

MP14 - Polarisation des ondes électromagnétiques

Cléments (COLLÉAUX et DE LA SALLE)

7 avril 2020

Niveau : L3

Bibliographie

Prérequis



Expériences



Table des matières

Table des matières	1
1 Ondes centimétriques et loi de MALUS	2
2 Onde lumineuse et milieu diélectrique	4
2.1 Angle de BREWSTER	4
2.2 Taux de polarisation d'une onde transmise	6
3 Onde lumineuse et milieu biréfringent	7

Introduction

1 Ondes centimétriques et loi de MALUS

✦ *Taillet Optique, chap 8.1 8.2*

Notice du banc, P89.24

Les premières ondes dont la polarisation va nous intéresser sont les ondes centimétriques, ie longueur d'onde de l'ordre du cm. Nous chercherons à montrer expérimentalement la loi de Malus pour de telles ondes.

Ces ondes centimétriques sont produites dans un banc dit banc hyperfréquences (les ondes centimétriques ont une fréquence entre 300 MHz et 300 GHz). Ce banc est à la fois producteur de telles ondes et guide d'onde.

Pour un guide d'onde rectangulaire de dimensions transverses a et b , la pulsation de coupure du mode $TE_{n,m}$ est

$$\omega_{n,m}^2 = \left(\frac{n\pi c}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi c}{b}\right)^2$$

Pour le banc ici monté (dont on ne détaillera que les parties qui nous intéressent, pour le reste voir la notice du banc), les dimensions sont $a = 2.3$ cm et $b = 1$ cm ce qui donne notamment

$$f_{10} = 6,5 \text{ GHz}, \quad f_{01} = 15,0 \text{ GHz}, \quad f_{11} = 16,4 \text{ GHz}, \quad f_{20} = 13,0 \text{ GHz}, \dots$$

FIGURE 1.1 – Fréquences de coupure de modes $TE_{n,m}$

Au fréquences de travail entre 8.5 et 9.5 Mhz le guide d'onde est donc monomode, seul le mode $TE_{1,0}$. Ce mode est par définition transverse et on peut le mettre sous la forme

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

Ainsi, à la fréquence de travail de 9 MHz, le banc produit une onde polarisée rectilignement et donc idéale pour regarder la loi de Malus!

Définition : Loi de Malus

Soit une onde polarisée rectilignement d'intensité I_0 qui arrive sur un polariseur rectiligne dont la direction fait un angle α avec la direction de polarisation de l'onde incidente. L'intensité en sortie du polariseur est $I_0 \cos^2 \alpha$

But

Vérifier la loi de Malus avec l'onde polarisée en sortie du banc.

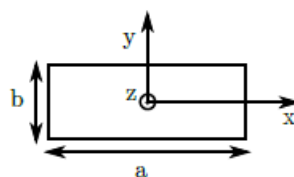


FIGURE 1.2 – Tronche du guide d'onde émetteur

Pour vérifier cette loi, on a besoin d'un système polariseur rectiligne qui servira d'analyseur. Ce système sera un récepteur placé au sein d'un guide d'onde d'analyse identique au guide d'onde initial. En particulier, le guide d'onde d'analyse ne permet aussi la propagation que du mode $TE_{1,0}$ polarisé dans la direction \vec{u}'_y . Ainsi, ce guide d'onde peut bien faire office d'analyseur.

Mais pour permettre l'étude de la loi de Malus, le guide d'onde d'analyse doit tourner autour de l'axe reliant les deux guides afin de créer un angle α entre les deux directions de polarisation. On se retrouve alors bien dans la situation plus classique de deux polariseurs rectilignés orientés d'un angle α . Notamment, le rayonnement incident qui arrive sur le guide d'analyse est projeté sur l'axe \vec{u}'_y qui est l'axe de polarisation qui permet la propagation dans le guide d'analyse. On s'attend alors à retrouver un champ électrique en $\cos \alpha$ et donc une intensité en $\cos^2 \alpha$.

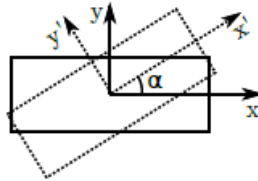


FIGURE 1.3 – Angle α entre les deux guides d'onde

Bien préciser que c'est le fait que les guides ne propagent que le mode $TE_{1,0}$ qui permet de les assimiler à des polariseurs rectilignes.

Le récepteur situé au fond du guide d'analyse est sensible à l'intensité lumineuse et donc est supposé recevoir un signal d'intensité en $\cos^2 \alpha$. Le récepteur n'a rien à voir avec la polarisation, **ce n'est pas l'analyseur**.

Or, et c'est là que c'est très relou, le récepteur n'est pas linéaire en intensité : la tension qu'il renvoie n'est pas proportionnelle à l'intensité qu'il reçoit et on ne peut donc pas attendre de tension en $U(\alpha) = U_0 \cos^2 \alpha \dots$

On va devoir contourner le problème en utilisant un élément du banc émetteur : l'**atténuateur**.

L'atténuateur est un élément du banc qui permet de faire varier l'intensité (ou la puissance c'est pareil) en sortie du guide d'onde émetteur :

$$A(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{P_{emise}}{P_0} \right) = 10 \log \left(\frac{I_{emise}}{I_0} \right)$$

Cette intensité émise I_{emise} est celle qui est affectée d'un $\cos \alpha$ en arrivant sur le récepteur.

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) pour avoir une courbe d'étalonnage A (pas de la vis).

On va donc travailler à **tension de sortie du récepteur fixée** en mesurant l'atténuation nécessaire pour l'atteindre à chaque changement de l'angle α puis on reconstruit la tension mesurée avec :

$$U = U_{ref} 10^{A/10}$$

Expérience : Vérification de la loi de Malus

☞ TP, notices

☹ ?

- Monter le banc (générateur, modulateur, atténuateur, cornet) P89.24 et le récepteur (cornet, TGN 100, multimètre) P90.19 et faire en sorte de pouvoir lire l'angle α (en gros se démermer avec un rapporteur et du scotch).
- Régler le banc à 9 GHz avec le fréquencemètre
- Espacer les deux dispositifs d'environ 25 cm et relier le récepteur à un voltmètre.
- Maximiser la tension de sortie du récepteur en alignant les deux guides, on a alors $\alpha = 0$.
- Jouer sur l'atténuateur pour obtenir une tension de sortie du récepteur ciblée U_{ref} (comme 0.1 V) et noter l'atténuation correspondante A_{ref}
- En tournant le guide d'analyse de 10° en 10° jouer sur l'atténuateur pour revenir à U_{ref} . On revient à U grâce à $U = U_{ref} 10^{(A-A_{ref})/10}$
- On fait la mesure à $\pm\alpha$ pour limiter l'incertitude à l'ordre 2 (☞ *Jolidon, p.187*)
- On trace $U(\cos^2 \alpha)$ et on est supposés avoir une valeur de coefficient directeur U_{ref} si la loi de Malus est vérifiée.

Polariseurs

On peut finir sur le banc en jouant avec la grille polarisatrice.

2 Onde lumineuse et milieu diélectrique

Revenons à la lumière parce que c'est quand même vachement plus facile!

Bien que la lumière naturelle soit non polarisée lors de son émission (soleil), il existe de nombreux mécanismes de polarisation naturels. Le premier à entrer en compte est la diffusion de RAYLEIGH qui polarise la lumière dans le plan perpendiculaire à la direction terre-soleil (☞ *LP30 - Rayonnement dipolaire*). Mais une fois que la lumière a traversé l'atmosphère, elle peut encore se polariser par réflexion ou transmission (sur des diélectriques ou des conducteurs).

Nous allons nous intéresser seulement au mécanismes de polarisation à la réflexion et la transmission d'une onde **sur un diélectrique**.

2.1 Angle de BREWSTER

But

Mesurer un angle de BREWSTER

Quand on parle de milieu diélectrique, il est important d'imaginer que ce milieu est rempli de dipôle que l'on peut exciter et qui émettent des ondes partout sauf selon leur axe d'excitation. Ces ondes peuvent être approchées par des **ondes planes progressives** si l'on est suffisamment loin (☞ *LP30 - Rayonnement dipolaire*). C'est très important pour comprendre la suite.

Imaginons à présent une onde lumineuse en réflexion sur un milieu diélectrique avec un angle i . Par construction, il existe une valeur de i notée i_B et appelée **angle de BREWSTER** pour laquelle le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon transmis :

$$\tan i_B = \frac{n_2}{n_1}$$

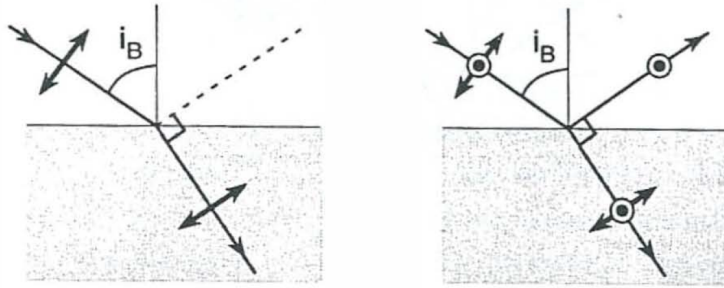


FIGURE 2.1 – Configuration de BREWSTER : si l'onde envoyée est polarisée dans le plan de réflexion, aucune onde n'est réfléchi. Si l'onde incidente n'est pas polarisée, alors l'onde réfléchi sort polarisée perpendiculairement au plan de réflexion.

Dans une telle configuration, les dipôles excités dans le diélectrique dans le plan de réflexion n'émettent pas dans leur direction d'excitation (qui est aussi la direction de la réflexion). Ainsi, il n'y a pas de d'onde plane perpendiculaire à cette direction dans l'onde réfléchi.

Photographie

Ça les photographes s'en servent pour pouvoir prendre des photos sans être gênés par la réflexion, par exemple sur l'eau. On utilise un polariseur qui éteint le rayon réfléchi afin de ne prendre que les rayons issus d'en dessous de la surface de l'eau.

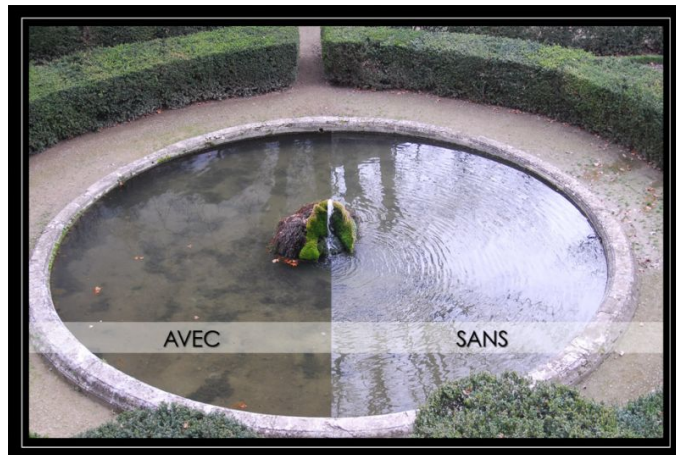


FIGURE 2.2 – On peut s'amuser à remonter à l'indice optique de l'eau à partir de cette photo en se disant qu'on est à BREWSTER et en évaluant l'angle :)

Expérience : Mesure d'un angle de BREWSTER avec l'appareil de NÖRREMBERG

🔗 La notice ?



- Éclairer avec une lumière non polarisée et des angles random, montrer à l'aide d'un analyseur que la lumière n'est pas polarisée en sortie
- Bouger le premier miroir et trouver l'angle i_{B1} pour lequel la lumière est polarisée en sortie

- Retirer l'analyseur, sans bouger le premier miroir, et essayer d'éteindre la lumière en sortie en tournant le deuxième miroir. On trouve un deuxième valeur i_{B2} . Dans cette configuration, le rayon qui aurait du être transmis devrait être parallèle au rayon incident (cf. schéma)

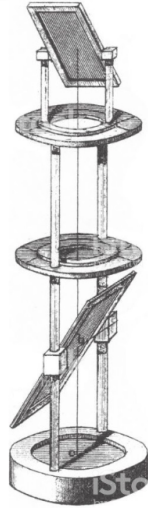


FIGURE 2.3 – Représentation de l'appareil de NÖRREMBERG, les deux miroirs, inclinés à 45°.

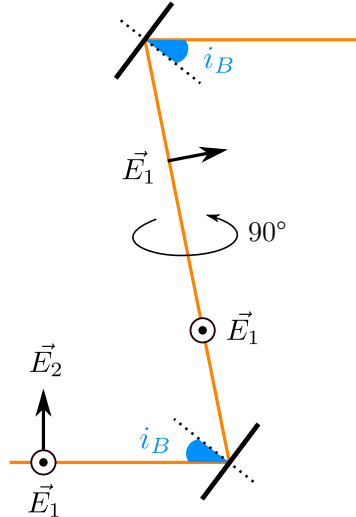


FIGURE 2.4 – Représentation des rayons et des polarisations pour un angle de BREWSTER.

2.2 Taux de polarisation d'une onde transmise

But

On cherche à vérifier quantitativement que la lumière transmise est bien polarisée partiellement.

↪ *Sextant p.271*

Mais de même, le rayon transmis se polarise partiellement à l'angle de BREWSTER. En effet, en notant R le coefficient de réflexion en puissance à l'interface air ($n_{air} = 1$) / verre (indice n) :

$$R = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2 \quad n \sim 1.5 \quad 0.11$$

On comprend que la polarisation perpendiculaire au plan part en partie dans l'onde réfléchie, et ainsi la composante transmise plus pauvre en cette polarisation. On peut alors imaginer plusieurs interface en superposant N lame de verre, de sorte qu'en sortie, l'onde transmise soit polarisée quasi-totalement.

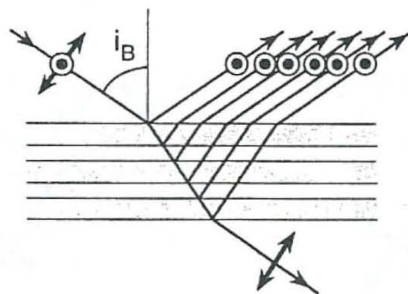


FIGURE 2.5 – Après $2N$ interface, l'onde gagne en polarisation.

Définition : Taux de polarisation

Pour quantifier tout ça, on définit le **taux de polarisation** d'une onde :

$$\eta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Où I_{max} et I_{min} sont les intensités maximale et minimale obtenue en faisant tourner un analyseur en sortie.

- Pour une lumière totalement polarisée, $I_{min} = 0$ donc $\eta = 1$
- Pour une lumière non polarisée (rectilignement !), $I_{max} = I_{min}$ donc $\eta = 0$

Cette définition quantifie bien un taux de polarisation **rectiligne** ! En effet, on peut imaginer une polarisation circulaire droite pure, mais on aura quand même $\eta = 0$.

On peut montrer que ce taux est lié au coefficient de réflexion R ainsi qu'au nombre de lames placées N selon :

$$\eta = \frac{1 - (1 - R)^{2N}}{1 + (1 - R)^{2N}} \implies \ln \frac{1 - \eta}{1 + \eta} = 2N \ln(1 - R)$$

Expérience : Vérification

↗ Sextant p.271

⊖ 10 min

Matos Photodiode + Multimètre + Laser polarisé + Deux polariseurs + Plaque tournant munie d'un rapporteur + Lames de verre et support en bois

Protocole C'est bien détaillé pour le coup. La mesure de η peut se faire directement à partir des tensions U_{max} et U_{min} si on vérifie que la tension délivrée est bien linéaire du flux de photons (étalonnage avec MALUS?). Penser à polariser le laser à 45° du plan d'incidence (autant de composante parallèle que de composante perpendiculaire).

Exploitation Tracer la régression suggérée plus haut : $\ln \frac{1 - \eta}{1 + \eta}$ en fonction de N . Vérifier la loi et pourquoi pas remonter à R (on s'attend à $R \sim 0.15$)

Incertitudes

Pour η , prendre l'incertitude de la photodiode utilisée (combiner avec celle du multimètre?). Pour N , prendre une incertitude de 1000.

3 Onde lumineuse et milieu biréfringent

Si jamais les expériences précédentes sont trop courtes, balancer un bon vieux spectre canelé ↗ *MP13*. Quand même recontextualiser, typiquement : "On a vu que les différentes polarisations des ondes évoluaient différemment à une interface, mais pour certains milieux, les polarisations évoluent différemment dans le milieu même." ou alors "Il existe des milieux dans lesquels on voit apparaître une création de polarisation" (↗ *Duffait p.177*).

Conclusion

Parler des polarisations circulaire au cinéma 3D, en fait on n'a pas du tout évoqué les polarisations elliptiques et circulaire, donc c'est le moment d'ouvrir !