

# LES ETATS DE POLARISATION DE LA LUMIERE : MISE EN EVIDENCE ET APPLICATIONS



Lucas FREDERIC  
Léonard Levy

Thomas GRASELLI  
Florian THELLIEZ

Enseignant responsable du projet :  
Jérôme YON



Date de remise du rapport : 13/06/2014

Référence du projet : STPI/P6/2014 – 45

Intitulé du projet : Les états de polarisation de la lumière : mise en évidence et applications

Type de projet : Expérimental

Objectifs du projet

Expliquer les différents états de polarisation de la lumière puis mettre en place des expériences dans le but d'expliquer certaines applications de la polarisation telles que le pouvoir rotatoire d'une solution, la photoélasticimétrie ou encore le cinéma 3D.

Mots-clefs du projet

- Lumière
- Polarisation
- Expériences
- Applications

## Table des matières

1. Introduction .....	5
2. Organisation du travail .....	5
3. Travail réalisé et résultats.....	6
3.1 Approche théorique.....	6
3.1.1 Lumière et onde .....	6
3.1.2 Polarisation de la lumière .....	7
3.2 Applications de la polarisation .....	9
3.2.1 Pouvoir rotatoire d'une solution.....	9
3.2.2 Minéralogie .....	12
3.2.3 Photoélasticimétrie .....	13
3.2.4 Photographie et cinéma 3D .....	14
Changement de polarisation par réflexion .....	14
Cours préliminaire .....	15
Exemple d'application numérique .....	16
Applications et expériences .....	17
Photographie polarisée.....	17
Le cinéma 3 dimensions.....	18
4. Conclusion.....	19
5. Bibliographie / Crédits d'illustrations .....	20

## 1. Introduction

Dans le cadre du dernier semestre de cycle préparatoire à l'INSA de Rouen, il nous a été demandé de réaliser un projet de physique centré sur un thème prédéfini.

Notre thème concernait l'optique, un domaine de la physique qui traite notamment des systèmes utilisant ou émettant de lumière. Notre projet était donc lié à la lumière et plus précisément à la polarisation de celle-ci. Nous avons pour objectif de mettre en évidence les différents états de polarisation de la lumière, puis d'en voir certaines applications en les illustrant d'expériences.

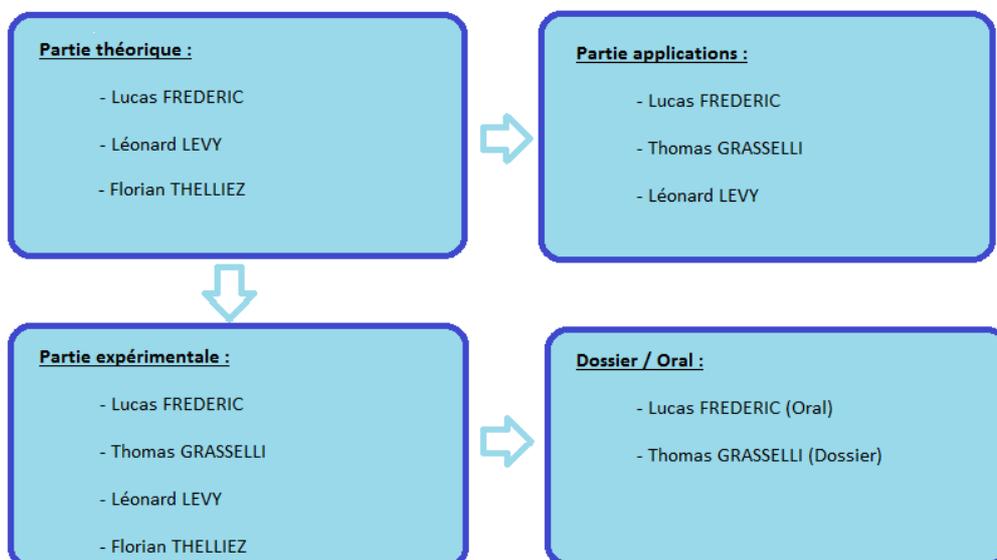
Pour ce faire, nous avons découpé notre rapport en deux parties principales : une première proposant une approche théorique de la polarisation, rappelant les définitions majeures et les formules clés dans ce domaine. La deuxième partie est beaucoup plus expérimentale, nous y revenons en effet sur les différentes expériences que nous avons réalisées et qui avaient pour but de montrer certaines applications de la polarisation.

## 2. Organisation du travail

Concernant l'organisation du travail, nous nous sommes très rapidement aperçus que notre projet était découpé en trois grandes parties à traiter de manière distincte :

- Une partie théorique dans laquelle il fallait expliquer toutes les notions liées à la lumière et la polarisation, les deux mots clés de notre projet.
- Une partie applications, dans laquelle nous devons expliquer différentes applications de la polarisation.
- Une partie expérimentale dans laquelle il nous fallait montrer les applications de la polarisation décrites précédemment au travers d'expériences diverses, tout en expliquant au maximum les phénomènes observés à chaque fois.

Nous avons ainsi mis en place l'organisation suivante :



### 3. Travail réalisé et résultats

#### 3.1 Approche théorique

##### 3.1.1 Lumière et onde

La lumière est une onde électromagnétique. Toutefois ce que nous désignons par le mot « lumière » n'est qu'en fait une toute petite partie des ondes électromagnétiques. En effet, la lumière que nous pouvons observer, et donc les couleurs qui en découlent, ne se trouve qu'entre les valeurs de longueurs d'ondes comprises entre 380nm qui correspond à la couleur violette, et 780nm qui correspond à la couleur rouge. Le domaine du visible est situé entre ceux de l'ultra-violet et de l'infrarouge.

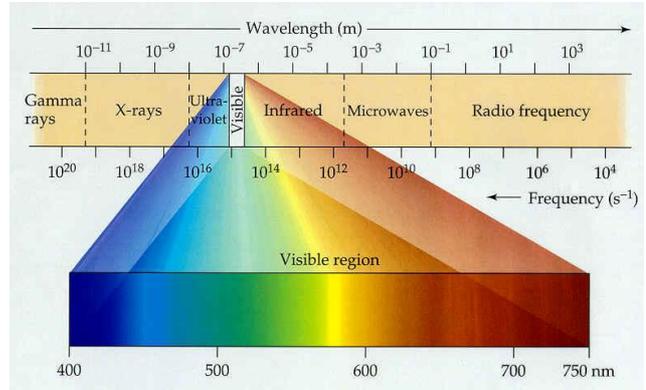


Figure 1 : spectre de la lumière

La longueur d'onde est la longueur d'un motif de l'onde. Pour les ondes visibles, elle est de l'ordre de la centaine de nanomètres ; néanmoins cette dernière peut varier entre 1 pico mètre (pour les rayons gamma) et plusieurs kilomètres pour les ondes radio. On utilise aussi la fréquence pour définir une onde, cela dépend principalement de la grandeur de la longueur d'onde. En effet la fréquence et la longueur d'onde sont liées par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Où  $\lambda$  représente la longueur d'onde,  $c$  la célérité de la lumière (vitesse de la lumière dans le vide,  $c'$  est une constante qui vaut :  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ ) et  $\nu$  la fréquence.

Une onde électromagnétique est, comme son nom l'indique, composée d'un champ électrique noté  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique noté  $\vec{B}$ . Pour décrire une onde électromagnétique on définit un autre vecteur noté  $\vec{k}$  qui s'appelle le vecteur d'onde. Ce dernier indique le sens de propagation de l'onde dans l'espace. Avec le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  et le champ magnétique  $\vec{B}$ , le vecteur d'onde forme un trièdre direct (comme une base orthogonale). Ainsi les champs électrique et magnétique sont toujours perpendiculaire, c'est pourquoi lorsque que l'on travaille avec une onde électromagnétique, on ne parle très souvent que du champ électrique et du vecteur d'onde car on peut aisément retrouver le champ magnétique à partir de ces deux vecteurs.

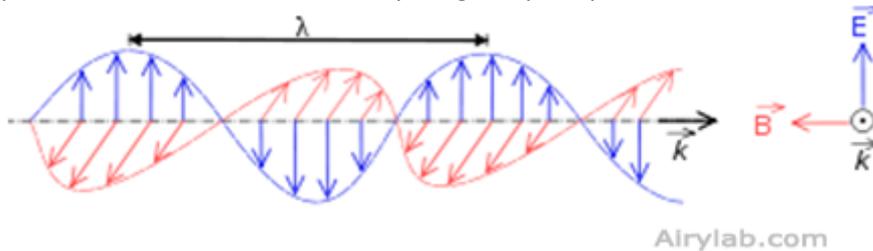


Figure 2 : les 2 composantes d'une onde

Mathématiquement, on modélise une onde électromagnétique, grâce à son champ électrique, sous la forme suivante :

$$\vec{E}(\vec{OM}, t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM} + \varphi)$$

Ou sous forme complexe :

$$\vec{E}(\vec{OM}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM} + \varphi)}$$

Dans ces deux formules,  $\vec{E}_0$  représente l'amplitude du champ électrique,  $\omega$  la pulsation de l'onde (sa valeur est de  $\frac{2\pi c}{\lambda}$ ),  $\vec{OM}$  est le vecteur position (avec le point O représentant l'origine),  $\varphi$  est le déphasage de l'onde (aussi appelé phase à l'origine). Dans la seconde formule,  $i$  représente la constante de l'ensemble des nombres complexes qui vérifie :  $i^2 = -1$ . Parfois, en physique, on le note  $j$  pour ne pas la confondre avec l'intensité ou autres grandeurs utilisant  $i$  comme notation.

Dans la plupart des cas, on se place dans une convention où le vecteur  $\vec{E}_0$  n'a pas de coordonnées en  $z$ , on écrit très souvent le champ électrique sous la forme :

$$\vec{E}_0(\vec{OM}, t) = \begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \\ E_{0z} \end{pmatrix} \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM} + \varphi) = \begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \\ 0 \end{pmatrix} \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM} + \varphi)$$

### 3.1.2 Polarisation de la lumière

À l'état naturel, comme le Soleil nous l'envoie par exemple, le champ électromagnétique de la lumière n'a pas de sens privilégié dans l'espace, il est totalement aléatoire et varie continuellement. En effet, cette lumière produite est composée de plusieurs « trains d'onde » qui ont une longueur d'onde (et donc une fréquence) et une amplitude différente. On dit que la lumière n'a pas de polarisation particulière.

On peut, toutefois donner une orientation privilégiée au champ électromagnétique de la lumière, on dit qu'on polarise la lumière. La polarisation consiste à ne faire passer qu'une partie des trains d'ondes selon une orientation définie ou alors de créer directement une succession de trains d'ondes possédant les mêmes caractéristiques (même longueur d'onde, même orientation et même amplitude), c'est le cas des lasers. Les polarisations que nous observons ne sont que des projections du champ électrique sur une surface perpendiculaire au vecteur d'onde. Comme le champ électrique oscille dans l'espace et peut faire des mouvements de rotation autour de l'axe définie par le vecteur  $\vec{k}$ , nous pouvons obtenir plusieurs figures géométriques sur la surfaces perpendiculaire.

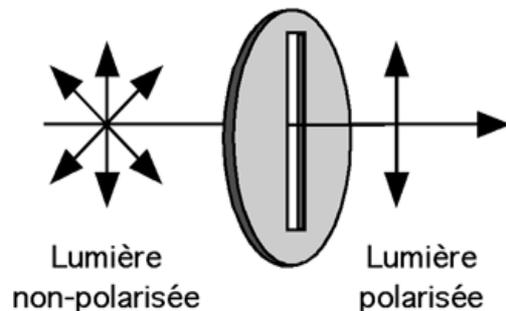


Figure 3 : polarisation de la lumière

Il existe 3 principaux types de polarisation :

- La polarisation linéaire
- La polarisation elliptique
- La polarisation circulaire

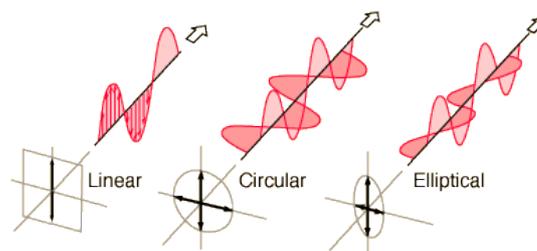


Figure 4 : les différents types de polarisation

Cependant dans chacune de ces polarisations peut être découpée en deux sous parties :

- Pour la polarisation linéaire, il existe la polarisation verticale ou horizontale en fonction de son orientation. Ces polarisations sont les plus simples à créer, il suffit de se munir d'un laser ou d'un polariseur (voir plus bas). On notera tout de même que si l'on fait pivoter le polariseur d'un certain angle, nous pouvons obtenir une polarisation linéaire inclinée du même angle que celui du polariseur.
- Pour les polarisations elliptiques et circulaires, elles peuvent être soit gauches ou droites. En effet, dans l'espace, le champ électrique peut tourner, autour de son centre de rotation, soit vers la gauche, soit vers la droite. Pour créer ce genre de polarisation, il suffit de combiner deux onde électromagnétiques (considérée polarisée linéairement) avec une phase à l'origine différente et un sens de polarisation différent.

Pour obtenir une polarisation, il faut utiliser un polariseur. La plupart du temps, le polariseur donne une polarisation linéaire. En effet, les polariseurs utilisés en laboratoire ou en photo sont constitués d'un polymère (souvent l'alcool polyvinylique) étiré. Du fait de son étirement, les polymères ont une certaine orientation, les chaînes d'atomes sont toutes orientées dans le même sens. Ainsi, les molécules forment une sorte de grillage unidirectionnel. De ce fait, lorsqu'une lumière non polarisée se confronte à ces chaînes, seules les champs électriques parallèles aux polymères peuvent les traverser. En sortie on obtient une lumière polarisée dans selon l'axe d'étirement des polymères, c'est-à-dire une polarisation linéaire de la lumière.

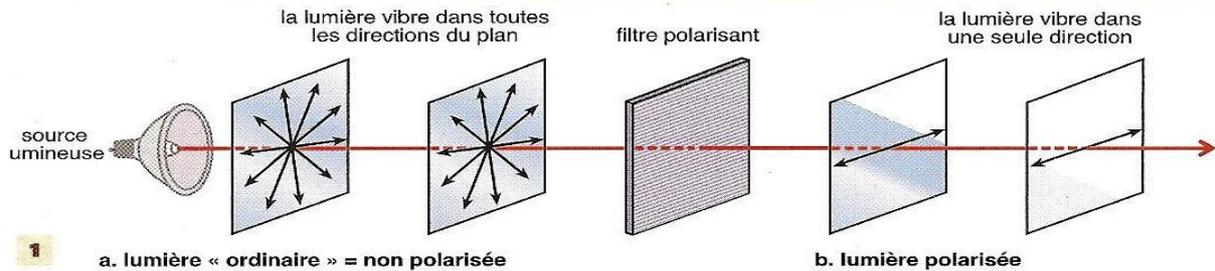


Figure 5 : rôle d'un polariseur

Mathématiquement, Robert C. Jones a formalisé l'écriture des polarisations des ondes électromagnétiques en 1941. Ces écritures sont sous formes de matrices. En effet, on a vu précédemment que le vecteur  $\vec{E}$  représentant le champ électrique pouvait être défini seulement grâce à 2 coordonnées (en faisant abstraction de la coordonnée  $z$ ). De ce fait, si l'on voit la polarisation de la lumière comme une application linéaire complexe, il est possible de créer des matrices pouvant décrire les différents états de polarisation de la lumière. Ainsi, nous obtenons ces différentes matrices en fonctions des différentes polarisations souhaitées :

Polarisation linéaire verticale	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polarisation linéaire horizontale	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
Polarisation linéaire avec un angle quelconque $\theta$	$\begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix}$
Polarisation circulaire gauche	$\begin{pmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{pmatrix}$
Polarisation circulaire droite	$\begin{pmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{pmatrix}$
Polarisation elliptique	$\begin{pmatrix} a + ib & e + if \\ c + id & g + ih \end{pmatrix}$ $a, b, c, d, r, f, g, h$ réels

Toutefois, nous ne pouvons pas visualiser directement les ondes, ce que nous visionnons est l'intensité lumineuse : nous ne voyons pas d'oscillations à proprement parler, nous ne voyons que des zones plus ou moins éclairées que d'autres. Ainsi lorsque l'on veut mesurer une onde et plus particulièrement l'amplitude de cette dernière, nous utilisons ce que l'on appelle l'intensité lumineuse, notée  $I$ . Cette dernière est calculée à partir du champ électrique d'une onde plane polarisée rectilignement suivant la formule qui suit :

$$I = \vec{E} \cdot \vec{E}^* = E_0^2$$

Dans cette formule,  $\vec{E}$  représente le vecteur champ électrique de l'onde défini précédemment et  $\vec{E}^*$  son conjugué au sens complexe du terme ; par ailleurs l'opérateur entre ces deux composants est le produit scalaire tel que nous le connaissons. Enfin  $E_0$  représente l'amplitude du champ électrique. De ce fait, nous pouvons constater que l'intensité lumineuse est directement liée à l'amplitude du champ électrique. Ainsi, durant le projet, la plupart des mesures réalisées se sont portées sur l'intensité lumineuse que nous pouvions récupérer en sortie de nos montages.

Par ailleurs, une autre loi intervient lorsque nous utilisons des polariseurs, il s'agit de la loi de Malus :

$$I = I_0 \cos^2(\theta)$$

Cette loi donne l'intensité lumineuse en sortie d'un polariseur notée  $I$  dans cette expression. On voit que cette intensité varie en fonction de l'intensité lumineuse à l'entrée d'un polariseur, notée  $I_0$ , et d'un angle  $\theta$  qui correspond à l'angle que fait l'axe de polarisation de la lumière (polarisée rectilignement) avec l'axe du polariseur. En regardant cette formule, on voit bien que lorsque l'axe du polariseur est perpendiculaire à l'axe de polarisation, le polariseur ne laisse passer aucune lumière (intensité lumineuse nulle).

## 3.2 Applications de la polarisation

### 3.2.1 Pouvoir rotatoire d'une solution

« Le pouvoir rotatoire d'une solution est sa capacité à faire tourner l'axe de polarisation d'une lumière polarisée linéairement. »

La compréhension de ce phénomène est difficile et n'est que très peu présente dans la littérature. Pour expliquer cette rotation du plan de polarisation, il faut assimiler les molécules qui composent la solution ; ces molécules sont chirales (elles ne sont pas superposables à leur image dans un miroir) et possèdent un ou plusieurs carbones asymétriques (carbone relié par une liaison covalente à 4 substituants différents). La géométrie de cette molécule peut être assimilée à une sorte de spirale pour expliquer ce phénomène. Lorsqu'une onde électromagnétique polarisée rectilignement rencontre cette spirale, la composante électrique excite les charges présentes dans cette hélice ; ainsi les charges excitées rayonnent, créent un courant et se déplacent le long de l'hélice (c'est-à-dire à la fois le long de l'axe de l'hélice mais aussi perpendiculairement à celui-ci). Lorsque les charges arrivent au bout de chacun des bouts de l'hélice, deux ondes électromagnétiques sont émises (une par chaque bout de l'hélice), néanmoins, lors de la création de ces deux ondes le trajet parcouru par chaque particule jusqu'au bout de l'hélice n'est pas exactement pareil (il n'y a pas de symétrie parfaite de l'hélice pour ce type de molécule) ; ainsi il en résulte un déphasage entre les deux ondes qui fait apparaître une autre composante du champ électrique. De ce fait, le champ électrique émis par la molécule a tourné d'un certain angle après avoir traversé la molécule.

L'angle de rotation de l'axe de polarisation est directement relié à la concentration de la solution grâce à la formule de Biot :

$$\alpha = [\alpha]_{\lambda}^t * l * c$$

Dans cette formule,  $\alpha$  représente l'angle de rotation du plan de polarisation (exprimé en  $^{\circ}$ ),  $[\alpha]_{\lambda}^t$  représente le pouvoir rotatoire spécifique d'un composé, il s'exprime en  $^{\circ} \cdot \text{dm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$  et est dépendant de la molécule en question, de la longueur d'onde qui est utilisée pour l'étude et de la température.  $l$  représente la longueur de la cuve d'étude dans laquelle se trouve la solution (exprimé en dm) ; enfin  $c$  représente la concentration en molécule étudiée dans la cuve (en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

Dans le cadre de notre projet, nous avons voulu mettre en évidence le pouvoir rotatoire de certaines molécules et ainsi déterminer le pouvoir rotatoire spécifique associé à ces particules. Dans un premier temps, il nous a fallu chercher une molécule que nous devions tester ; cette recherche n'a pas été très longue étant donné le nombre de possibilités et les contraintes que nous avons (il ne fallait pas prendre de molécule toxique, cancérigène...). Nous nous sommes donc tournés vers le saccharose, c'est-à-dire le sucre blanc (ou sucre de table). L'avantage de ce composé est qu'il peut se trouver facilement (et pour un coût réduit), qu'il ne présente aucune contre-indication et qu'il est très soluble dans l'eau (2000g/L).

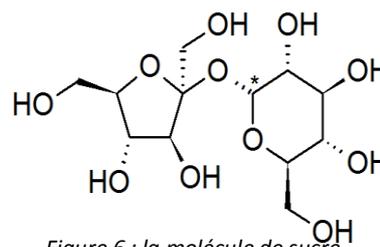


Figure 6 : la molécule de sucre

Dans un premier temps nous avons effectué l'expérience pour obtenir le pouvoir rotatoire spécifique grâce à un laser, une petite cuve, des polariseurs et un montage électrique comprenant une photodiode capable de mesurer l'intensité lumineuse reçue. Le montage était le suivant :

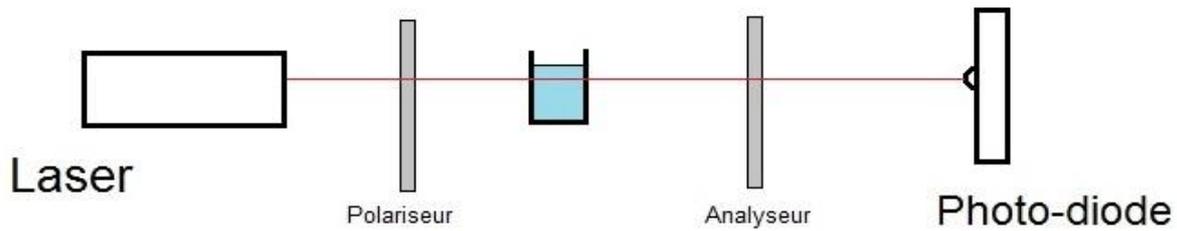


Figure 7 : montage expérimental de notre première expérience

Le polariseur (le premier à rencontrer le laser sur le schéma) est un polariseur fixe, c'est-à-dire que c'est lui qui donne l'orientation du champ électrique. Théoriquement, la lumière émise par un laser est déjà polarisée linéairement, toutefois pour pouvoir mesurer les angles le plus précisément possibles et pour s'assurer du plan de polarisation de la lumière nous avons préféré rajouter un polariseur juste après le laser. L'analyseur est un polariseur aussi, cependant celui-là est mobile, c'est-à-dire qu'il peut tourner autour de l'axe de propagation de la lumière. De ce fait en trouvant l'angle de l'analyseur pour lequel la valeur donnée par la photodiode est maximum il nous était possible de trouver l'angle de rotation du champ électrique dû à la cuve et, grâce à la loi de Biot retrouver ainsi le pouvoir rotatoire spécifique du saccharose.

Néanmoins lorsque nous avons fait nos expériences nous nous sommes heurtés à plusieurs problèmes. En effet, tout d'abord nous avons une mauvaise dissolution du sucre dans l'eau et une répartition non-homogène de la concentration en sucre dans la solution. Nous pouvions ainsi remarquer un gradient de concentration grâce à une réfraction au sein même de la solution. De plus, nous avons une dispersion de la lumière en sortie de la cuve, ce qui rendait les mesures encore plus complexes (quelle tache choisir pour faire la mesure ?). Ces expériences ne nous ont pas permis de déterminer le pouvoir rotatoire spécifique du saccharose.

Ce n'est qu'après, grâce à l'achat d'un polarimètre que nous avons pu mener à bien cette expérience. Le polarimètre est un instrument de mesure qui permet de mesurer la pouvoir rotatoire d'une solution visuellement. Il est composé d'une lampe à sodium, d'un filtre à longueur d'onde, d'un polariseur, d'une lame demi-onde, d'une cuve où l'on met la solution à tester et d'un analyseur. Le schéma suivant montre comment est fait et le trajet de la lumière à l'intérieur du polarimètre :

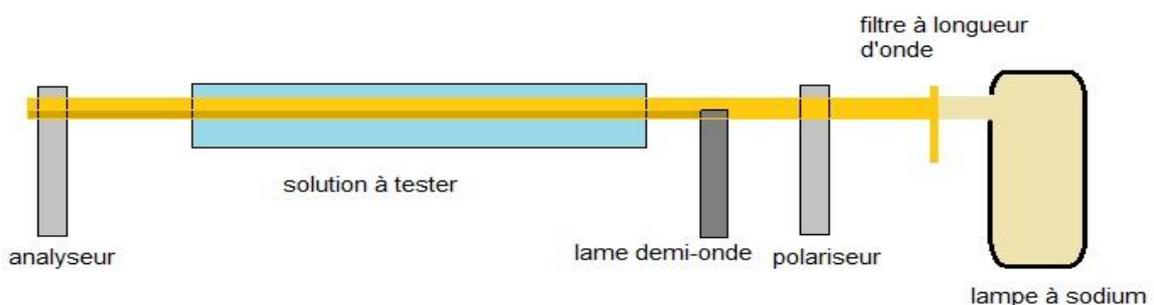


Figure 8 : principe du polarimètre

Le principe de fonctionnement du polarimètre est assez simple, la mesure se fait optiquement grâce à des différences de contrastes. En effet, après que la lumière soit filtrée et polarisée, une partie de la lumière passe à travers de la lame demi-onde tandis que l'autre partie continue son trajet. La lame demi-onde permet à la lumière de se déphaser d'une demi-longueur d'onde. Ainsi, l'onde qui est en sortie de la lame est polarisée perpendiculairement à la lumière en entrée de la lame (et donc la partie qui ne passe pas à travers la lame). Ensuite, la solution fait tourner les deux champs électriques (celui en sortie de la lame et celui qui passe à côté) du même angle en fonction de la concentration en élément à tester. Ensuite l'analyseur, qui est aussi un polariseur, ne laisse passer que les polarisations qui lui sont parallèles à l'axe du polariseur en suivant la loi de Malus.

Toutefois, comme c'est un analyseur, il est possible de le faire pivoter autour de l'axe de propagation de la lumière. Grâce à la lame demi-onde, nous obtenons deux signaux en sortie polarisés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. Si on superpose les deux lois de Malus correspondant à ces deux rayons on obtient un graphique qui ressemble à celui-ci :

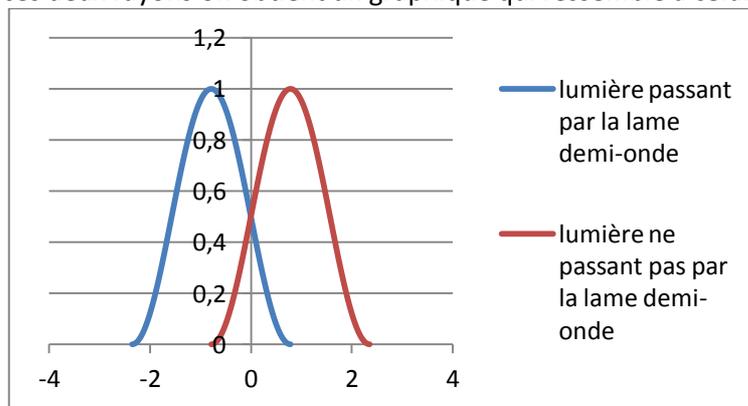
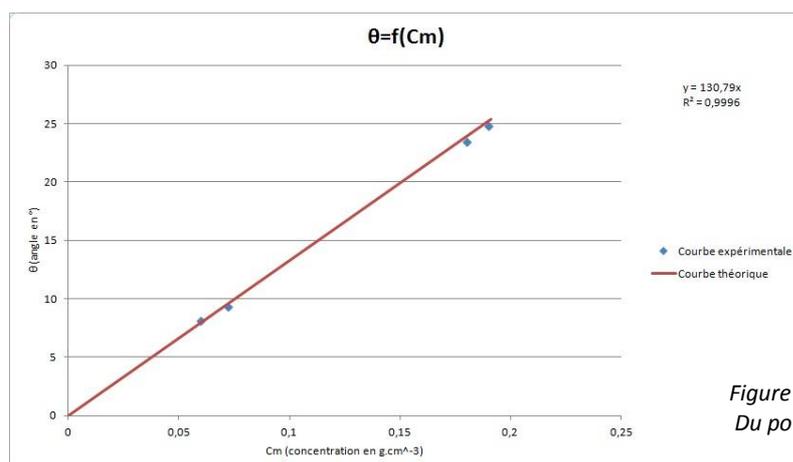


Figure 9 : graphique des 2 lois de Malus

Ainsi, on voit aisément grâce à ce graphique que pour un certain angle (modulo pi), les deux intensités lumineuses sont les mêmes. Dans la pratique cela se visualise par l'absence de discontinuités à la sortie du polarimètre. En effet, si l'on voit une discontinuité dans ce que l'on observe c'est que nous nous trouvons à un angle pour lequel une polarisation est moins présente voir absente à la sortie de l'analyseur.

Grâce au polarimètre nous avons pu calculer le pouvoir rotatoire spécifique du saccharose pour une longueur d'onde de 587nm (une des longueurs d'onde du sodium), pour une température de 20°C. Pour cela nous avons utilisé plusieurs solutions. Pour obtenir ces différentes solutions, nous avons juste pesé grâce à une balance des masses de sucres que nous avons introduits dans un volume constant d'eau (100ml). De plus, pour que la solution soit homogène et que le sucre soit entièrement dissolu dans l'eau nous avons chauffé et agité la solution. Ainsi grâce aux différentes solutions obtenues avec des concentrations différentes nous avons pu mesurer différents angles sur le polarimètre ; ensuite, en traçant, nous avons obtenu la droite suivante :



Premièrement, nous voyons que le coefficient de corrélation est très proche de 1 donc cela nous montre que nos valeurs ne sont pas aberrantes. Ensuite, nous savons grâce à la loi de Biot que :

$$\alpha = [\alpha]_{\lambda}^t * l * c$$

Figure 10 : Courbe de détermination Du pouvoir rotatoire du saccharose

De plus, le constructeur du polariseur nous donne la longueur de la cuve d'étude qui est de 20cm soit 2dm. Ainsi nous pouvons écrire :

$$[\alpha]_{\lambda}^t * l = 130.79 \Leftrightarrow [\alpha]_{\lambda}^t * 2 = 130.79$$

Et en déduire :

$$[\alpha]_{\lambda}^t = \frac{130.79}{2} = 65.395^{\circ} \cdot dm^{-1} \cdot g^{-1} \cdot cm^3$$

Pour le saccharose à 20°C et pour une longueur d'onde de 587nm.

Après quelques recherches, nous avons trouvés que la valeur théorique pour le pouvoir rotatoire du saccharose dans les mêmes conditions est de :

$$[\alpha]_{\lambda_{th}}^t = 66.4^{\circ} \cdot dm^{-1} \cdot g^{-1} \cdot cm^3$$

Soit un écart relatif de :

$$\varepsilon = \frac{|65.395 - 66.4|}{66.4} = 1.51\%$$

Ce qui est assez faible. Ainsi nous pouvons dire que nous avons réussi nos mesures et que la valeur expérimentale est assez précise. De ce fait, le polarimètre est un instrument assez puissant si l'on veut trouver une concentration pour une solution comprenant une molécule avec un pouvoir rotatoire.

Néanmoins, cet outil est de moins en moins utilisé pour trouver la concentration d'une solution. En effet, lors des synthèses de produit dont les molécules sont optiquement actives (ayant un pouvoir rotatoire), il arrive très souvent que les carbones asymétriques images l'un de l'autre dans un miroir soient synthétisés dans les mêmes proportions (ou du moins dans des proportions très proches). Comme les pouvoirs rotatoires d'un composé et de son image dans un miroir sont opposés, la composante totale est nulle et il n'en résulte aucune déviation du plan de polarisation. De plus, des autres méthodes de dosage d'un élément sont apparues et sont bien plus précises que le polarimètre.

### 3.2.2 Minéralogie

Une autre application de la polarisation de la lumière se trouve dans le domaine de la minéralogie. En effet, il est possible de révéler et d'identifier certains cristaux grâce à la lumière polarisée linéairement.

De nombreux cristaux sont anisotropes vis-à-vis de la lumière, c'est-à-dire que la lumière qui rentre dans un cristal ne se propagera pas de la même façon en fonction de son orientation. Cela engendre une biréfringence des cristaux. Ce phénomène s'explique par la séparation du rayon lumineux en entrée du cristal en 2 rayons que l'on appelle rayon ordinaire et rayon extraordinaire. En effet, il existe une direction particulière, appelée axe de biréfringence, où l'indice de réfraction ordinaire est différent de l'indice dans les directions perpendiculaires (on appelle cet indice, indice de réfraction extraordinaire). Quand les deux rayons sortent du cristal, il se trouve que leur polarisation est différente : celle du rayon ordinaire a la même polarisation linéaire que le rayon entrant, cependant l'axe de polarisation du rayon extraordinaire forme un angle de 90° avec l'axe du rayon ordinaire.

Ainsi lorsque l'on regarde une lame mince de roches au microscope avec une lumière polarisée, on voit des différences de couleurs variées car les indices de réfractions n'influent pas de la même façon en fonction de la fréquence de l'onde. On obtient les clichés ci-dessous :

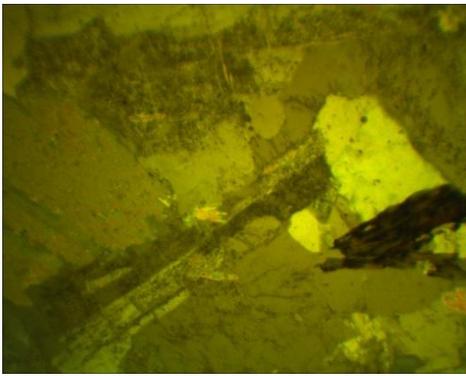


Figure 11 : lame mince de granite en lumière polarisée non analysée

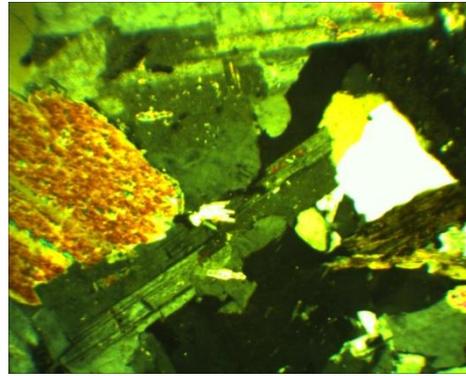


Figure 12 : lame mince de granite en lumière polarisée analysée

Ces deux photos montrent la même lame mince (du granite à deux micas) ; cependant la première s'observe grâce à un microscope à lumière polarisée non analysée alors que la seconde est en lumière polarisée analysée.

Voici un schéma du fonctionnement du microscope à lumière polarisé :

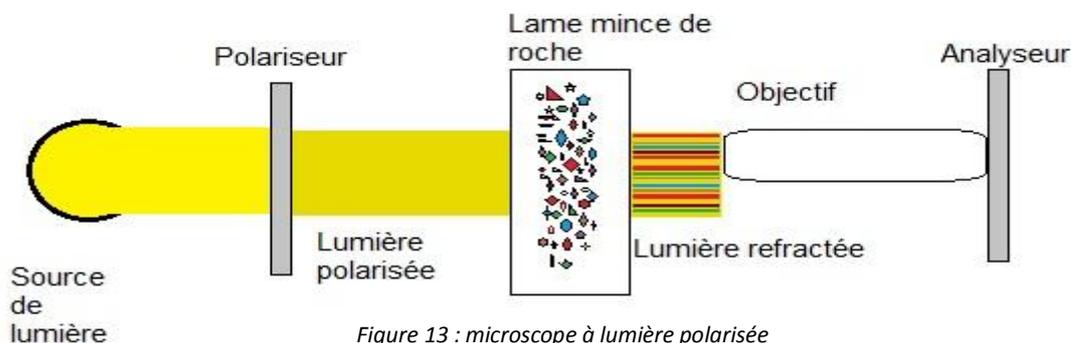


Figure 13 : microscope à lumière polarisée

Cette méthode de mise en évidence de certains cristaux dans les roches est très utilisée pour une première approche lors d'une identification des minéraux. En effet, il existe des systèmes de comptage des cristaux qui, couplés à la microscopie en lumière polarisée, permette d'identifier certains cristaux et de savoir la proportion de ces cristaux dans la roche.

Toutefois elle reste assez limitée car si l'on fait pivoter le polariseur, la lame mince ou l'analyseur, la couleur des cristaux change et le système de comptage peut être faussé. De plus, pour les cristaux isotropes, cette méthode ne donne rien.

Par ailleurs, dans un autre milieu que la géologie, cette méthode est aussi utilisée pour mettre en évidence la formation de cristaux. Ainsi en pharmacologie, lorsqu'une nouvelle molécule est synthétisée et que l'on veut observer s'il y a eu formation de cristaux, on utilise la microscopie en lumière polarisée en premier lieu. Puis une méthode d'identification par rayon X est utilisée pour confirmer les observations au microscope ou pour voir ce qui n'a pas pu être observé.

### 3.2.3 Photoélasticimétrie

Une autre application de la polarisation de la lumière est la photoélasticimétrie, elle permet d'observer les contraintes appliquées à un matériau transparent anisotrope (souvent un plastique) grâce à un polariseur.

En effet lors de l'application d'une force pendant la formation du plastique, le matériau devient biréfringent par endroit. De ce fait, il acquiert un deuxième indice de réfraction qui, comme pour les lames de roches en microscopie en lumière polarisée, vont avoir une incidence sur la polarisation de la lumière en sortie ainsi que sur sa longueur d'onde. L'avantage de ce principe est qu'il est relativement facile à mettre en œuvre et qu'il permet de visualiser les contraintes qu'il serait difficile de mettre en équation pour les étudier.

Pour mettre en évidence les efforts appliqués il suffit de placer l'objet à analyser devant une lumière polychromatique polarisée (comme devant un écran d'ordinateur par exemple) puis de placer un polariseur après l'objet. Grâce à ce « montage expérimental » on peut observer toutes les contraintes appliquées depuis la formation de l'objet transparent anisotrope. Pendant notre projet, nous avons pu prendre des photos lorsque nous avons mis en évidence ce phénomène :

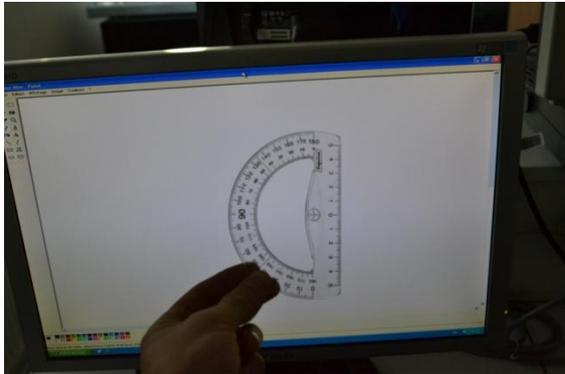


Figure 14 : photo d'un rapporteur sans polariseur

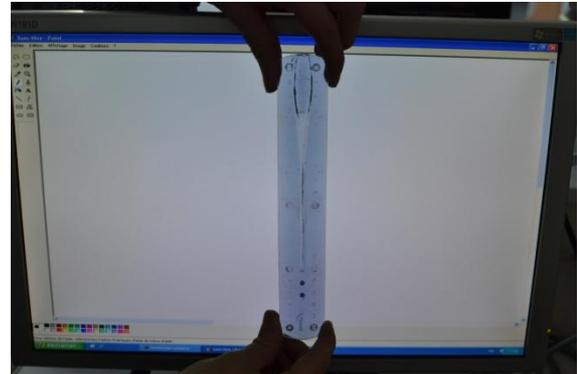


Figure 16 : photo d'une règle sans polariseur



Figure 15 : photo d'un rapporteur avec polariseur



Figure 17 : photo d'une règle avec polariseur

### 3.2.4 Photographie et cinéma 3D

Parmi les usages de la polarisation de la lumière, on retrouve ces deux domaines qui utilisent tous deux les propriétés du changement de polarisation par réflexion.

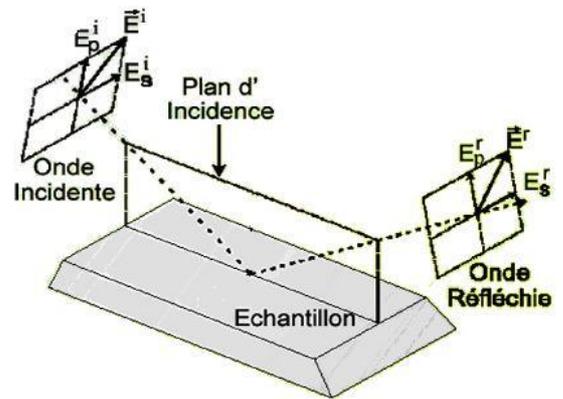
En effet, s'il est impossible pour l'humain de distinguer des changements de polarisation à l'œil nu, l'usage de polariseurs met ces variations en évidence et nous permet de les utiliser. Comme tous scientifiques qui se respectent, nous allons commencer par une explication théorique du changement de polarisation par réflexion, puis nous étudierons deux applications de ce phénomène ; les polariseurs en photographie et le cinéma 3D.

#### *Changement de polarisation par réflexion*

Le principe général est que la lumière, arrivant sur une surface, se trouve plus ou moins réfléchie ou réfractée selon son angle de polarisation. Or, cette lumière étant généralement composée de plusieurs champs électriques polarisés différemment, le rapport entre leurs amplitudes varie donc une fois réfléchi. Ainsi la polarisation globale de la lumière, c'est-à-dire la somme de ces différents champs électriques, s'en trouve modifiée.

## Cours préliminaire

Nous allons à présent étudier quantitativement le phénomène : considérons un champ électrique  $E_i$  formé de deux composantes :  $E_{pi}$  qui est le champ parallèle au plan d'incidence et  $E_{si}$  la composante orthogonale à ce plan. Chacun est réfléchi respectivement en un champ  $E_{pr}$  et  $E_{sr}$ , qui forment  $E_r$ .



On introduit alors les coefficients de réflexion,  $r_p$  et  $r_s$ , tels que :

$$r_p = \frac{E_{pr}}{E_{pi}} = |r_p| \cdot e^{j\delta_p}$$

où  $\delta_p$  et  $\delta_s$  sont les retards des champs électriques induits par réflexion

$$r_s = \frac{E_{sr}}{E_{si}} = |r_s| \cdot e^{j\delta_s}$$

Figure 18 : champ électrique réfléchi dans le plan d'incidence

Ces coefficients sont aussi appelés coefficients de Fresnel, et leur formule s'exprime en fonction de l'angle d'incidence  $\phi_0$  et de réfraction  $\phi_1$  par rapport à la normale, ainsi que des indices complexes de réfraction  $N_0$  du milieu d'où vient le rayon et  $N_1$  sur lequel il est réfléchi :

$$r_p = \frac{N_1 \cos \phi_0 - N_0 \cos \phi_1}{N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1}$$

$$r_s = \frac{N_0 \cos \phi_0 - N_1 \cos \phi_1}{N_0 \cos \phi_0 + N_1 \cos \phi_1}$$

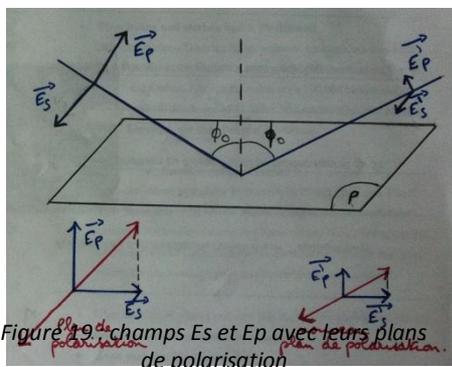


Figure 19 : champs  $E_s$  et  $E_p$  avec leurs plans de polarisation

Passons maintenant à une étude plus qualitative, qui nous sera utile par la suite ; si l'on considère le champ électrique comme un vecteur à deux composantes  $E_s$  et  $E_p$ , qui sont en fait les amplitudes maximales de ce champ dans les directions  $\vec{y}$  et  $\vec{z}$ . Sa réflexion sur une surface, représentée par un plan  $P$ , donne un nouveau champ que l'on appellera  $E'_s$  et  $E'_p$ . On ne considèrera pas le champ réfracté.

Tandis que la composante perpendiculaire au plan d'incidence n'est que faiblement atténuée par la réflexion (en fonction de la proportion réfractée ou absorbée par la surface), la composante parallèle a tendance à être plus diminuée. Le phénomène est complexe à étudier en détail, mais il suffit de savoir qu'il est dû à des interférences destructives entre les rayons incident et réfléchi. C'est grâce à cette différence de taux de réflexion entre les composantes que l'on fait tourner le plan de polarisation.

Cette différence apparaît à certains angles d'incidence plus qu'à d'autres ; on peut envisager un cas comme celui-ci, où la composante parallèle est complètement annulée.

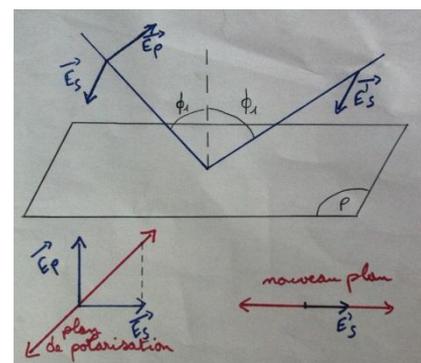


Figure 20 : champs  $E_s$  et  $E_p$  avec leurs nouveaux plans de polarisation

## Exemple d'application numérique

Prenons le cas simple d'un rayon polarisé linéairement, se propageant suivant l'axe des x croissants :

$$\vec{E}_1 = \begin{cases} \vec{E}_x = 0 \\ \vec{E}_y = E_y \cos(\omega t - k_0 \cdot \vec{x}) \\ \vec{E}_z = E_z \cos(\omega t - k_0 \cdot \vec{x}) \end{cases}$$

L'angle de polarisation sera de  $53^\circ$  par rapport au plan d'incidence, ce qui signifie que  $\tan 53^\circ = \frac{E_z}{E_y}$

On notera d'autre part l'absence de déphasage entre  $\vec{E}_y$  et  $\vec{E}_z$ , qui est caractéristique d'une polarisation linéaire. Ainsi, si on propage le rayon dans l'air ( $N_1 = 1,00$ ) et qu'il se reflète sur le verre d'une fenêtre ( $N_2 = 1,33$ ), avec un angle d'incidence de  $32^\circ$ , on aura tout d'abord un angle de réfraction de ;

$$N_1 \sin 32 = N_2 \sin x \quad \text{D'où } x = 23,48^\circ$$

Ainsi on obtient les coefficients de Fresnel suivants :

- $r_p = 0,1$ , donc 10% du rayon incident polarisé parallèlement au plan d'incidence (champ sur l'axe  $\vec{y}$ ) est réfléchi.
- $r_s = -0,18$ , 18% de réflexion du rayon dont le champ se projette sur l'axe  $\vec{z}$ . Le signe négatif signifie que le champ a été déphasé de  $\frac{\pi}{2}$ . En pratique cela ne change rien, du moins pour les applications que nous allons étudier.

Pour obtenir le nouvel angle de polarisation, on calcule le nouveau rapport entre  $E_{rz}$  et  $E_{ry}$  :

$$\frac{E_{rz}}{E_{ry}} = \frac{\sin 53 \times r_s}{\cos 53 \times r_p} = \frac{0,80 \times (-0,18)}{0,60 \times 0,1} = -2,4$$

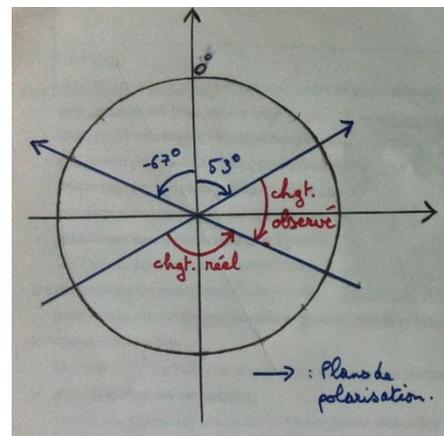
et

$$\arctan(-2,4) = -67^\circ$$

On a donc eu une rotation de  $53 - (-67) = 120^\circ$  du plan de polarisation.

En pratique, on observera une rotation moins importante ; le polariseur indique le plan de polarisation, mais pas sa direction.

Figure 21 : schéma de la rotation du plan de polarisation



## Applications et expériences

### Photographie polarisée

La première application que nous allons étudier est la photographie ; en effet il est souvent peu souhaitable pour un photographe d'avoir d'importants reflets sur les clichés, d'autant plus que ceux-ci proviennent de fortes lumières comme des projecteurs ou le Soleil. Ainsi, pour éviter une surexposition, il faut filtrer ces réflexions. Coup de chance, celles-ci sont souvent polarisées, comme nous venons de le voir ; on peut alors utiliser un polariseur, fixé sur l'objectif.

Notre professeur, amateur de belles photos, en a justement un, et nous avons ainsi pu prendre deux clichés intéressants :

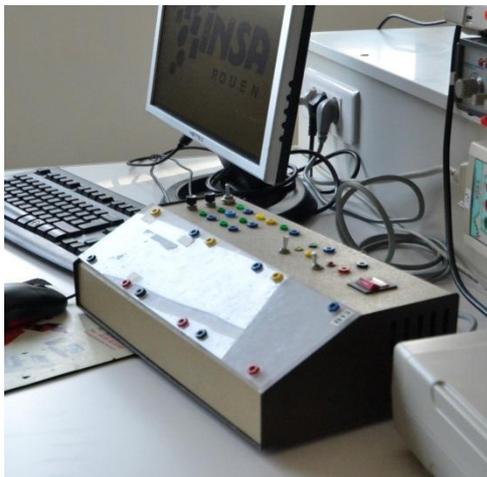


Figure 22 : photo prise sans polariseur



Figure 23 : photo prise avec polariseur

Réalisées sans Photoshop, on remarque que le reflet a été entièrement masqué sur la photo de droite. Si on a pu entièrement la filtrer, c'est que cette réflexion est polarisée presque linéairement.

Comme nous l'avons vu dans la partie théorique, l'une des deux composantes des rayons peut être diminuée par rapport à l'autre après réflexion ; On est ici dans le cas extrême où l'une des composantes n'a pas du tout été réfléchi ; cette situation s'obtient à un angle d'incidence particulier appelé angle de Brewster. Il correspond à l'angle auquel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté. La composante parallèle au plan d'incidence ( $E_{r\parallel}$ ) est alors nulle, tandis que  $E_{i\perp}$  la composante incidente perpendiculaire au plan est seulement en partie réfractée. Il suffit alors d'annuler cette dernière avec un polariseur, tâche aisée du fait de sa polarisation linéaire.

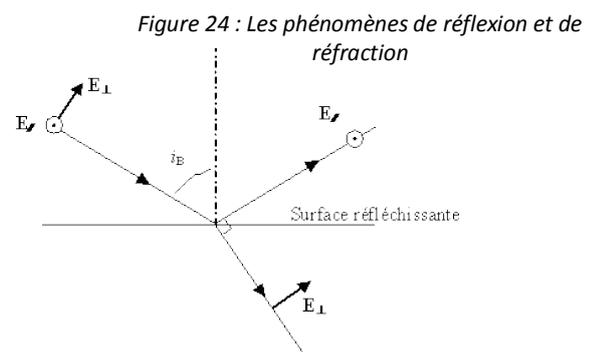


Figure 24 : Les phénomènes de réflexion et de réfraction

Dans la pratique, cela nous aurait permis d'observer ce qu'il y a derrière une vitre, et aussi éviter une tache de surexposition si le soleil brillait davantage. L'utilisation de polariseurs en photographie reste toutefois peu répandue dans le grand public, du fait du coût de ceux-ci et du travail qu'il faut fournir pour en profiter (se placer à l'angle de Brewster par exemple).

## Le cinéma 3 dimensions

L'industrie cinématographique emploie trois différentes méthodes pour offrir une image 3D aux spectateurs. Nous allons brièvement évoquer les deux premières pour nous concentrer ensuite sur la troisième, qui fait appel à la polarisation.

Il faut savoir que dans la vie de tous les jours, on perçoit la vision en relief du fait de l'écartement de nos yeux qui ont donc deux points de vue différents sur ce que l'on observe. Ces deux images sont ensuite interprétées par le cerveau pour créer une représentation spatiale.

Chacune des méthodes repose sur ce même principe ; le film est tourné par deux caméras en même temps, toutes deux éloignées d'une dizaine de centimètres afin de recréer la vision stéréoscopique, tout comme nos yeux font naturellement. On projette ensuite à l'écran les deux images superposées, le problème est alors comment séparer ces deux images et en amener une à chaque œil afin de créer la vision 3D.

- La première méthode consiste à filtrer les deux clichés pour ne garder sur l'une que le rouge, et sur l'autre le vert et le bleu. On superpose les deux images obtenues et le spectateur se munit de lunettes dont les verres sont rouges d'un côté et cyan, c'est-à-dire vert et bleu de l'autre. Chaque image parvient donc à un œil différent et la vision 3D est recrée.
- La seconde méthode est appelée projection alternée ; elle consiste à afficher à l'écran l'image destinée à l'œil droit, puis celle à l'œil gauche, et ainsi de suite 25 fois par seconde. Il faut alors se munir de lunettes synchronisées sur l'alternance des images, de telle sorte que les verres s'obstruent alternativement pour laisser voir la bonne image au bon œil. La fréquence d'alternance est suffisamment élevée pour être imperceptible.
- Enfin, la dernière méthode est la projection polarisée ; on fait appel à deux projecteurs qui sont chacun munis de polariseurs croisés ; chaque image est donc affichée sous une polarisation linéaire, tel que l'angle entre les deux soit droit. Les spectateurs utilisent alors des lunettes munies de polariseurs sur chaque verre ; ils sont croisés l'un par rapport à l'autre, de sorte que chacun ne laisse passer qu'une image à chaque œil.

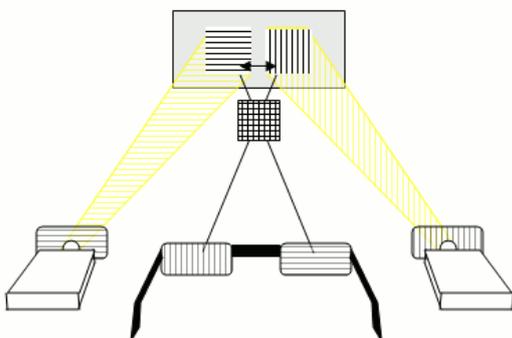


Figure 25 : principe des lunettes 3D

Mais la réflexion sur l'écran n'entraîne-t-elle pas de changements de polarisation ?

Cet effet pourrait être problématique, d'autant plus que tous les spectateurs auraient une polarisation différente, n'étant pas sur le même angle de réflexion...

Le problème est résolu grâce aux propriétés du matériau de l'écran ; en effet certaines surfaces comme les métaux n'ont pas l'effet décrit dans les parties précédentes.

Cela est dû à leur opacité ; leur indice de réfraction est uniquement imaginaire, ce qui fait d'eux de simples réflecteurs qui déphasent le champ électromagnétique lors de la réflexion.

Par ailleurs, on pourrait penser que l'image observée ne serait plus bonne à voir si l'on incline la tête de côté, car les deux polariseurs capteraient les deux images en même temps. Nous avons fait l'expérience en allant au cinéma, et le résultat n'est pas gênant.

Rappelons-nous du principe du polarimètre ; la plage d'angle du polariseur est très petite, où l'on observe le rond et la raie au milieu avec la même intensité. Le même effet se produit dans notre cas, c'est-à-dire que soit une image soit l'autre est largement dominante dans chaque œil, à l'exception d'un angle très précis où elles se superposeraient. Mais cet angle est trop précis pour être trouvé en inclinant juste la tête. Et puis de toute façon, à moins de vouloir passer pour un fou et avoir un torticolis, vous n'y serez pas confronté.

## 4. Conclusion

Dans un premier temps, nous tenons à remercier notre enseignant responsable, Jérôme YON pour son aide précieuse tout au long de ce projet.

Ce projet nous aura tout d'abord permis de mieux comprendre ce qu'était la polarisation, un terme simple au premier abord mais qui révèle rapidement quand on s'y intéresse de nombreuses facettes qui font que l'on peut s'y perdre rapidement. Après avoir revu toute la théorie concernant la polarisation (dont nous avons déjà abordé pas mal de points en P4-2), les expériences que nous avons réalisées nous ont permis d'une part de mieux comprendre la partie théorique, et d'autre part de voir les applications de la polarisation et d'expliquer des phénomènes courants grâce à celle-ci.

D'autre part, qui dit projet dit travail en groupe, ainsi nous avons pu une nouvelle fois nous adonner au travail collectif, qui permet une confrontation des idées et points de vue, et est donc très enrichissant pour chacun. Même si nous ce n'est pas toujours évident de travailler en groupe, cela reste très important pour notre avenir en tant qu'ingénieurs et nous préparer le plus tôt est donc indispensable.

## 5. Bibliographie / Crédits d'illustrations

<http://tpe-feu-d-artifice.e-monsite.com/medias/images/spectrelum-2.jpg>  
<http://airylab.com/Images-optipedia/1-caracterisation-lumiere/onde%20electromagnetique.png>  
<http://www.cfht.hawaii.edu/~manset/Naturelle.gif>  
<http://www.svt-monde.org/local/cache-vignettes/L365xH500/polarisation-2-c8efd.png>  
<http://biochimiedesproteines.espaceweb.usherbrooke.ca/Polarisation.gif>  
<http://www.astuces-pratiques.fr/images/articles/24/la-polarisation-de-la-lumiere-5.jpg>  
<http://physique.coursgratuits.net/optique-ondulatoire/img/electr1450.gif>  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/imgpho/polcls.gif>  
<http://s1.e-monsite.com/2009/03/21/24981222456-jpg.jpg>  
[http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/birefringence/theorie\\_birefringence.htm](http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/birefringence/theorie_birefringence.htm)  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Polarisation\\_%28optique%29](http://fr.wikipedia.org/wiki/Polarisation_%28optique%29)