

MP 14 : Polarisation des ondes électromagnétiques

"La polarisation des abeilles!"

Stephan Guy

Benjamin Blancon, Vincent Martos
10 décembre 2019

Bibliographie

- **Poly d'électromag**, pour la manip' de la loi de Malus au banc hyperfréquence.
- **Jolidon**, pour plus de calculs théoriques sur la loi de Malus, les coefficients des polariseurs expliqués en annexe et le principe des polariseurs (p.184-191).
- **Sylvain Houard, Optique : une approche géométrique et expérimentale**, pour l'appareil de Nörremberg (p.256) et l'explication générale de l'angle de Brewster (p.266-267).
- **Sextant, Optique expérimentale**, pour le polariseur avec une grille (p.266-267) et la manip' de réflexion sur un métal (p.299-301).
- **Dunod Physique PC-PC***, pour l'angle de Brewster (p.1052-1053) et plus d'informations sur les états de polarisation avec une lame quart d'onde (p.1058-1063) avec le schéma récapitulatif p.1064.

Table des matières

Introduction	2
1 Polarisation des ondes centimétriques	2
2 Polarisation par réflexion vitreuse	4
3 Polarisation par réflexion sur un métal	5
Conclusion	8

Introduction

Du grec $\pi\omega\lambda\epsilon - \omega$ (tourner autour de, vibrer), la polarisation est par définition la direction du vecteur champ électrique dans l'espace. Elle est une caractéristique fondamentale des champs électromagnétiques et permet de comprendre de nombreux phénomènes de la physique des ondes. Cependant, son étude est compliqué car l'homme ne peut pas percevoir la polarisation des ondes, contrairement à certaines espèces comme les abeilles. Le but de ce montage est de regarder comment il est possible de caractériser ces différentes polarisations. Pour cela, nous allons partir d'une polarisation particulière, à savoir la polarisation rectiligne.

1 Polarisation des ondes centimétriques

Dans cette première partie, nous nous intéressons aux ondes centimétriques de fréquence caractéristique de l'ordre du GHz. Ces ondes sont omniprésentes dans notre vie de tous les jours puisqu'elles correspondent au réseau Wi-fi de nos téléphones portables. Pour étudier leur polarisation, nous utiliserons un banc hyperfréquence (voir Figure 1 et le TP d'électromag correspondant).

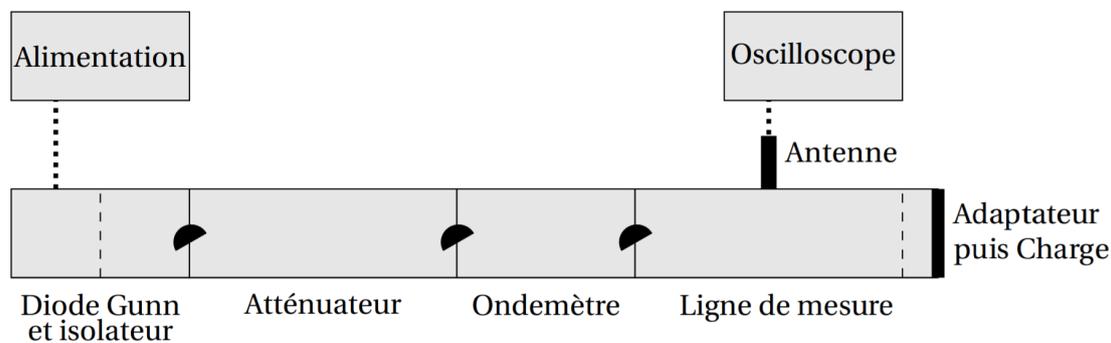


FIGURE 1 – Schéma du banc hyperfréquence. Les différentes parties sont expliquées ci-dessous. Pour plus de détails et d'expériences non présentées ici, n'hésitez pas à consulter le TP correspondant.

Regardons les différentes composantes.

- La diode Gunn est une antenne qui envoie des ondes électromagnétiques en entrée du banc. Celui-ci se comporte comme une cavité rectangulaire ou guide d'ondes ne laissant passer qu'une certaine gamme de fréquences en fonctions de ses contraintes géométriques. La pulsation de coupure correspondant à un mode (n,m) incident est alors :

$$\omega_{n,m}^2 = \left(\frac{n\pi c}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi c}{b}\right)^2, \quad (1)$$

où a et b correspondent respectivement à la longueur et la largeur du banc. Ici, $a = 2,3$ cm et $b = 1$ cm : le seul mode pouvant se propager dans le guide d'ondes est donc le mode $(1,0)$ pour lequel la fréquence de coupure ($\omega_{1,0} = 6.5$ GHz) est plus petite que les fréquences de travail de la diode (entre 8,5 GHz et 9,5 GHz). La fréquence initiale de la diode se contrôle à l'aide d'une vis micrométrique.

- Pour éviter que la diode ne soit perturbée par les ondes réfléchies, on place un isolateur en sortie de la diode pour fermer la cavité.
- L'atténuateur aura un rôle particulier expliqué juste après.
- L'ondemètre ou fréquencesmètre est un résonateur d'Helmholtz. Lorsque l'on regarde l'intensité de l'onde stationnaire dans la cavité à l'aide de l'oscilloscope, l'intensité reçue diminue si le résonateur d'Helmholtz a une fréquence de résonance égale à la fréquence initiale. En utilisant une autre vis micrométrique pour changer la fréquence de résonance du résonateur d'Helmholtz, on peut déterminer précisément la fréquence initiale de l'onde.

Comme expliqué précédemment, une seule onde peut se propager dans le banc hyperfréquences. C'est une onde de polarisation rectiligne, perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde : elle doit donc vérifier la loi de Malus. Pour s'en convaincre, on place en sortie du banc un cornet faisant office d'émetteur. En face de lui (à au moins une vingtaine de centimètres pour exclure les effets de diffraction), on place un second cornet faisant office de récepteur que l'on peut tourner d'un angle θ . L'onde arrivant au récepteur a donc une intensité de la forme :

$$I(\theta) = I_{ref} \cos^2(\theta). \quad (2)$$

Le but est de vérifier la proportionnalité entre l'intensité reçue (on mesurera la tension en sortie du récepteur ici pour plus de simplicité) et le facteur $\cos^2(\theta)$ pour confirmer ou non la loi de Malus et donc la polarisation rectiligne de l'onde incidente.

La principale difficulté provient de la mesure de la tension : en effet, la conversion intensité reçue-tension par le récepteur n'est pas linéaire. Pour pallier ce problème, on va utiliser l'atténuateur présent sur le banc hyperfréquence. L'atténuation induite A se règle elle aussi avec une vis micrométrique et est tel que :

$$A = 10 \log \left(\frac{U}{U_{ref}} \right). \quad (3)$$

On peut alors remonter simplement à la valeur de U en sortie tel que :

$$U = U_{ref} 10^{\frac{A}{10}}. \quad (4)$$

Vérification de la loi de Malus (1809) pour les ondes centimétriques

Préréglage le banc hyperfréquence avec une fréquence initiale de l'ordre de 9 GHz (utiliser le fréquencemètre). Faire une première mesure lorsque les deux cornets se font face ($\theta = 0$) et faire en sorte que la tension affichée en sortie du récepteur soit de l'ordre de 0,1 V. On a donc $U_{ref} = 0,1$ V et une certaine valeur A_{ref} avec l'atténuateur.

Déplacer le cornet d'un angle de 15° et ajuster la vis micrométrique de l'atténuateur pour que la tension affichée en sortie du récepteur revienne à la valeur de U_{ref} (attention, la vis micrométrique de l'atténuateur est chiant : il faut toujours la tourner dans le même sens car le jeu sur la vis n'est pas le même dans les deux sens) : on travaille à **tension de sortie fixée**. On peut alors calculer U en sortie en reprenant l'équation 4 **en faisant attention à bien modifier A par $\Delta A = A - A_{ref}$** . Réitérer la mesure pour un angle de -15° et faire la moyenne des deux mesures pour diminuer l'incertitude (voir Jolidon p.187 pour plus de précisions : on passe à une incertitude d'ordre 2 en supprimant l'incertitude d'ordre 1).

Faire ces mesures jusqu'à $\theta = 90^\circ$ (si vous y arrivez : la mesure à 90° est souvent compliquée) et tracer U en fonction de $\cos^2(\theta)$: on doit retrouver la valeur de U_{ref} en coefficient directeur si tout va bien !

Note : pour commencer la mesure, on peut mettre une grille entre le récepteur et l'émetteur et montrer qualitativement à l'oscilloscope que l'émetteur reçoit complètement le signal lorsque les traits de la grille sont horizontaux et ne reçoit plus rien lorsque les traits de la grille sont verticaux (l'onde arrivant sur la grille est réfléchi et ne peut pas traverser la grille).

ATTENTION Il est très compliqué d'avoir des résultats potables avec cette manip' : les incertitudes sur Regressi sont souvent très importantes, notamment à cause du matériel (tout doit être aligné, les cornets doivent se faire face, la rotation du récepteur doit se faire perpendiculairement à l'onde incidente...). Cependant, le titre de la leçon étant "Polarisation des ondes électromagnétiques" et non plus ondes lumineuses comme avant 2014, **une manip' hors du domaine du visible est obligatoire pour le jury !**

La vérification de la loi de Malus (1809) pour les ondes centimétriques met en évidence une première polarisation des ondes électromagnétiques. Pour prouver que la polarisation rectiligne existe pour toutes les fréquences possibles, on va mettre en évidence la polarisation rectiligne des ondes du domaine du visible, plus commodes à étudier.

2 Polarisation par réflexion vitreuse

Pour étudier la polarisation rectiligne des ondes lumineuses d'une manière différente de la loi de Malus, on va utiliser l'angle de Brewster θ_B . L'angle de Brewster est l'angle d'incidence au niveau d'une interface pour lequel la composante du champ électrique compris dans le plan de l'interface est complètement transmise dans le deuxième milieu (voir Figure 2). Cette absence de réflexion parasite est notamment très utilisée en photographie pour éviter d'avoir le reflet du photographe sur une vitre par exemple. Au niveau de la réflexion, le champ électrique n'a donc plus qu'une seule composante : on polarise rectilignement l'onde. D'après les lois de la réfraction de Descartes, on a alors :

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad (5)$$

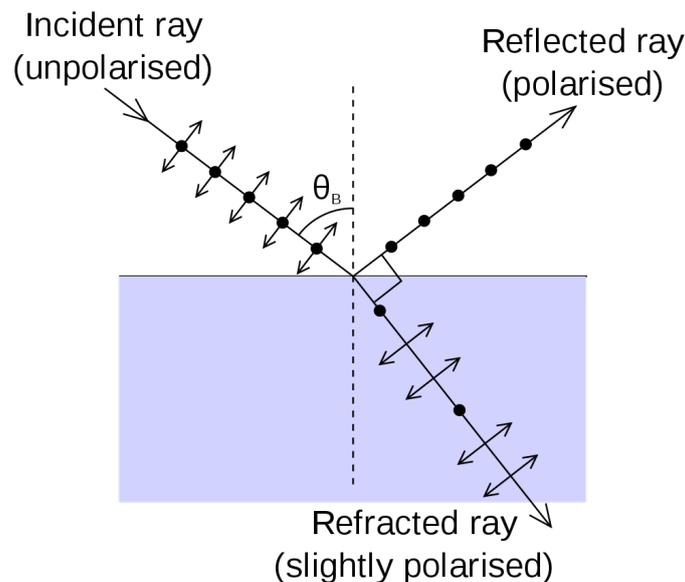


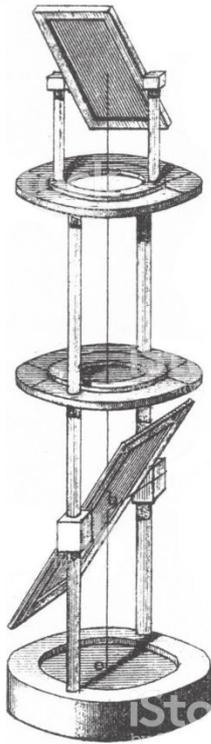
FIGURE 2 – Schéma de l'angle de Brewster θ_B . L'onde réfléchie est polarisée puisque la composante du champ électrique appartenant au plan est complètement transmise dans le deuxième milieu. Pour plus d'explications physiques (notamment avec les dipôles représentés par les flèches), voir le Houard ou le Dunod.

Pour mettre en évidence cette propriété de l'angle de Brewster, on se propose de le mesurer avec l'appareil de Nörremberg (voir Figure 3(a)). Ici, deux miroirs se font face avec un angle de 90° entre les deux. Le premier miroir polarise l'onde incidente à l'angle de Brewster θ_{B_1} : seule la composante perpendiculaire à l'interface est réfléchie. A l'arrivée du deuxième miroir, la lumière est complètement éteinte à l'angle de Brewster θ_{B_2} car l'onde précédemment perpendiculaire à l'interface est maintenant contenue dans le plan de l'interface à cause de l'angle de 90° entre les deux miroirs (Figure 3(b)). On a donc ici un moyen assez simple et rapide de mesurer deux fois l'angle de Brewster d'une interface air-verre, en supposant que le verre des miroirs est le même.

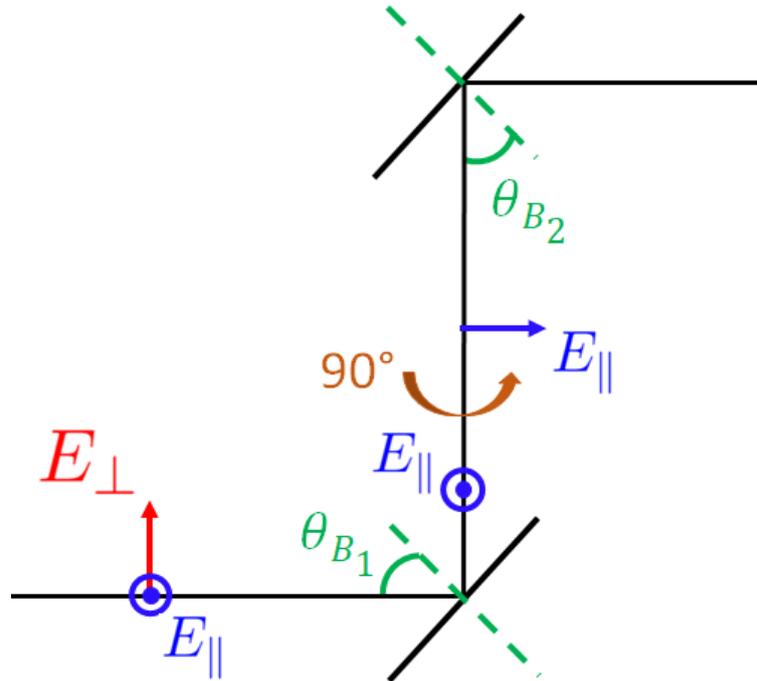
Mesure de l'angle de Brewster avec l'appareil de Nörremberg (2e moitié du XIXe siècle)

Eclairer le premier miroir et montrer à l'aide d'un polariseur en sortie que la lumière n'est pas polarisée (pas d'extinction). Chercher l'angle pour lequel la lumière s'éteint complètement en modifiant l'inclinaison du miroir : la lumière a alors bien été polarisée à l'interface et on peut lire une première mesure de θ_B . Enlever maintenant le polariseur en sortie du système et répéter l'opération avec le deuxième miroir jusqu'à ce que la lumière s'éteigne complètement : on a notre deuxième valeur de θ_B .

Note : cette expérience peut être rendue plus quantitative en répétant plusieurs fois la mesure des deux angles, réduisant ainsi l'incertitude de type A.



(a) Appareil de Nörremberg. Les deux miroirs ont un angle de 90° entre eux.



(b) Représentation du champ électrique aux deux interfaces air-verre. La première interface élimine la composante dans le plan et la deuxième interface élimine la composante initialement perpendiculaire au plan.

Nous avons vu jusqu'ici deux manières d'étudier la polarisation rectiligne d'ondes électromagnétiques. Pour autant, ce n'est pas le seul type de polarisation qu'il existe dans la nature. Dans cette dernière partie, nous allons donc présenter les autres types de polarisation possibles en prenant un cas particulier : la réflexion d'une lumière sur un métal. Nous en profiterons pour expliquer la marche à suivre pour déterminer la polarisation d'une lumière inconnue.

3 Polarisation par réflexion sur un métal

On s'intéresse au montage Figure 3. On considère une onde incidente non polarisée en incidence infinie (lentille de focale $f' = 10$ cm) que l'on polarise rectilignement avec un polariseur et on regarde l'onde réfléchi par la réflexion sur une surface de métal à l'aide d'un analyseur. Si le métal est parfait, on s'attend à ce que l'onde en sortie soit également polarisée rectilignement (voir le cours d'Electromag de Jérémie pour plus de précisions sur les calculs (début du chapitre 7 sur les guides d'ondes)) et donc avoir une extinction complète de l'onde pour un angle particulier de l'analyseur. Pour autant, l'onde en sortie ne présente pas de minimum nul : on est donc face à une onde polarisée elliptiquement. En omettant les lumières non polarisées, c'est le cas le plus général de polarisation que l'on peut avoir (les polarisation circulaire et rectiligne n'étant que des cas particuliers).

Pour caractériser cette polarisation, quatre critères sont nécessaires (voir Figure 4).

- Les demi-grand axe a et demi-petit axe b . On utilise pour cela une photodiode en sortie pour mesurer les intensités maximale I_{max} et minimale I_{min} tel que :

$$\epsilon = \frac{a}{b} = \sqrt{\frac{I_{max}}{I_{min}}}. \quad (6)$$

On a donc directement le rapport entre les deux axes.

- L'angle Ψ de rotation par rapport à l'axe y du polariseur. On le trouve directement en regardant la différence d'angle relative entre le polariseur et l'analyseur lorsque l'on est à un maximum (**ATTENTION** : Ψ doit être inférieur à 90° , il faut donc faire attention au signe de Ψ !).

- Le sens de parcours de la polarisation (gauche ou droit). Pour le déterminer, on va avoir besoin de mettre une lame $\frac{\lambda}{4}$ avant l'analyseur qui permet de transformer la polarisation elliptique en polarisation rectiligne pour une longueur d'onde précise (d'où le filtre interférentiel mis en amont du polariseur) et lorsque l'un des axes neutres de la lame quart d'onde se confond avec celui de l'un des axes de l'ellipse. Le minimum sera alors rigoureusement nul. **ATTENTION** : on touche ici le point sensible de ce montage. En effet, on va supposer pour la suite que la languette présente sur la lame quart d'onde correspond à l'axe rapide de la lame (voir le Dunod pour plus de précisions) : cela veut dire que si l'on a besoin de tourner la lame quart d'onde vers la droite pour trouver le minimum nul, la polarisation elliptique de départ avait un sens de parcours droit. Cette hypothèse est complètement arbitraire et ne peut pas être vérifiée sans données constructeurs complémentaires.

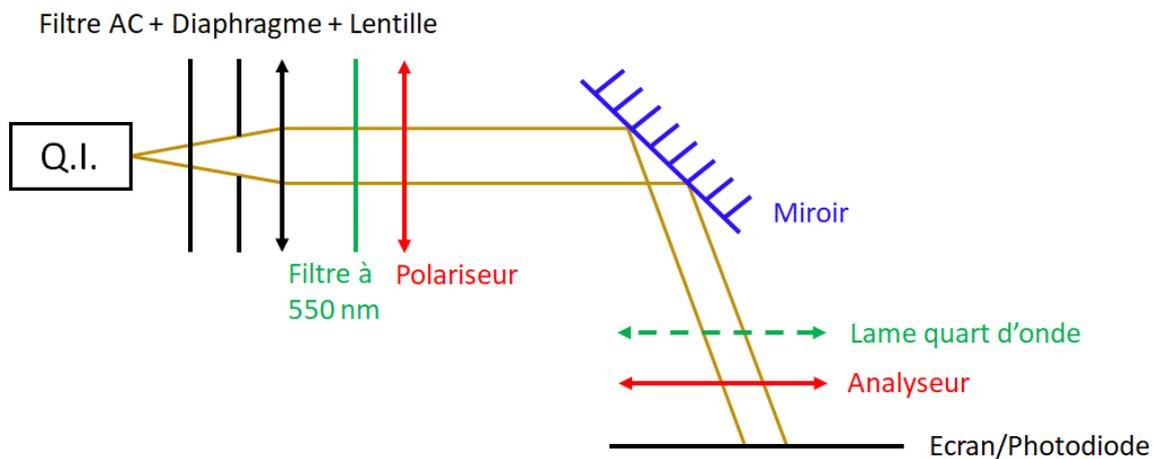


FIGURE 3 – Schéma du montage pour l'étude de la polarisation par réflexion sur un métal. L'onde incidente est polarisée rectilignement à l'aide du polariseur et analysée après réflexion à l'aide de l'analyseur et de la lame quart d'onde.

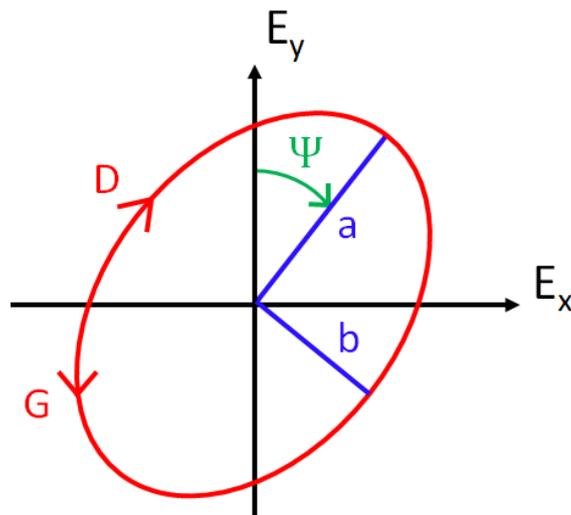


FIGURE 4 – Schéma de l'ellipse avec ses caractéristiques (a , b , Ψ et le sens de parcours (gauche ou droit)).

Mesure d'une polarisation elliptique par réflexion sur un métal

Placer le polariseur en sortie du système (QI + filtre AC + diaphragme + lentille) avec un angle arbitraire **QUI NE BOUGERA PAS POUR LE RESTE DE LA MANIP'**. Placer alors l'analyseur en sortie et vérifier que la lumière s'éteint lorsque les deux polariseurs sont croisés. Placer également la lame quart d'onde entre les deux et montrer que la lumière s'éteint lorsque la languette de la lame quart d'onde est alignée avec celle du polariseur : on a donc trouvé l'un des axes neutres de la lame quart d'onde et on supposera dans la suite qu'il correspond à l'axe rapide comme discuté précédemment.

Retirer maintenant la lame quart d'onde, et placer le métal entre les deux polariseurs avec un angle d'incidence très élevé sur le métal pour pouvoir effectuer les mesures (un angle d'incidence trop faible ne donne pas de résultats concluants). Montrer qualitativement que la polarisation n'est plus éteinte (le métal n'est donc pas parfait) et mesurer les valeurs d'intensités minimale et maximale reçues à l'aide d'une photodiode (voir le TP correspondant dans le poly d'optique pour les montages avec des photorécepteurs). Nous avons ici la valeur d' ϵ . Mesurer la différence d'angle entre le polariseur et l'analyseur pour un maximum d'intensité pour retrouver Ψ .

Pour le sens de parcours, placer la lame quart d'onde avant l'analyseur avec la languette confondue avec l'axe du maximum d'intensité de l'ellipse : **LA LAME QUART D'ONDE NE DOIT PLUS BOUGER**. Tourner l'analyseur pour voir si la polarisation elliptique est gauche ou droite en prenant en compte l'hypothèse discutée précédemment. Un code Python permet alors de tracer directement l'ellipse obtenue après réflexion sur le métal.

On a présenté ici une manière de caractériser une polarisation elliptique. De manière plus générale, le schéma ci-dessous résume les différentes étapes à suivre pour caractériser une polarisation inconnue. C'est un schéma à avoir en tête pour savoir rapidement si une lumière a une polarisation rectiligne, elliptique, circulaire (non présenté dans ce montage) ou si elle n'a tout simplement pas de polarisation comme les lumières naturelles.

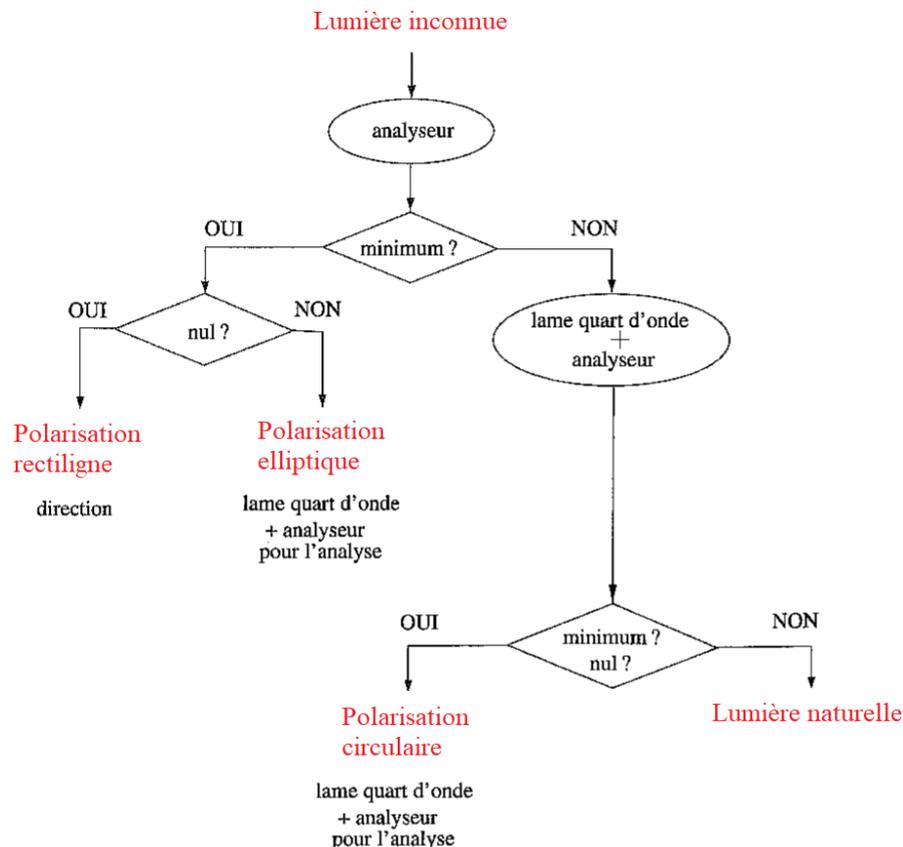


FIGURE 5 – Schéma récapitulatif sur les différentes étapes pour déterminer une polarisation inconnue (désolé pour la qualité, le schéma est p.1064 dans le Dunoc PC-PC*).

Conclusion

Dans ce montage, on a présenté différents types de polarisation qui existent dans la nature pour diverses ondes électromagnétiques. Elles ont toutes leurs particularités et leurs intérêts. La polarisation rectiligne est utilisée pour les télécommunications, la polarisation elliptique peut être utilisée comme précédemment pour remonter aux coefficients de Fresnel d'un métal et les lunettes 3D utilisent la polarisation circulaire pour donner deux images différentes aux yeux et créer cet effet de profondeur. La polarisation est donc une donnée cruciale à prendre en compte et à savoir caractériser pour tout montage incluant des ondes électromagnétiques.

Annexe : caractéristiques des polariseurs

Les polariseurs sont des polymères étirés dans une certaine direction qui ne transmettent qu'une polarisation rectiligne et absorbent la polarisation orthogonale (on peut avoir ici l'analogie avec la grille utilisée comme démonstration qualitative dans la première partie). Ils sont caractérisés par leurs coefficients de transmission t_{\parallel} et t_{\perp} , valant respectivement 1 et 0 pour des polariseurs parfaits. Cependant, comme toute expérience qui se respecte, la théorie ne marche évidemment pas et il est alors intéressant d'étudier t_{\parallel} et t_{\perp} pour des polariseurs réels. Les résultats sont présentés ci-dessous.

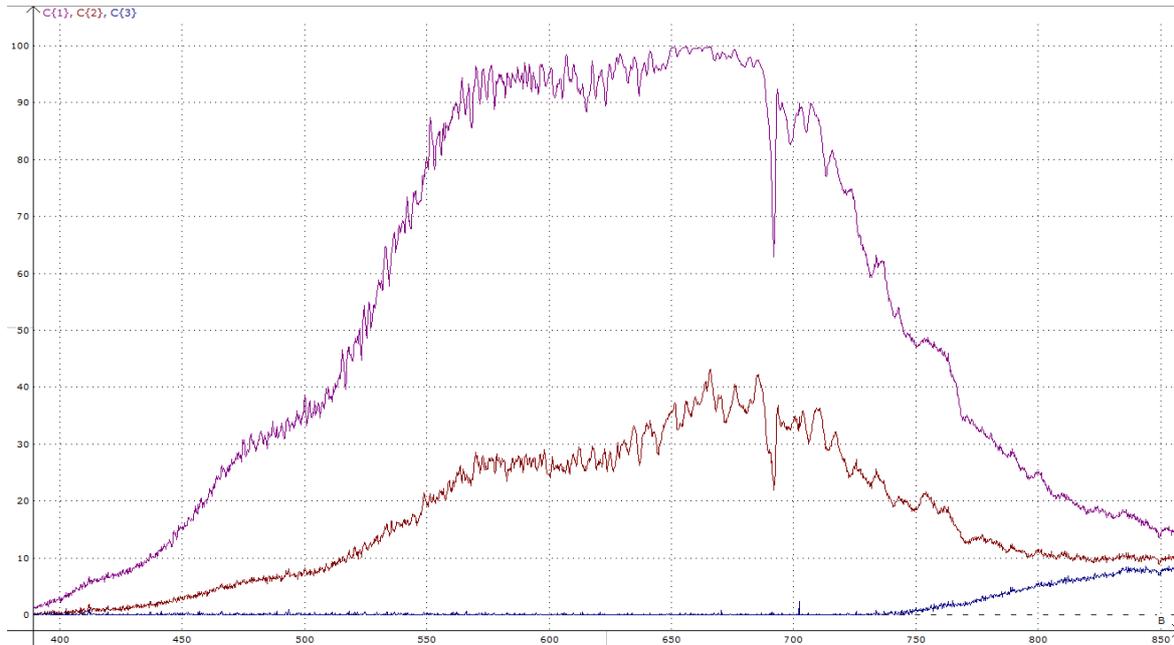


FIGURE 6 – Intensités de la lumière incidente sans polariseurs (violet ou première courbe), polariseurs parallèles (marron ou deuxième courbe) et polariseurs croisés (bleu ou troisième courbe) mesurées avec un spectrophotomètre.

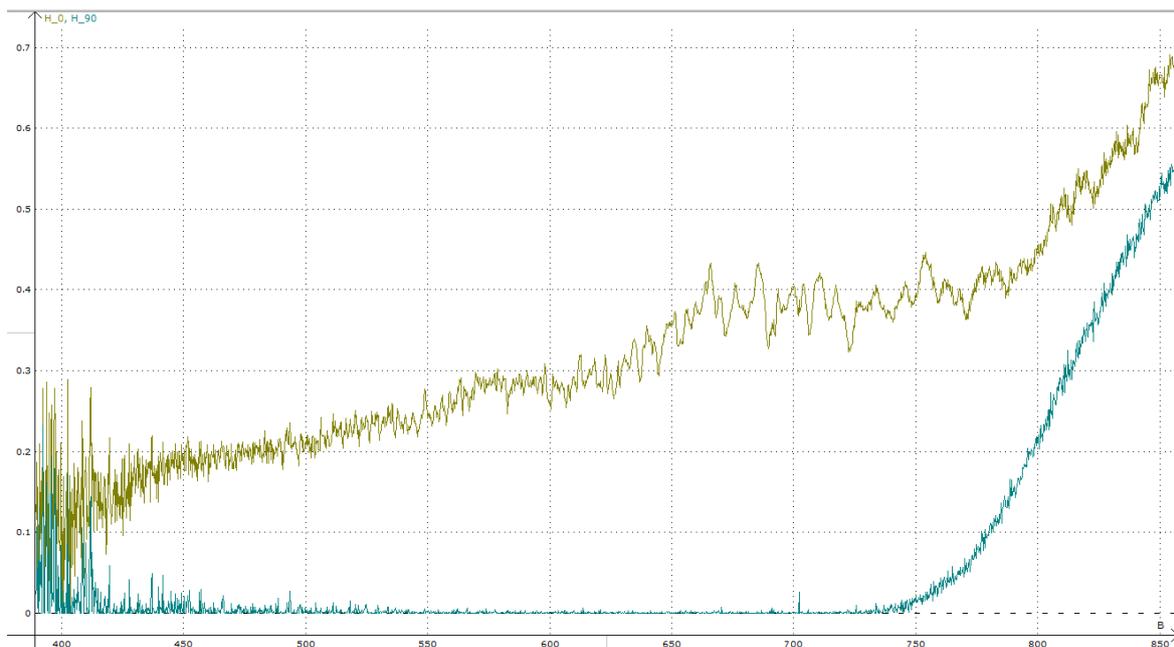


FIGURE 7 – Rapport de la lumière transmise avec des polariseurs parallèles (vert ou première courbe) et des polariseurs croisés (bleu ou deuxième courbe).

On remarque que même lorsque les polariseurs sont parallèles, la lumière transmise est fortement atténuée ($t_{\parallel} \simeq 0,2 - 0,4$ pour le visible). Lorsque les polariseurs sont croisés, $t_{perp} = 0$ pour le domaine du visible. Considérer les polariseurs comme parfaits est donc très loin d'être la vérité. De plus, la lumière est fortement transmise dès lors qu'on s'éloigne un peu du domaine du visible, même lorsque les polariseurs sont croisés : les polariseurs ne sont donc pertinents d'utilisation que lorsque l'on travaille dans le domaine du visible. Pour le proche IR, d'autres polariseurs plus adaptés sont à utiliser.

Cette manipulation n'est pas obligatoire car elle prend pas mal de temps pour pas grand-chose, mais les conclusions sont à retenir !

Questions à l'oral :

- Première manip' : comment relier la fréquence et la longueur incidente dans le guide d'ondes ? *Relation de dispersion du guide d'ondes (voir TP Hyperfréquences).*
- Comment on a mesuré la fréquence initiale envoyée ? *Voir TP Hyperfréquences sur la détermination de la fréquence dans le guide d'ondes : on mesure la fréquence de résonance dans le résonateur de Helmholtz du banc hyperfréquences.*
- Pourquoi avoir utilisé un oscilloscope dans la première partie ? *Par pure démonstration visuelle. Les mesures ont cependant été faites avec le voltmètre.*
- Pourquoi tourner le cône de sortie revient à la même chose que tourner la grille ? *Voir annexe : la grille sert de polariseur qui absorbe la polarisation dans l'axe des traits de la grille.*
- Pourquoi la grille ne se comporte pas comme un réseau ? *Le pas de la grille est trop grand pour qu'il y ait diffraction.*
- Polarisation = OPPH : est-ce le cas ici ? *Onde stationnaire à l'intérieur du guide seulement lorsqu'il est fermé : l'onde se propageant à l'extérieur du guide ouvert est bien supposé être une OPPH.*
- Est-ce qu'un rouleau de scotch peut agir comme un polariseur ? *Tout dépend de l'orientation des polymères à l'intérieur du scotch.*
- Deuxième manip' : critiques sur l'appareil de Nörrenberg ? *Verticalité non parfaite, miroirs non parfaits, angle de 90° entre les miroirs par forcément exact.*
- Incertitude sur θ_B ? $\frac{1}{2}\sqrt{\theta_{B_1}^2 + \theta_{B_2}^2}$.
- Incertitude de type A sur la deuxième manip' ? *En répétant l'expérience et en dérégulant les vis.*
- Pourquoi il y a une polarisation à l'angle de Brewster ? *Le coefficient de transmission pour le mode TM s'annule à l'angle de Brewster.*
- Troisième manip' : explications en schéma des différentes étapes faites pour retrouver la polarisation elliptique ? *Tracés des différents états de polarisation de la lumière après le passage dans chacun des instruments d'optique (polariseur, métal, lame quart d'onde et analyseur principalement).*
- Importance de mettre la quart d'onde dans une direction particulière ? *Oui : il faut la mettre dans les axes de l'ellipse pour bien avoir une polarisation rectiligne en sortie et pas une autre polarisation elliptique. Cela est plus simple pour la mesure car on a une vraie extinction de la polarisation (voir le Dunod pour plus de précisions).*
- Photodiode meilleure que l'œil pour mesurer les extinctions ? *Non, c'est pour ça qu'on ne l'a pas utilisée pour mesurer l'extinction après avoir mis la quart d'onde.*
- Techniques d'ellipsométrie plus automatiques ? *L'angle d'incidence sur le miroir est contrôlé par ordinateur et va de 0° à 90° . On peut alors directement remonter aux coefficients de Fresnel.*
- Influence de la longueur d'onde ? *Joue dessus avec la permittivité ϵ_r du métal qui dépend de la fréquence.*
- Lunettes 3D ? *Quart d'onde + polariseur rectiligne dans chacun des verres.*
- Manip surprise : caractériser la vitesse du son dans l'air (fait en TP divers). Vincent a opté pour l'émission d'une onde sinusoïdale mesuré avec un récepteur après réflexion sur une plaque de métal. En mesurant la distance entre la plaque de métal et l'émetteur/récepteur (ils sont côte à côte) et le retard entre l'onde incidente et l'onde reçue, on peut remonter à la vitesse du son dans l'air.
- Questions sur la manip' surprise : d'autres méthodes pour mesurer de façon directe la vitesse du son ? *Temps de vol entre les deux émetteurs mis l'un en face de l'autre.*

Remarques du jury :

- Présentation agréable et sujet maîtrisée, mais les messages ne sont pas assez bien passés : bien penser à faire des pauses et ramener le discours sur les différents objectifs des manipulations.
- Première manip' : bien penser à mettre de la distance entre les cornets de réception et d'émission.
- Bien expliquer pourquoi on interprète la première manip' comme une loi de Malus, où les cornets jouent le rôle d'étude de la polarisation.
- La loi n'est pas vérifiée si la droite ne passe pas par les points, incertitudes comprises ! Il faut alors se questionner sur les incertitudes choisies (pas assez fortes) ou alors sur la validité de la loi.
- Troisième manip' : expliquer avec des schémas clairs la transformation de la polarisation après le passage dans chacun des instruments d'optique (encore faut-il avoir la place de le caser sur le tableau hein).
- Manip' surprise : attention à la dépendance fréquentielle des récepteurs/émetteurs, qui sont très sélectifs. Il faut donc bien penser à choisir la bonne fréquence d'entrée avec le GBF !
- Bien penser à parler de son raisonnement pour arriver à la mesure finale et des sources d'erreurs/incertitudes tout en faisant les manipulations.