

MP14 - POLARISATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

13 mars 2015

"Il a atteint des sommets inégalés."

Thibaud TROLLIET & Romain ALBERT

MAX PLANCK

Commentaires du jury

2014 : Ce montage permet d'explorer les ondes électromagnétiques au-delà de la gamme spectrale de l'optique. Le jury constate que la loi de Malus est souvent mal réalisée et mal exploitée ; les candidats gagneraient à réfléchir au choix de la source : spectrale, blanche avec filtre, laser polarisé ou non polarisé. Enfin, il faut connaître le principe des polariseurs utilisés, que ce soit des polariseurs dichroïques ou de simples grilles dans le cas des ondes centimétriques.

Jusqu'en 2013, le titre était : Production et analyse d'une lumière polarisée.

2010 à 2013 : Il s'agit ici d'étudier les propriétés des ondes lumineuses. Il est indispensable de différencier, si possible par des expériences, polarisation partielle et polarisation elliptique, même remarque pour la lumière naturelle et polarisation circulaire. [...] Il faut connaître le principe de fonctionnement du détecteur utilisé (photodiode, luxmètre).

2009 : Contrairement au montage précédent (Milieux optiquement actifs : biréfringence et pouvoir rotatoire), il s'agit ici d'étudier les propriétés des ondes lumineuses.

1999 : Il est intéressant d'analyser la lumière produite dans des conditions non artificielles réflexion sur un miroir métallique, sur un dioptre en incidence quelconque ...

Bibliographie

✦ *Optique expérimentale*, **Sextant**

→ Parce que

✦ *Optique expérimentale*, **Duffait**

→ Parce que aussi

Expériences

- ✦ Polarisation des ondes centimétriques sur un banc hyperfréquence
- ✦ Loi de Malus en optique
- ✦ Angle de Brewster et facteur de polarisation
- ✦ Cinéma 3d

Table des matières

1	Polarisation des ondes centimétriques : loi de Malus	2
2	Polariseur dichroïque : influence de la longueur d'onde	3
3	Polarisation par réflexion	4
3.1	Angle de Brewster	4
3.2	Taux de polarisation de l'onde transmise	4
4	Production et utilisation de polarisations circulaires	5
4.1	Onde polarisée circulairement	5
4.2	Cinéma 3d	5

Introduction

La polarisation des ondes électromagnétiques est multiple : elle peut être rectiligne, circulaire (droite ou gauche) ou elliptique. Elle peut également ne pas en posséder : la lumière naturelle ne possède par exemple pas de polarisation, le vecteur \vec{E} se déplaçant de manière aléatoire dans le plan d'onde. Nous nous proposons d'étudier la polarisation de différentes ondes électromagnétiques en nous concentrant dans un premier temps sur la polarisation rectiligne, la plus simple à produire et à analyser. Ensuite nous verrons comment il est possible de produire des ondes polarisées circulairement et elliptiquement, et étudierons une de ses applications courantes.

1 Polarisation des ondes centimétriques : loi de Malus

Dans les guides d'ondes rectangulaires que l'on utilise couramment, seul le mode $TE_{1,0}$ peut se propager, les fréquences de coupure des autres modes étant supérieures à la fréquence maximale de l'oscillateur. La structure de l'onde dans le guide d'onde est donc :

$$\vec{E} = E_0 \exp(i(\omega t - kz)) \vec{u}_y \quad (1)$$

où les vecteurs sont représentés sur la figure 1. Lorsque cette onde va être émise dans l'air, elle va conserver sa polarisation. On utilise un cornet afin de maximiser l'énergie transmise.

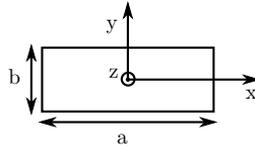


FIGURE 1 – Géométrie du guide

Le récepteur est au sein d'un guide d'onde identique, mais qui va être incliné d'un angle α (comme représenté à la figure 2). La seule propagation possible au sein du guide est celle du mode $TE_{1,0}$, c'est-à-dire une onde polarisée dans la direction \vec{u}'_y . On peut envisager l'existence d'une onde évanescente, donc polarisée orthogonalement à l'entrée du guide, mais cette onde n'est pas problématique car notre récepteur est une antenne qui ne capte qu'une seule polarisation.

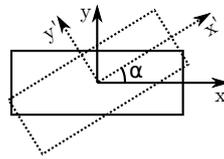


FIGURE 2 – Position des deux guides : le guide en trait plein est le guide émetteur, l'autre le guide récepteur.

Lorsque l'onde incidente arrive sur le guide, il va y avoir projection du champs incident sur la direction \vec{u}'_y . Le champ dans le guide va donc être de la forme :

$$\vec{E}_{recepteur} = E'_0 \exp(i(\omega t - kz)) (\vec{u}_y \cdot \vec{u}'_y) \vec{u}'_y = E'_0 \exp(i(\omega t - kz)) \cos \alpha \vec{u}'_y \quad (2)$$

Le récepteur que l'on utilise n'est pas sensible au champ mais au carré du champ, c'est-à-dire à la puissance transmise. La tension mesurée en sortie du récepteur devrait donc vérifier la loi suivante, appelée loi de Malus :

$$U(\alpha) = U_0 \cos^2 \alpha \quad (3)$$

Dans la pratique, ce n'est pas le cas ici car le détecteur n'est pas linéaire en puissance. On va cependant arriver à contourner ceci en utilisant l'atténuateur calibré. Cet atténuateur nous permet de faire varier la puissance émise selon la relation :

$$A(dB) = 10 \log \left(\frac{P_{emis}}{P_0} \right) \quad (4)$$

Notons ici que l'atténuateur se contrôle avec une vis micrométrique, il est donc nécessaire de se mettre à une fréquence où l'atténuateur est calibré (ici 9GHz), et de modéliser la calibration pour interpoler l'atténuation à chaque position de la vis micrométrique.

On va donc travailler à tension fixée sur le récepteur en mesurant l'atténuation nécessaire pour l'atteindre, puis on va reconstruire la tension mesurée en utilisant la formule ¹ :

$$U = U_{ref} 10^{A/10} \quad (5)$$

1. Notons que l'inverse du log est 10^x et non $\exp x$...

Loi de Malus sur un banc hyperfréquence



⊖ 15 mins

On va mesurer des angles séparés de 10° (Rq : il va nous être impossible de mesurer la puissance transmise pour 90° car on ne dispose pas assez de dynamique, notre atténuateur ne pouvant atténuer plus de $40dB$). On commence par mesurer le champ à 80° où notre atténuation est la plus faible pour fixer notre tension de référence. On fait en sorte d'avoir une tension de référence facile à retrouver avec une atténuation de l'ordre du décibel. Ensuite, on fait les mesures pour les autres angles en notant la valeur de l'atténuation à chaque fois. Pour minimiser l'impact de l'erreur sur le 0 de la mesure d'angle, il faut procéder à une mesure à $+\alpha$ et à $-\alpha$ puis faire la moyenne. On annule ainsi l'erreur au premier ordre. On trace la tension reconstruite en fonction de $\cos^2 \alpha$ et on obtient une droite pas trop mauvaise.

Pour que cette manipulation fonctionne correctement, il faut être très attentif à la position des éléments du montage. La moindre modification de la position des cornets d'émission ou de réception modifie significativement la tension mesurée. La principale autre source d'incertitude difficilement quantifiable est liée à la rotation du cornet de réception qui ne se fait pas forcément exactement dans l'axe du cornet d'émission.

On peut ici sortir une grille et montrer comment l'onde est transmise lorsque la grille est orthogonale au champ, et est réfléchi lorsqu'elle est parallèle au champ. Ceci permet de faire une transition sur les différents types de polariseurs qui existent.

↓ Dans le système que nous venons d'étudier, la polarisation de l'émetteur et du récepteur provient de la nature guidée de l'onde et de la polarisation de l'antenne émettrice ou réceptrice. Nous allons maintenant étudier un dispositif qui permet de polariser une onde quelconque.

2 Polariseur dichroïque : influence de la longueur d'onde

La lumière naturelle ne possède pas de polarisation, le champ \vec{E} possède un mouvement aléatoire dans le plan d'onde. Pour obtenir une polarisation contrôlée, on a recours à des polariseurs qui permettent de produire une polarisation rectiligne. Les polariseurs que l'on utilise en optique sont des polariseurs dichroïques, c'est-à-dire qu'il y a un axe où l'absorption est beaucoup plus élevée que l'autre axe. En sortie, on obtient une onde polarisée rectilignement, et dont l'intensité a été divisée par deux.

On pourrait se placer dans le visible et vérifier la loi de Malus. Comme on vient de le faire, on va plutôt s'intéresser à une autre caractéristique de ces polariseurs. Ces derniers ne peuvent pas polariser parfaitement les ondes incidentes ; en sortie d'un polariseur rectiligne selon \vec{u}_x , le champ à position spatiale fixée vérifie :

$$\vec{E}(t) = E_p(t)\vec{u}_x + \vec{E}_{np}(t) \quad (6)$$

où $\vec{E}_{np}(t)$ est la partie qui n'a pas été polarisée et qui varie de manière aléatoire. On a alors au coefficient de transmission en intensité lorsque les deux polariseurs sont croisés (H_{90}), et lorsqu'ils sont alignés (H_{00}). Ces coefficients varient en fonction de la longueur d'onde, et nous allons mesurer ces variations.

Calcul de H_{90} et H_{00} en fonction de la longueur d'onde



⊖ 5 mins

On fait le montage suivant : lampe, anticalorique, deux polariseurs et un spectromètre. Il est nécessaire de placer les polariseurs loin de la lampe pour que les angles d'incidence soit petits ($< 10^\circ$). On fait un spectre avec les deux polariseurs alignés et un spectre avec les deux croisés. On fait également un spectre en l'absence des polariseurs. Il est à noter qu'il est nécessaire d'utiliser le même temps d'exposition à chaque fois et d'activer la correction de linéarité du capteur en fonction de la longueur d'onde.

On trace ensuite, à l'aide de python par exemple, les coefficients H_{00} et H_{90} . On peut faire plusieurs remarques :

- On observe que le coefficient de transmission lorsque les polariseurs sont alignés est de l'ordre de $1/2$ mais qu'il varie assez peu dans le domaine 500 nm , 700 nm .
- Le coefficient de transmission entre 500 nm et 700 nm varie assez peu lorsque les polariseurs sont croisés, il est de l'ordre de un millième, ce qui est le bon ordre de grandeur pour les polariseurs dont on dispose.
- Pour les grandes longueurs d'ondes, le coefficient de transmission augmente beaucoup (pour les polariseurs croisés) ; il faut donc couper les grandes longueurs d'onde lorsque l'on utilise ce type de polariseur. C'est pourquoi lorsque l'on vérifie la loi de Malus en optique, il est bon d'utiliser un filtre interférentiel pour éviter un offset impossible à annuler.

↓ Nous venons d'étudier le taux de polarisation des polariseurs dichroïques ; il nous manque encore une information sur ces polariseurs, qui est la direction de polarisation : l'angle de Brewster va nous permettre de le déterminer.

3 Polarisation par réflexion

3.1 Angle de Brewster

Lorsqu'une onde arrive sur un diélectrique, elle est partiellement réfléchi, et cette réflexion possède une polarisation partielle que l'on peut mettre en évidence avec un polariseur dichroïque. On peut distinguer deux polarisations : celle qui est dans le plan d'incidence (parallèle) et celle orthogonale au plan d'incidence. On montre qu'à un angle précis, appelé angle de Brewster i_B , la polarisation parallèle s'annule complètement. Cet angle vérifie :

$$\tan i_B = n \quad (7)$$

On peut remarquer que cette propriété nous permet d'identifier avec certitude la direction de l'onde en sortie d'un polariseur.

Mesure de l'indice avec l'angle de Brewster

♣ Sextant p270

⊖ 5 mins

Sur une lame de verre placée sur un rapporteur rotatif, on envoie de la lumière polarisée dans le plan d'incidence, dont on a limité l'extension spectrale à l'aide d'un polariseur. On recherche la position du minimum d'intensité en fonction de l'angle d'inclinaison de la lame. On en déduit l'angle de Brewster, ici $i_B = 57^\circ$ plus ou moins $\Delta i_B = 2^\circ$.

On peut ensuite en déduire l'indice n . L'incertitude sur cette mesure vaut :

$$\Delta n = \frac{\Delta i_B}{\cos^2 i_B} \quad (8)$$

On a donc comme résultat de mesure : $i_B = 1.5 \pm 0.1$. La faible précision vient de la difficulté à repérer précisément le minimum de l'intensité.

↓ On peut utiliser les caractéristiques de la réflexion à l'angle de Brewster pour produire une onde polarisée.

3.2 Taux de polarisation de l'onde transmise

On définit le taux de polarisation d'une onde comme :

$$\tau_p = \frac{\langle E_p^2(t) \rangle}{\langle \vec{E}_{np}^2(t) \rangle} \quad (9)$$

avec $E_p(t)$ et $\vec{E}_{np}(t)$ introduits à la partie précédente.

En sortie d'une lame inclinée à l'angle de Brewster, la lumière est partiellement polarisée car une partie de la lumière orthogonale au plan d'incidence a été réfléchi, alors qu'elle a été totalement transmise dans le plan d'incidence. La lumière transmise est donc partiellement polarisée dans le plan d'incidence, et si on multiplie le nombre de lame, on va augmenter le taux de polarisation de la lumière. Le coefficient de réflexion pour la partie orthogonale au plan d'incidence est $R_O \approx 0.15$; le taux de polarisation en sortie de N lame peut donc s'écrire :

$$\tau_p = \frac{1 - (1 - R_O)^{2N}}{1 + (1 - R_O)^{2N}} \quad (10)$$

que l'on peut réécrire sous la forme :

$$\ln\left(\frac{1 - \tau_p}{1 + \tau_p}\right) = 2N \ln(1 - R_O) \quad (11)$$

qui permet de se ramener à une loi linéaire de coefficient directeur $2N \ln(1 - R_O)$.

Polarisation en fonction du nombre de lame

⚡ Sextant p271

⊖ 5 mins

On mesure le taux de polarisation en fonction du nombre de lame.

On réutilise le montage précédent en enlevant le polariseur : la lampe QI passe par un filtre interférentiel puis une fente pour arriver sur les lames de verre placées en incidence de Brewster. On place derrière elles un polariseur qui permet de prendre des mesures en polarisation directe et orthogonale à chaque fois. L'intensité lumineuse est réceptionnée sur une photodiode reliée à un voltmètre. On a ainsi le taux de polarisation en considérant la photodiode linéaire.

On fait les mesures des deux polarisations en ajoutant une lame à chaque fois (attention les nettoyer pour éviter la diffusion!).

On peut ainsi remonter à R_0 en regardant le coefficient directeur ; on trouve expérimentalement $R_O = 0.12$; la valeur attendue est de l'ordre de 0.15.

↓ *Nous nous sommes concentrés sur la production et l'analyse de la polarisation rectiligne, il est temps d'aborder les autres types de polarisation qui peuvent exister.*

4 Production et utilisation de polarisations circulaires

4.1 Onde polarisée circulairement

Lorsque le vecteur \vec{E} dessine un cercle dans le plan d'onde, on dit que l'onde est polarisée circulairement. En fonction de son sens de rotation, elle peut être polarisée circulairement gauche ou droite. Par définition, une onde est polarisée circulairement gauche lorsque le vecteur \vec{E} tourne dans le sens trigonométrique lorsque l'on regarde l'onde arriver vers nous ; dans le cas contraire, elle possède une polarisation circulaire droite.

Pour produire une telle onde, on emploie généralement une lame quart d'onde. Ce type de lame est constitué d'une milieu biréfringent uniaxe dont l'axe optique est dans le plan de la face d'entrée. Ce type de lame possède donc deux axes : un axe rapide et un axe lent. La lame quart d'onde est taillée de telle manière qu'une onde qui la traverse adopte un déphasage de $\pi/2$ entre l'axe rapide et l'axe lent, C'est-à-dire que la partie de l'onde polarisée selon l'axe rapide possède une avance de $\lambda/4$ sur la partie polarisée selon l'axe lent. Il est important de faire ici quelques remarques :

- Un lame quart d'onde ne l'est que pour une longueur d'onde donnée.
- Cette lame quart d'onde ne l'est que pour une incidence normale ; en cas d'incidence oblique, la lame ne l'est plus rigoureusement.

ces deux remarques auront des conséquences lorsque l'on discutera de la mise en œuvre dans un cas pratique.

Considérons une onde polarisée rectilignement qui arrive en incidence normale sur une lame quart d'onde. Si cette onde est polarisée selon un des axes de la lame, il ne va pas y avoir de modification de la polarisation de l'onde incidente. On peut utiliser cette propriété pour identifier les axes rapides et lents de la lame, mais on ne peut cependant pas distinguer l'axe lent de l'axe rapide avec cette méthode. Il n'existe pas de méthodes simples pour déterminer quel axe est le rapide (Dettwiller a proposé une méthode dans un BUP utilisant un interféromètre de Mach Zender mais ceci sort du cadre de ce montage). L'autre cas particulier est lorsque l'onde est polarisée à 45° des axes de la lame. Dans ce cas, on produit une onde polarisée circulairement, droite ou gauche en fonction de la position des axes rapide et lent. Dans le cas général, c'est une onde polarisée elliptiquement qui est produite.

Il existe également des lames demi-ondes qui induisent un déphasage de π , et qui peuvent être utilisées pour transformer une onde polarisée circulairement droite en une gauche et vis-versa. Nous n'en utiliserons pas dans la suite.

↓ *Maintenant que les polarisations circulaires n'ont plus aucun secrets pour nous, nous allons utiliser ces connaissances pour entrer dans le monde du 7^{ème} art.*

4.2 Cinéma 3d

Le principe du cinéma 3d actuellement utilisé consiste à projeter deux images différentes prises de deux points de vue différents, ces deux points de vue étant conçu pour que leur écartement corresponde à l'écartement moyen entre les yeux d'un humain. Le cerveau va alors reconstruire la scène en 3d de manière identique à ce qu'il fait habituellement.

Pour que chaque oeil reçoive la bonne image, on pourrait imaginer polariser les 2 points de vue avec deux polarisations rectilignes orthogonales et faire porter au spectateur des lunettes constituées de deux analyseurs croisés comme

le verre. Le problème est que dès que le spectateur va incliner la tête, chaque oeil va recevoir un peu de l'image dirigée vers l'autre oeil et voir donc flou.

La technique utilisée dans le cinéma 3d passif est celle des polarisations circulaires : on polarise circulairement gauche un point de vue et circulairement droite l'autre. Le spectateur possède cette fois des lunettes qui font une analyse de polarisation circulaire : chaque "verre" de ses lunettes possèdent une lame quart d'onde suivie d'un analyseur classique, ces deux couches étant arrangé différemment suivant l'oeil.

Cinéma 3d

🔗 My brain

⌚ 10 mins

On dispose de deux vidéoprojecteurs ; on commence par superposer précisément leurs images (c'est l'étape la plus longue, qui nécessite de jouer sur la correction de déformations des vidéoprojecteurs). Il est à noter que ce réglage est plus simple lorsque l'écran est éloigné.

Une fois que ce réglage est réalisé, on peut attaquer la discussion physique. Les vidéoprojecteurs utilisent ici trois LCD pour les trois couleurs primaires, qui sont recombinaisons avant d'être projetées sur l'écran. Les LCD sont polarisées rectilignement en sortie, et ici chaque couleur primaire possède une polarisation différente. On va donc mettre un polariseur qui va projeter les différentes couleurs sur une seule direction ; ce réglage se fait en ajustant la couleur observée à l'écran, il faut que le blanc soit le plus blanc possible. En pratique il reste un surplus de bleu, mais ce n'est heureusement pas très visible et donc peu gênant.

On va ensuite ajouter une lame quart d'onde et chausser des lunettes de cinéma 3d pour faire le réglage. On va également modifier l'écran que l'on a utilisé jusqu'à maintenant : en effet, il nous faut un écran qui conserve la polarisation, c'est-à-dire un écran conducteur, ici ce sera une plaque d'aluminium. On règle les deux vidéoprojecteurs séparément. On allume uniquement le vidéoprojecteur pour l'oeil gauche, on tourne la quart d'onde de telle manière à annuler la lumière arrivant dans l'oeil droit avec les lunettes. On fait l'inverse avec le deuxième vidéoprojecteur. On en profite pour montrer comment le caractère droite ou gauche s'inverse lorsque la lumière est réfléchi par la plaque d'aluminium.

Maintenant que chaque vidéoprojecteur projette une image spécifique à un oeil, il ne reste plus qu'à les connecter à un pc disposant de deux sorties vidéos. On va projeter le film d'animation 3d libre (Elephant dream) ; sur la vidéo les deux points de vue sont côte à côte. Il ne reste plus qu'à paramétrer VLC pour diviser le film sur deux fenêtres (dans les filtre de VLC) et de les superposer sur l'écran. Il ne reste alors plus qu'à apprécier ce court métrage.

On peut remarquer que les deux images ne sont pas parfaitement annulées sur les deux yeux. Ceci est dû à deux phénomènes : l'écran ne transmet pas parfaitement la polarisation incidente, et les lames quart d'onde que l'on utilise ne le sont qu'à une longueur d'onde particulière (milieu du spectre). Les ondes reçues sont donc partiellement elliptiques, et l'analyse circulaire ne fonctionne pas parfaitement.

Conclusion

Nous venons d'étudier ensemble différentes propriétés de la polarisation des ondes électromagnétiques, ainsi que les différentes polarisations possibles, et avons vu quelques applications possibles de celles-ci. Cette propriété de la lumière a de nombreuses applications courantes ; on pourra citer par exemple son utilisation dans la photographie : la lumière du soleil étant en partie polarisée, l'utilisation de polariseurs permet d'assombrir le ciel et permet ainsi d'augmenter le contraste.