

MP14 – POLARISATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

17 mars 2016

"On a beau avoir une santé de fer, on finit toujours par rouiller."

Sophie Michel & Maxime Lombart

JACQUES PRÉVERT

Commentaires de jury

- **2015** : 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.

Bibliographie

- ↗ *Sextant* → Pour les manip
- ↗ *Duffait* → Pour les manip
- ↗ *Notice du banc hyperfréquence* → Pour les manip sur les ondes centimétriques
- ↗ *Houard* → Revoir les notions clés
- ↗ *Sanz PC ancien programme* → Il y a un chapitre TP-cours sur le sujet, qui permet de revoir les bases de la polarisation rapidement

Expériences

- ☞ Loi de Malus sur des ondes centimétriques (banc hyperfréquence)
- ☞ Angle de Brewster
- ☞ Etude d'une polarisation elliptique

Table des matières

1	Polarisation des ondes centimétriques : Loi de Malus	2
2	Polariseur dichroïque	3
3	Polarisation par réflexion vitreuse	4
3.1	Angle de Brewster	4
3.2	Polarisation de la lumière transmise	4
4	Étude d'une polarisation elliptique	5

Introduction

Aujourd'hui nous allons nous intéresser à la polarisation des ondes électromagnétiques. Il est possible de faire une expérience simple, on éclaire un polariseur à l'aide d'une lampe quartz iode, puis on place un analyseur, on les croise, il y a extinction ! Le phénomène ne peut pas s'expliquer par le caractère scalaire de la lumière, il s'agit d'une propriété vectorielle.

Il existe plusieurs types de polarisation, rectiligne, circulaire ou encore elliptique. Toutefois, toutes les ondes ne sont pas polarisées (ex : la lumière naturelle). Il faut donc distinguer les polarisations totales, et partielles. Nous allons au cours de ce montage étudier différents moyens expérimentaux permettant de polariser une onde, et d'analyser la polarisation produite.

1 Polarisation des ondes centimétriques : Loi de Malus

Nous allons tout d'abord nous intéresser aux ondes centimétriques. Pour cela nous allons utiliser un banc hyperfréquence. Une onde centimétrique créée par générateur hyperfréquence se propage dans un guide d'onde, dont les dimensions de la cavité impose que seul le mode TE_{10} se propage selon la direction u_y . L'onde est donc polarisée directement à la sortie du banc hyperfréquence.

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

Le récepteur possède la même cavité que l'émetteur, de sorte qu'encore une fois seule le mode TE_{10} se propage. Le récepteur joue donc le rôle d'analyseur.

Il est donc possible de vérifier la loi de Malus, en tournant le récepteur d'un angle α , ainsi :

$$E_{\text{récepteur}} = E_0' \cos(i(\omega t - kz)) (\vec{u}_y \cdot \vec{u}_y') \vec{u}_y' = E_0' \cos(i(\omega t - kz)) \cos(\alpha) \vec{u}_y'$$

Or le récepteur est sensible à la puissance transmise, on retrouve l'expression de la loi de Malus, et la tension mesurée par le récepteur suit la loi suivante :

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

Cependant comme la réponse du récepteur n'est pas linéaire, nous allons devoir utiliser l'atténuateur pour résoudre ce problème. L'atténuateur permet de faire varier la puissance émise de la façon suivante :

$$A(\text{dB}) = 10 \log\left(\frac{P_{\text{émise}}}{P_0}\right)$$

En travaillant à tension reçue par le récepteur fixée U_{ref} , on a la relation suivante :

$$U = U_{\text{ref}} 10^{\frac{A}{20}}$$

Loi de Malus

🔧 Notice du banc

⌚ 10 min

Le but de la manip est de vérifier la loi de Malus pour des ondes centimétriques. Pour cela, il faudra :

- Banc hyperfréquence
- Potence + rapporteur en papier coller à la tige + curseur = tige + pied d'optique

Il faut monter le banc hyperfréquence (générateur, modulateur, atténuateur, cornet). Puis monter le récepteur (cornet, TGN 100, multimètre) sur une potence, bricoler un peu pour pouvoir lire la valeur de l'angle α , nous avons choisit de coller un rapporteur en papier sur la pince qui va tourner en même temps que le récepteur, et positionner un curseur fixe sur la table.

On espace l'émetteur et le récepteur d'une vingtaine de centimètres. Il faut faire attention à tout aligner correctement. On choisit une valeur fixe de la tension reçue par le récepteur, ici on a choisit 0.1 V. Puis on tourne d'un angle α , la valeur de la tension change, on joue sur l'atténuateur pour la ramener à 0.1 V, et on note l'atténuation correspondante.

Nous avons fait des points tous les 10 degrés. De plus pour minimiser l'erreur systématique de la position du zéro, on procède à la mesure de A pour $+\alpha$ et $-\alpha$, puis on fait la moyenne des deux.

On trace U en fonction de α , on obtient une droite !

Pour les incertitudes, celle sur l'angle de rotation est importante $\Delta\alpha = 2^\circ$ (malgré le dispositif super élaboré!!)

Pour avoir accès à l'atténuation, on utilise une vis micrométrique, puis à l'aide d'une courbe d'étalonnage on a accès à A, l'incertitude de lecture sur la vis micrométrique est de 0.01mm . L'incertitude de lecture sur la courbe d'étalonnage est plus importante, nous l'avons estimé à $\Delta A = 0.25\text{dB}$.

Pour la réduire il faudrait refaire l'étalonnage mm/dB sur ordinateur et modéliser la courbe sur ordinateur, mais ça semble compliqué à faire dans les 4 heures de préparation.

↓ Pour amener la notion de polariseur dichroïque, on peut montrer rapidement l'effet d'une grille sur l'onde reçue.

2 Polariseur dichroïque

Pour polariser une lumière naturelle, on utilise un polariseur, les plus utilisés sont les polariseurs dichroïque. Une substance dichroïque absorbe de manière très inégale les vibrations selon leur direction.

Dans cette partie nous allons étudier les caractéristiques d'un polariseur dichroïque en déterminant les coefficients de transmission d'un couple de polariseur dans les configurations croisée (H_{90}), ou parallèle (H_0).

Un polariseur parfait correspond aux coefficients de transmission suivant : $H_0 = 1/2$ et $H_{90} = 0$ quelque soit la longueur d'onde de la lumière incidente

Étude d'un polariseur dichroïque

🔧 Sextant

⌚ 5 min

- Quartz Iode
- 2 polariseurs
- spectro

On place la lampe assez loin des polariseurs, à environ cinquante centimètres, pour avoir des angles d'incidence assez faible, et se placer dans les angles d'acceptance du polariseur.

Tracer le spectre de la lumière blanche seule I , puis des polariseurs en configuration parallèle I_0 et croisée I_{90} sans changer les paramètres d'acquisition. Il suffit alors de tracer à l'aide de latis pro, par exemple, $H_0 = \frac{I_0}{I}$ et $H_{90} = \frac{I_{90}}{I}$.

On observe sur nos graphiques que H_{90} est très faible de l'ordre de $1/1000$, que $H_0 = 0.30$, et que ces valeurs sont constantes dans le domaine spectral du visible. Ce qui n'est pas le cas dans l'infrarouge.

3 Polarisation par réflexion vitreuse

3.1 Angle de Brewster

Lorsqu'une onde arrive à la surface d'un diélectrique d'indice n , elle est partiellement réfléchi. Le coefficient de réflexion dépend de l'angle d'incidence et aussi de la polarisation de l'onde incidente. Il existe une incidence particulière, pour un angle $i_B = \arctan(n/n_{air})$, pour lequel s'annule le coefficient de réflexion correspondant à une polarisation dans le plan d'incidence.

Détermination de l'angle de Brewster

⚡ Sextant

⊖ 5 min

Le but de la manip est de mettre en évidence le phénomène de polarisation par réflexion, puis de déterminer l'angle de Brewster pour remonter à l'indice du verre :

- Laser
- Deux polariseurs (P 119/2)
- Plaque tournante muni d'un rapporteur
- lame de verre et support

Il faut bien vérifier que le support tournant et horizontal, puis placer la plaque de manière à ce que l'angle d'incidence de laser coïncide avec le zéro de la plaque tournante. Après on ne touche plus à rien ! Il faut aussi penser à bien laver la lame de verre pour éviter les phénomènes de polarisation par diffusion. Dernière petite astuce, pour s'assurer que rien ne bouge lors des manips, si vous êtes un peu maladroit ou beaucoup trop stressé, on peut fixer le support de la lame sur la plaque avec du scotch, et la plaque sur le boy de la même manière, avec ça aucun risque de décalage du zéro !

On analyse la lumière réfléchi et transmise par la lame de verre afin de mettre en évidence le phénomène de polarisation partielle de l'onde réfléchi à la surface du verre.

Puis on utilise une lumière polarisée dans le plan d'incidence, et on cherche l'angle pour lequel il n'y a aucune lumière réfléchi : c'est l'angle de Brewster i_B

La lecture de l'angle est peu précise (limite du dispositif) $\Delta i_B = 1^\circ$

On trouve un indice du verre de $n = \dots \pm \dots$

On peut utiliser cette méthode pour déterminer l'axe d'un polariseur.

Application dans la vie courante : les verres de lunettes.

↓ *Un dioptre éclairé sous incidence de Brewster constitue donc un polariseur rectiligne de faible rendement, nous allons nous intéresser maintenant à la polarisation de la lumière transmise*

3.2 Polarisation de la lumière transmise

Sous incidence de Brewster, la lumière transmise par une lame de verre est partiellement polarisée dans le plan d'incidence. A chaque passage de dioptre le faisceau est épuré de R_\perp de la composante polarisée perpendiculairement au plan d'incidence, qui est réfléchi, tandis que la composante parallèle est intégralement transmise. Ainsi le taux de polarisation du faisceau après avoir traversé N lames, vaut donc :

$$\eta = \frac{1 - (1 - R_\perp)^{2N}}{1 + (1 - R_\perp)^{2N}}$$

Qui peut s'écrire comme $\ln\left(\frac{1-\eta}{1+\eta}\right) = 2\ln(1 - R_\perp)N$

Polarisation de la lumière transmise

☞ Sextant

⊖ 5 min

Le but de la manip est de mettre en évidence le phénomène de polarisation par réflexion multiple

- Laser polarisé
- Deux polariseurs (P 119/2)
- Plaque tournante muni d'un rapporteur
- Lames de verre (6) et support en bois
- Photo-diode + multimètre

Même dispositif que précédemment, on se place à l'angle de Brewster, et en lumière polarisée à 45 degrés du plan d'incidence, on va ajouter au fur et à mesure des lames de verres (bien propres) sur le support, et étudier la lumière transmise par ce dispositif à l'aide d'une photodiode.

On mesure pour chaque configuration, I_{\parallel} , et I_{\perp} qui correspondent aux positions du polariseur dans le plan d'incidence et perpendiculairement à celui-ci.

Ainsi on a accès à $\eta = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$

On trace ensuite $\ln\left(\frac{1-\eta}{1+\eta}\right)$ en fonction de N. Le coefficient directeur vaut : $2\ln(1 - R_0)$ Ainsi $R_0 = \dots$

On peut comparer R_0 à son expression théorique $R_0 = \left(\frac{n^2-1}{n^2+1}\right)^2$ soit pour le verre $R_{\perp} = 0.15$

Ce dispositif n'est pas utilisé en pratique, mais le principe de polarisation par transmission multiple est mis à profit pour polariser les lasers.

↓ *Après avoir étudié les moyens de créer et d'analyser une polarisation rectiligne, nous allons nous intéresser à la polarisation elliptique*

4 Étude d'une polarisation elliptique

Nous allons maintenant mettre en place un dispositif permettant de produire une polarisation elliptique, puis nous allons déterminer entièrement la vibration elliptique. Enfin, nous allons remonter aux caractéristiques propres de la lame : épaisseur, biréfringence...

Etude d'une polarisation elliptique

⚡ Duffait

⊖ 5 min

Le but de la manip est de caractériser complètement une polarisation elliptique, puis de remonter à l'épaisseur de la lame mince.

- QI + filtre
- Deux polariseurs (P 119/2)
- Lame mince (la plus mince possible) ici Mica 65 nm.
- Lames $\lambda/4$

On utilise une lampe quartz iode, ainsi qu'un filtre, pour travailler en lumière monochromatique. On croise l'analyseur et le polariseur, puis on introduit la lame mince, il n'y a plus extinction. On place à 45 degrés des lignes neutres (Maximum d'intensité). On peut montrer en tournant l'analyseur que l'on passe par des minimums et des maximums d'intensité, on a bien une polarisation elliptique.

Le petit et grand axe de l'ellipse sont donnés respectivement par la direction de l'analyseur lorsque l'intensité est minimal et la direction de l'analyseur lorsque l'intensité est maximale. On fixe la direction du polariseur sur un minimum, on retire la lame mince, et on place la lame $\lambda/4$ (Penser à choisir une lame dont la longueur d'onde et celle de la lumière utilisé).

Tourner la lame quart d'onde, de manière à rétablir l'extinction, ainsi l'axe lent de la lame quart d'onde coïncide avec le petit axe de l'ellipse.

Replacer la lame mince, il n'y a plus extinction. Dans cette configuration, la polarisation elliptique est transformée après passage par la lame quart d'onde en une onde polarisée rectilignement faisant un angle α avec l'axe de la lame quart d'onde. Il faut donc tourner l'analyseur d'un angle α pour rétablir l'extinction.

De plus l'angle α permet de caractériser l'ellipticité de la vibration : $\tan(\alpha) = \frac{A}{B}$ Enfin, le sens de rotation de la vibration est opposé au sens de rotation de l'analyseur.

La vibration elliptique est parfaitement déterminée.

De plus dans le cas d'une lame très mince, la différence de marche δ est reliée à l'angle α par : $\delta = \lambda \frac{\alpha}{\pi}$. Or $\delta = \Delta n e$, où Δn est la biréfringence du mica, et e l'épaisseur de la lame. On peut déterminer l'épaisseur de la lame mince :

$$e = \lambda \frac{\alpha}{\pi \Delta n}$$

(Si on veut, et si on a le temps, on peut déterminer e en utilisant un compensateur de Babinet, et comparer les deux valeurs)

Conclusion

Lors de ce montage, nous avons mis en œuvre des protocoles permettant de mettre en évidence les différents types de polarisation (rectiligne, elliptique...), sur une large gamme d'ondes électromagnétiques (onde centimétrique, onde lumineuse). Le phénomène de polarisation est très utilisé dans la vie quotidienne pour les verres de lunette de soleil, mais également dans les films 3D.

Remarques et commentaires :