

# MP14 – POLARISATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

13 avril 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

## Commentaires du jury

- **2017** : L'analyse d'une lumière polarisée quelconque par utilisation d'une lame quart d'onde dans un cas quelconque, sans comparaison avec rien de connu présente peu d'intérêt.
- **2014-2016** : 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.
- **2010-2013** : 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. La loi de Malus est souvent mal réalisée et mal exploitée : réfléchir au choix de la source : spectrale, blanche avec filtre, laser polarisé ou non polarisé. Il faut connaître le principe de fonctionnement du détecteur utilisé (photodiode, luxmètre).
- **2009** : La confusion entre polarisation partielle et polarisation elliptique n'est pas acceptable.
- **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

- ⚡ *Notice des émetteurs/récepteurs Nova WEC910 P89.25* Ondes centimétriques
- ⚡ *Tout-en-un PC-PC\**, **Sanz** Caractérisation polarisation
- ⚡ **Sextant** Réflexion sur un conducteur
- ⚡ **FLTCLD** Interférences et biréfringence

## Expériences



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Polariseurs</b>	<b>2</b>
1.1	Loi de Malus pour des ondes centimétriques . . . . .	2
1.2	Caractérisation d'un couple de polariseurs dichroïques . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Réflexion vitreuse</b>	<b>3</b>
2.1	Étude de la lumière réfléchie . . . . .	3
2.2	Étude de la lumière transmise . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Réflexion métallique</b>	<b>6</b>

## Introduction

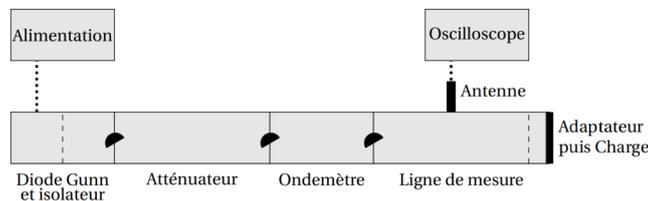
la polarisation est par définition la direction du vecteur champ électrique dans l'espace. Elle est une caractéristique fondamentale des champs électromagnétiques et permet de comprendre de nombreux phénomènes de la physique des ondes. Cependant, son étude est compliquée car l'homme ne peut pas percevoir 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. Tout d'abord, nous allons étudier la création de polarisation à l'aide de polariseurs.

## 1 Polariseurs

Un polariseur ça transforme une lumière quelconque en lumière projetée sur une polarisation.

### 1.1 Loi de Malus pour 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



#### Détail des composants

- 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 fonction de ses contraintes géométriques. La pulsation de coupure correspondant à un mode  $(n,m)$  incident est alors :

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

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 <sup>a</sup>. 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.

a. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Résonance\\_de\\_Helmholtz](https://fr.wikipedia.org/wiki/Résonance_de_Helmholtz)

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  $\theta$ . L'onde arrivant au récepteur a donc une intensité de la forme :

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

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. On va mesurer de combien on doit atténuer (algébriquement) l'onde pour que le détecteur mesure tout le temps la même intensité. L'intérêt de faire ça c'est que les courbes d'atténuation on les connaît !

**protocole en 2 secondes :** Je me place à angle nul. J'ai  $U=U_{ref}$ , je met un angle  $\alpha$  non nul, j'ai un autre  $U$  plus faible. Je diminue la valeur d'atténuation jusqu'à retrouver  $U_{ref}$ . Alors je sais que la différence d'atténuation vaut  $\Delta A = 10 \log \frac{I_\alpha}{I_0}$

### Loi de Malus au banc Hyperfréquences



Monter le banc avec une lecture d'angle possible. Régler à 9GHz (on a une atténuation tabulée), mettre 25cm entre émetteur et récepteur, trouver le  $\alpha = 0$ , et vérifier la loi de malus.

$$I = I_{ref} 10^{\Delta A/10}$$

Ne pas oublier les  $\pm\alpha$  pour avoir une incertitude d'ordre 2.

### Polariseurs

Faire joujou avec la grille, et faire la parallèle avec le pola dichroïque : polymère étirés.

## 1.2 Caractérisation d'un couple de polariseurs dichroïques

**Dichroïsme :** propriété qu'ont certains matériaux anisotropes d'absorber différemment une composante vectorielle du champ électrique.

Ici ce sont des polymères allongés qui par Joules absorbent les champs. Ces polariseurs sont caractérisés par des facteurs de transmission  $H_0$  (quand deux polariseurs sont en configuration parallèles) et  $H_90$  (quand les deux polariseurs sont en configuration croisés).

### Caractérisation de la sélectivité d'un couple de polariseurs



On peut caractériser un couple de polariseurs à l'aide des rapports d'intensité des spectres. Il nous faut alors : une QI jamais sans son AC, un couple de polariseurs, loin de la QI pour avoir des rayons peu inclinés par rapports aux polariseurs, spectroscopie (grosse boîte blanche) avec spid HR ; sensibilité à 10ms, décocher le "gérer automatiquement" pour garder la même baseline pour les trois spectres ; moyenne - une dizaine de spectres.

Faire 1 spectre de référence pour le signal de la QI  $I_{ref}$ , un pour les polariseurs config. parallèles  $I_{para}$ , et un pour la config. croisée  $I_{croise}$ . Exporter ses spectres un par un en fichier texte pour les lire sur Latis pro.

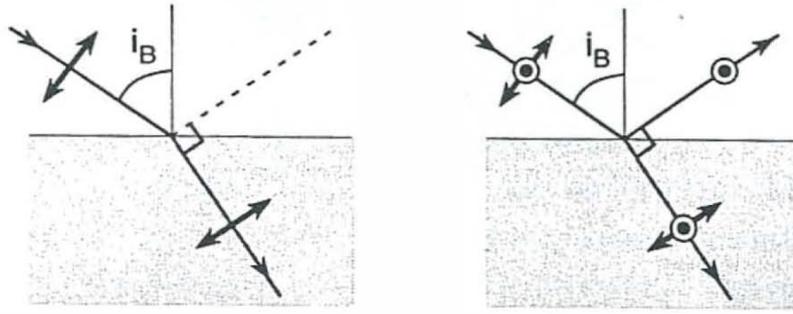
On observe un coefficient  $H_0 \sim 0.30$  et un coefficient  $H_90 \sim 10^{-4}$  comme donné dans la référence. Ces coefficients sont valables dans la gamme du visible mais plus en IR ; En effet les polariseurs n'ont pas une bonne réponse en IR, les molécules ne répondant plus à des excitations à ces longueurs d'onde.

## 2 Réflexion vitreuse

### 2.1 Étude de la lumière réfléchie

Lorsqu'une onde arrive sur la surface d'un milieu diélectrique, elle est partiellement réfléchie. Les ondes réfractée et réfléchie sont partiellement polarisées (on peut le montrer avec un polariseur dichroïque).

Cependant, il existe un angle d'incidence précis pour lequel l'onde réfléchie est complètement polarisée perpendiculairement au plan d'incidence (donc parallèlement à la surface). Cet angle est appelé **angle de Brewster**  $i_B$ . Ainsi, une polarisée dans le plan d'incidence ne sera pas réfléchie à l'angle de Brewster.



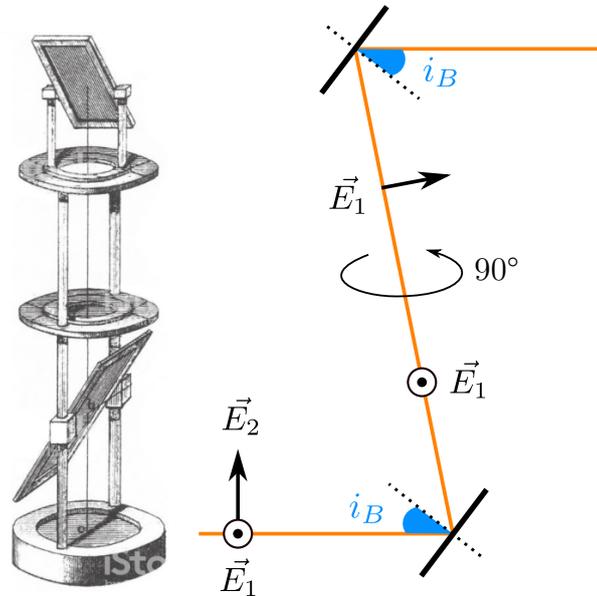
Notons  $t_B$  l'angle du rayon transmis et  $r_B$  l'angle du rayon réfléchi. On a d'office  $i_B = r_B$ . De plus, à l'angle de Brewster, le rayon réfracté a une direction orthogonale à celle du rayon réfléchi donc  $t_B = \frac{\pi}{2} - r_B = \frac{\pi}{2} - i_B$ . En partant de Snell-Descartes, on a :

$$n_1 \sin i_B = n_2 \sin t_B = n_2 \sin \left( \frac{\pi}{2} - i_B \right) = n_2 \cos i_B \tag{1}$$

On obtient donc finalement l'expression de  $i_B$  :

$$i_B = \arctan \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \tag{2}$$

On va mesurer cet angle pour du verre avec l'appareil de Nörremberg.



Le premier miroir polarise l'onde incidente à l'angle de Brewster  $i_{B1}$  : seule la composante perpendiculaire à l'interface est réfléchi. A l'arrivée du deuxième miroir, la lumière est complètement éteinte à l'angle de Brewster  $i_{B2}$  car l'onde précédemment perpendiculaire à l'interface est maintenant contenue dans le plan de l'interface à cause de l'angle de  $90^\circ$  entre les deux miroirs. On mesure donc 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

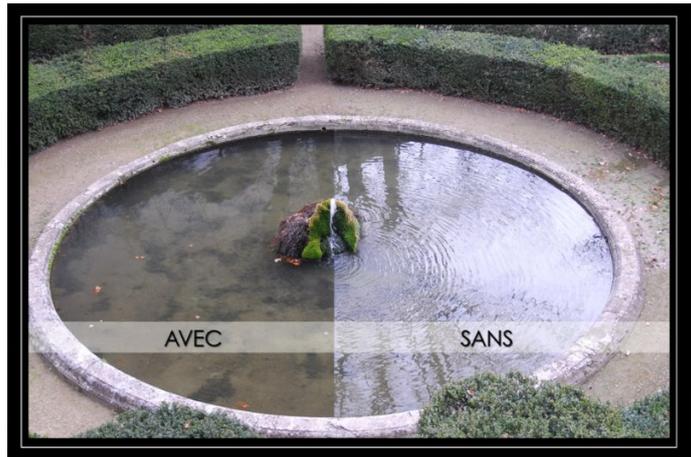
↻ ⊖

Éclairer 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  $i_B$ .

Enlever maintenant le polariseur en sortie du système et réitérer l'opération avec le deuxième miroir jusqu'à ce que la lumière s'éteigne complètement : on a notre deuxième valeur de  $i_B$ .

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

Ce phénomène est très utilisé en photographie par exemple car il permet d'éliminer les réflexions parasites avec un polariseur. C'est également le principe des lunettes de soleil polarisées.

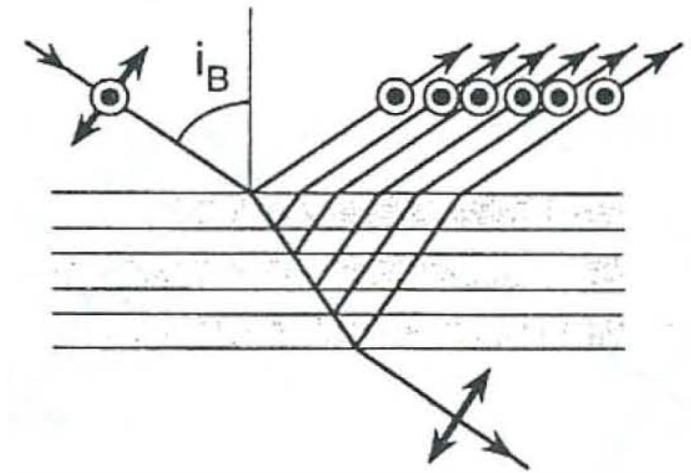


## 2.2 Étude de la lumière transmise

➤ Sextant p271

Le rayon transmis se polarise lui aussi partiellement à l'angle de Brewster. Ainsi, le rayon transmis (rayon n°2) arrive de nouveau sur une interface air/verre avec un angle d'incidence  $i_B$  et sera alors de nouveau séparée en un rayon réfléchi totalement polarisé et un rayon n°3 transmis un peu plus polarisée que le rayon n°2, car une partie de l'onde polarisée perpendiculairement au plan d'incidence est passée dans l'onde réfléchie.

Ainsi, si on rajoute  $2N$  interfaces (*i.e.*  $N$  lames de verre), on se retrouve avec une onde transmise quasi-totalement polarisée dans le plan d'incidence.



À chaque interface, le coefficient de transmission vaut  $T = 1 - R = 1 - \left(\frac{1-n^2}{1+n^2}\right)^2$  en prenant  $n_{\text{air}} = 1$  et avec  $n$  l'indice du verre. Pour  $n \simeq 1.5$ , on trouve  $T \simeq 1 - 0.11 = 0.89$ .

Pour quantifier à quel point une onde est polarisée, on définit le **taux de polarisation rectiligne**  $\eta$  par :

$$\eta = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \tag{3}$$

avec  $I_{\text{max}}$  et  $I_{\text{min}}$  les intensités maximale et minimale obtenue en faisant tourner un analyseur en sortie.

Pour une lumière totalement polarisée,  $I_{\text{min}} = 0$  donc  $\eta = 1$  tandis que pour une lumière non polarisée *rectilignement* on a  $I_{\text{max}} = I_{\text{min}}$  et donc  $\eta = 0$ .

On peut montrer que ce taux de polarisation est relié au coefficient de transmission  $T$  (et donc à  $R$  par :

$$\eta = \frac{1 - T^{2N}}{1 + T^{2N}} = \frac{1 - (1 - R)^{2N}}{1 + (1 - R)^{2N}} \Rightarrow \ln \frac{1 - \eta}{1 + \eta} = 2N \ln(1 - R) \tag{4}$$



### Vérification de l'expression 4

⚡ Sextant p271

⌚ 10 min

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

Il est nécessaire d'utiliser un faisceau incident polarisé, d'intensité stable et bien collimaté : en pratique, prendre un laser polarisé dont on place la direction de polarisation à 45° du plan d'incidence. Envoyer le faisceau sur une pile de lames sous incidence de Brewster.

Analyser le faisceau transmis à l'aide d'un polaroïd ; grâce à une photodiode, mesurer les signaux  $I_{\parallel}$  et  $I_{\perp}$  correspondant aux positions du polaroïd dans le plan d'incidence et perpendiculairement à celui-ci.

On en déduit  $\eta = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$ . La mesure de  $\eta$  peut se faire directement à partir des tensions  $U_{\max}$  et  $U_{\min}$  si on vérifie que la tension délivrée est bien linéaire au flux de photons (étalonnage avec Malus ?).

Tracer  $\ln \frac{1-\eta}{1+\eta} = f(N)$  pour vérifier la loi et remonter à  $R$ . On attend  $R \simeq 0.15$ .

## 3 Réflexion métallique

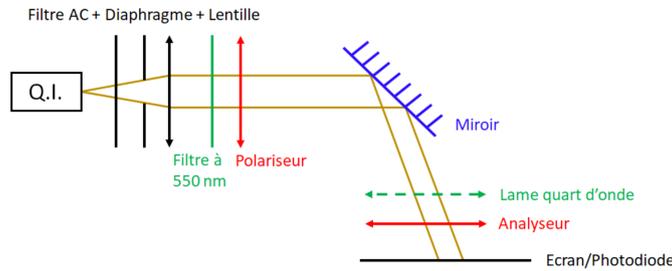
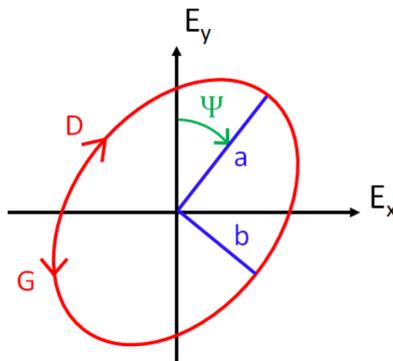


FIGURE 1 – Schéma du montage pour l'étude de la polarisation par réflexion sur un métal. L'onde incidente est polarisée rectilignement à l'aide du polariseur et analysée après réflexion à l'aide de l'analyseur et de la lame quart d'onde.

On s'intéresse au montage Figure 1. On considère une onde incidente non polarisée en incidence infini (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.

- 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 :

$$\epsilon = \frac{a}{b} = \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}}$$

- L'angle  $\psi$  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** :  $\psi$  doit être inférieur à  $90^\circ$ , il faut donc faire attention au signe de  $\psi$ !).
- Le sens de parcours de la polarisation (gauche ou droit). Pour le déterminer, on va avoir besoin de mettre une lame  $\lambda/4$  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.



### Mesure de polarisation elliptique par réflexion métallique



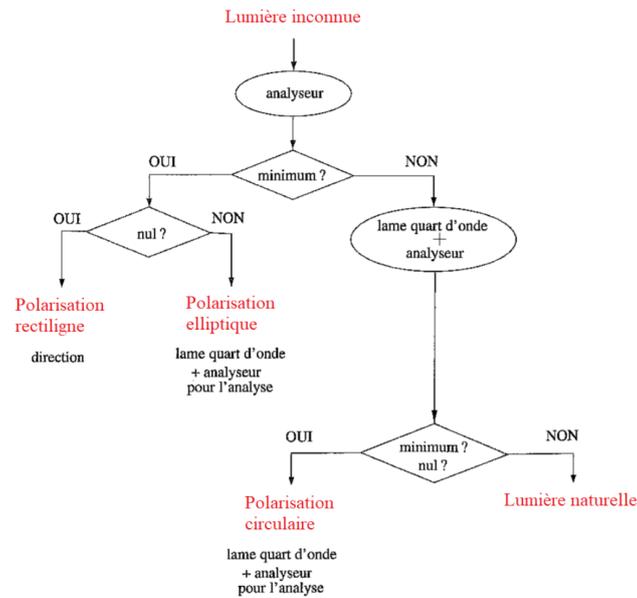
Placer le polariseur en sortie du système (QI + filtre AC + diaphragme + lentille) avec un angle arbitraire **QUI NE BOUGERA PAS POUR LE RESTE DE LA MANIP'**. Placer alors l'analyseur en sortie et vérifier que la lumière s'éteint lorsque les deux polariseurs sont croisés. Placer également la lame quart 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. Nous avons ici la valeur d' $\epsilon$ . Mesurer la différence d'angle entre le polariseur et l'analyseur pour un maximum d'intensité pour retrouver  $\psi$ .

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.

## Conclusion

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.



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.