, on trouve la polarisation de sortie $e^{i\phi/2}((e^{-i\phi/2} + e^{i\phi/2})/2; -(e^{-i\phi/2} - e^{i\phi/2})/(2i)) = e^{i\phi/2}(\cos(\phi/2); \sin(\phi/2))$. La polarisation de sortie est donc linéaire également, et elle a tourné d'un angle $\phi/2$.

1.4 Les lois de Biot

Ces lois expérimentales décrivent la polarisation rotatoire.

Première loi de Biot : Certains corps transparents, isotropes ou anisotropes, éclairés par une lumière polarisée linéairement, font tourner le plan de polarisation de la lumière.

Cette loi dit simplement que la polarisation rotatoire existe.

Deuxième loi de Biot : Il existe deux variétés de substances optiquement actives : celles qui font tourner le plan de polarisation à droite pour l'observateur voyant venir la lumière vers lui (substances dextrogyres), et celles qui le font tourner à gauche (substances lévogyres).

Troisième loi de Biot : L'angle de rotation du plan de polarisation est proportionnel à l'épaisseur de substance traversée : $\alpha = \{\alpha\}e$, où $\{\alpha\}$ est le pouvoir rotatoire spécifique de la substance. Si la substance est une solution diluée, alors $\{\alpha\}$ est proportionnel à la concentration de la solution.

Quatrième loi de Biot : Le pouvoir rotatoire spécifique dépend de la longueur d'onde selon la loi $\{\alpha\} = \pm A/\lambda^2$. A est appelé constante de Biot. Le TP sur la polarisation rotatoire propose une méthode de détermination de cette constante pour le quartz.

Cinquième loi de Biot : Le sens de l'angle de rotation (caractère lévogyre ou dextrogyre) ne change pas si on change le sens de parcours de la lumière. Conséquence importante : si la lumière effectue un aller-retour dans une substance optiquement active, la polarisation est identique à la polarisation initiale : les deux rotations lors de l'aller et du retour se compensent.

1.5 Ordre de grandeur

Pour le quartz, avec une lumière jaune-verte (550 nm) et une épaisseur de 2 mm, le plan de polarisation tourne de 48°. Cet effet est facilement mesurable.

2 Polarisation rotatoire magnétique : effet Faraday

Lorsqu'on applique un champ magnétique à une substance isotrope sans activité optique, il apparaît une activité optique qui dépend linéairement de l'intensité du champ magnétique, mais aussi de sa direction et de son sens par rapport à la direction et au sens de propagation de la lumière. Ceci est appelé l'effet Faraday. Il est en général plus important que l'effet Cotton-Mouton, sauf lorsque le champ magnétique est perpendiculaire au rayon lumineux. Il est le plus intense lorsque la lumière se propage parallèlement au champ magnétique, et c'est cette configuration que nous allons étudier dans la suite.

2.1 Mise en évidence expérimentale

On place un morceau de flint (type de verre utilisé pour fabriquer des prismes dispersifs) entre les pôles d'un électro-aimant appliquant un champ magnétique de l'ordre du Tesla. Les pôles doivent être troués de façon à laisser passer la lumière. On envoie un faisceau laser à travers un polariseur, puis le morceau de flint. On place un analyseur en sortie.

En l'absence de champ magnétique, on obtient l'extinction pour polariseurs et analyseurs croisés. Si un champ magnétique est appliqué, il faut tourner l'analyseur pour retrouver l'extinction. On a donc une polarisation rotatoire induite par le champ magnétique.

Si on change le sens du champ magnétique, en changeant le sens du courant dans l'électroaimant, il faut aussi changer le sens de rotation de l'analyseur pour retrouver l'extinction. Le caractère lévogyre ou dextrogyre dépend du sens du champ magnétique.

Si on augmente la valeur du champ magnétique, on augmente d'autant la valeur de l'angle de rotation.

L'angle de rotation est toujours proportionnel à l'épaisseur du milieu traversé.

2.2 Angle de rotation

$\alpha = VBe$, où V est la constante de Verdet, positive ou négative, en $^{\circ}\text{T}^{-1}\text{m}^{-1}$, B est l'intensité du champ magnétique en Teslas (T) et e l'épaisseur en mètres (m). α est alors l'angle de rotation en degrés. Pour un morceau de flint de 10 cm, dans un champ magnétique de 1 T, $\alpha = 52,8^{\circ}$.

2.3 Effet d'un aller-retour

A la sortie du flint on place un miroir pour que la lumière traverse une deuxième fois le flint en sens inverse. La lumière voit alors le champ magnétique dans le sens opposé par rapport à l'aller, donc elle tourne d'un angle opposé pour un observateur qui voit venir la lumière réfléchie vers lui. Globalement, la rotation de la polarisation subie lors d'un aller-retour est double de celle subie lors d'un aller simple. Ceci est la différence principale avec la polarisation rotatoire naturelle.

Application : si un aller simple fait tourner la polarisation de 45° , un aller-retour fait tourner la polarisation de 90° et alors elle est éteinte par le polariseur. On fabrique ainsi une diode optique ou un isolateur optique : la lumière issue d'un laser peut traverser le flint dans un sens, mais pas dans l'autre. Ceci est utile pour protéger les lasers de puissance d'un éventuel retour de faisceau dans la cavité par réflexion sur un dioptre. Ce retour pourrait endommager la cavité.