Préparation à l'agrégation de Physique, ENS Paris-Saclay

TP Polarisation 2

Effet POCKELS

Biréfringence circulaire

François TREUSSART et François MARQUIER

25 et 26 janvier 2021

Biréfringence linéaire

Poste 1: Biréfringence induite: effets électro-optiques

On considère une cellule de POCKELS constituée d'un cristal de niobate de lithium ($LiNbO_3$)[1] taillé de sorte que son axe optique (Oz) de biréfringence naturelle soit perpendiculaire à la face d'entrée, et aligné avec la direction de propagation du faisceau.

D'après le chapitre 3 du cours[2] de Francois Treussart, les indices sont modifiés par le modulateur tels que $n_{x'} = n_0\left(1 + \frac{1}{2}n_0^2 r_{22}E_y\right)$ et $n_{y'} = n_0\left(1 - \frac{1}{2}n_0^2 r_{22}E_y\right)$ où r_{22} est un des coefficients électro-optiques décrivant la déformation de l'ellisoïde des indices sous l'effet d'un champ E_y. Le déphasage introduit entre entre les composantes x et y de la vibration à la longueur d'onde λ_0 est ainsi donné par:

$$\varphi \equiv \frac{2\pi}{\lambda_0}L(n_{y'} - n_{x'}) = -\frac{2\pi L n_o^3 r_{22} V}{\lambda_0 d}$$

La différence de potentiel V_π correspondant à la valeur pour laquelle le modulateur se comporte comme une lame demi-onde ($\varphi = \pi$) est donnée par:

$$V_\pi = \frac{\lambda_0 d}{2Ln_o^3 r_{22}}$$

Dans le cas de la cellule de la préparation à l'agrégation de longueur $L = 40$ mm et d'épaisseur $d = 3$ mm (voir les valeurs des indices et des coefficients électrooptiques sur la fiche de spécification de la cellule) on obtient $V_\pi \approx 310$ V.

ATTENTION: il ne faut jamais dépasser 400 V à l'entrée de la cellule.

[1] Le niobate de lithium est un milieu biréfringent uniaxe *négatif*.

[2] `http://old.physique-ens-cachan.educ.space/pagregp/cours/fichiers/Cours_opt_anis_v2_5.pdf`

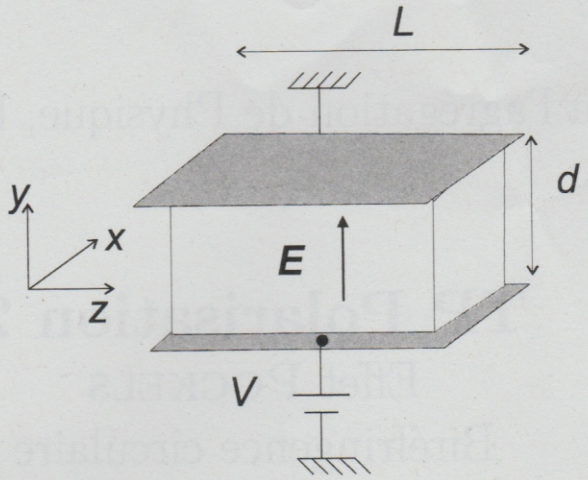


Figure 1: Cellule Pockels en niobate de lithium: configuration transverse des électrodes.

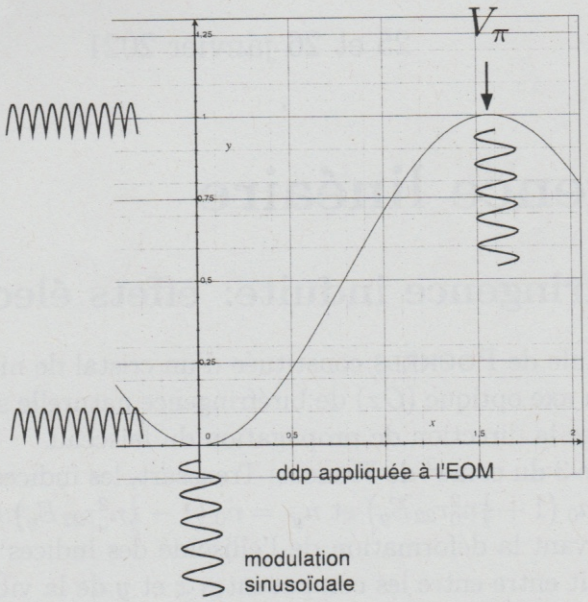


Figure 2: Principe de la modulation d'amplitude avec un modulateur électro-optique (EOM) entre polariseur et analyseur croisés, à 45° des lignes neutres induites. On a représenté l'intensité détecté sur une photodiode: $I(V) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\frac{V}{V_\pi}\right)$. Pour une ddp moyenne de 0 ou V_π une modulation sinusoïdale de faible amplitude autour de cette valeur continue donne une variation d'intensité correspondant à une sinusoïde redressée. Les deux arches ne sont de même amplitude que lorsque les ddp moyennes sont rigoureusement égales à 0 ou V_π.

Manipulations

- Croiser les deux polariseurs. Placer la cellule entre les deux: si l'extinction n'est plus totale, retoucher l'orientation[3].

[3]On aperçoit des franges d'interférence hyperboliques, qui résultent de la biréfringence naturelle en lumière convergente –ici, la lumière diffusée–: l'alignement est correct lorsque la tache du laser est sombre, au croisement

- *Appliquer la ddp V.* Orienter les polariseurs et analyseurs par rapport à la cellule pour la polarisation incidente soit à 45° de l'axe optique "induit" (qui doit être pratiquement vertical).
- *Vérification de la dépendance linéaire du déphasage en fonction de la ddp V.*
  - Méthode 1: Mesurer la biréfringence induite pour différentes valeurs de V, à l'aide de la méthode $\lambda/4$ (cf TP Polarisation 1).
  - Méthode 2: Moduler la ddp $V(t)$ avec un signal triangulaire allant de 0 à plus de V_π, puis montrer qu'il est possible d'ajuster l'intensité mesurée avec la fonction $I[V(t)] = I_0 \sin^2\left[\frac{\pi}{2}\frac{V(t)}{V_\pi}\right]$.
- *Modulation d'intensité.* Il est possible de repérer précisément la ddp V_π en modulant cette ddp autour d'une ddp centrale variant entre 0 et V_π à l'aide d'un signal sinusoïdal (Figure 2). Commencer par moduler la ddp sinusoïdalement autour de 0 V, avec une faible amplitude. Ajuster l'orientation de la cellule électro-optique par rapport au faisceau laser pour que les deux arches d'intensité optique détectées par la photodiode soient de même amplitude (situation qui correspond à l'incidence normale). Augmenter le décalage continu en ddp jusqu'à trouver une situation identique pour V_π.

  Pour ne pas déformer le signal de modulation, il est nécessaire de moduler autour du point de fonctionnement[4] $V_{\pi/2} \equiv V_\pi/2$.

Biréfringence circulaire

Introduction

Un matériau qui présente une biréfringence circulaire a la propriété de faire tourner la polarisation d'une vibration linéaire: on parle de *pouvoir rotatoire*. Dans ce type de matériaux, les polarisations circulaires gauche et droite se propagent avec des vitesses différentes. Pour avoir un tel effet, il est nécessaire que les molécules qui constituent le milieu soient chirales comme c'est le cas de certaines solutions dont les énantiomères sont séparés (par ex. le saccharose).

Parmi les matériaux biréfringents cristallins que nous avons étudiés dans le *TP Polarisation 1*, seul le quartz, à la différence du spath, possède en outre une *biréfringence circulaire* que l'on peut mettre en évidence dans des lames taillées perpendiculairement à l'axe optique ($Q_\perp$). En effet dans cette géométrie, les lames se comportent comme un milieu isotrope: tout se passe comme si elles ne présentaient pas de biréfringence linéaire. En revanche, dans les cristaux taillés parallèlement à l'axe, le pouvoir rotatoire est toujours masqué par la biréfringence.

L'angle $\psi(\lambda)$ dont tourne une polarisation linéaire traversant une lame de $Q_\perp$ d'épaisseur e, est donné de façon approchée par la relation de dispersion: $\psi = \frac{A}{\lambda^2}e$, où A est le *pouvoir rotatoire* du matériau, qui vaut pour le quartz:

$$A \simeq +1.32 \times 10^{-10} \text{ rad.m.}$$

des hyperboles.

[4]On peut aussi moduler autour de 0 V en faisant un biais de déphasage à l'aide d'une lame $\lambda/4$ placée devant la cellule pour travailler dans une région linéaire de la courbe $I(V)$

546nm vert : 270 → 310°
633nm rouge : 270 → 300°
589nm orange : 304°
532 nm vert : 311°
470nm bleu : 330°
436nm bleu 335°

Pour le doublet D du sodium ($\lambda \simeq 589$ nm) par exemple, l'angle de rotation vaut $\psi/e = 21.72°/\text{mm}$.

Nous remarquons d'autre part, qu'une lame de quartz fait tourner une direction de polarisation incidente d'un angle plus faible dans le rouge que dans le bleu.

Mise en évidence de la biréfringence circulaire

Poste 2: Lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe optique

Remarque très importante *Pour observer les propriétés de polarisation rotatoire d'une lame Q ⊥, il est nécessaire de travailler en éclairage bien parallèle et normal à la lame: un angle d'inclinaison par rapport à l'incidence normale ferait apparaître des effets de biréfringence linéaire qui domineraient devant la biréfringence circulaire.*

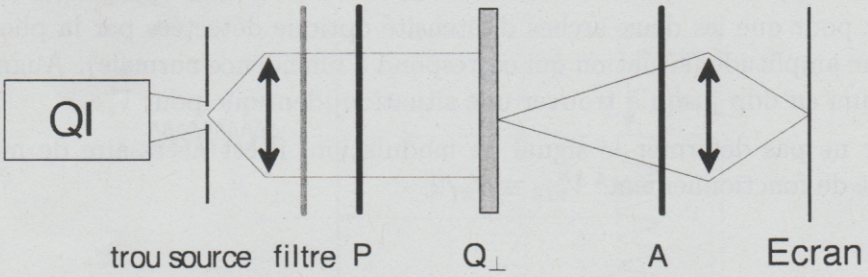


Figure 3: Observation de la biréfringence circulaire d'une lame de quartz Q ⊥

En lumière monochromatique (Lampe QI+filtre interférentiel) On interpose une lame de quartz $Q_\perp$ d'épaisseur $e = 1.5$ mm, entre analyseur et polariseur croisés (voir le montage de la Fig.3). L'extinction n'est plus réalisée.

- Montrer que pour la rétablir il faut tourner l'analyseur d'un angle $\psi(\lambda)$.
- Montrer que si l'on retourne la lame, les mêmes effets sont observés.
- Montrer à l'aide d'un jeu de filtres interférentiels que la radiation bleue tourne plus que la radiation rouge.

En lumière blanche Reprendre le montage de la Fig.3 en ôtant le filtre interférentiel. Il apparaît une coloration de l'image sur l'écran qui est due à l'extinction de certaines longueurs d'onde (celles pour lesquelles $\psi = \pm 180°k$). Si la lame est mince (c'est le cas ici), les angles de rotation des longueurs d'onde du spectre visible sont inférieurs à 180°.

- Observer qu'une rotation de l'analyseur provoque un changement de couleur.
- ? Montrer qu'on peut éteindre le jaune moyen ($\simeq 560$ nm) et faire apparaître la *teinte sensible*, dite "lie de vin". violet
- Déterminer *le sens de la lame* étudiée à partir de la teinte vers laquelle vire la coloration de l'image, quand on tourne l'analyseur à droite *à partir de la teinte sensible* (la lame est Gauche si la teinte vire au bleu et Droite si la teinte vire au rouge).

Poste 4: Spectre cannelé de polarisation rotatoire

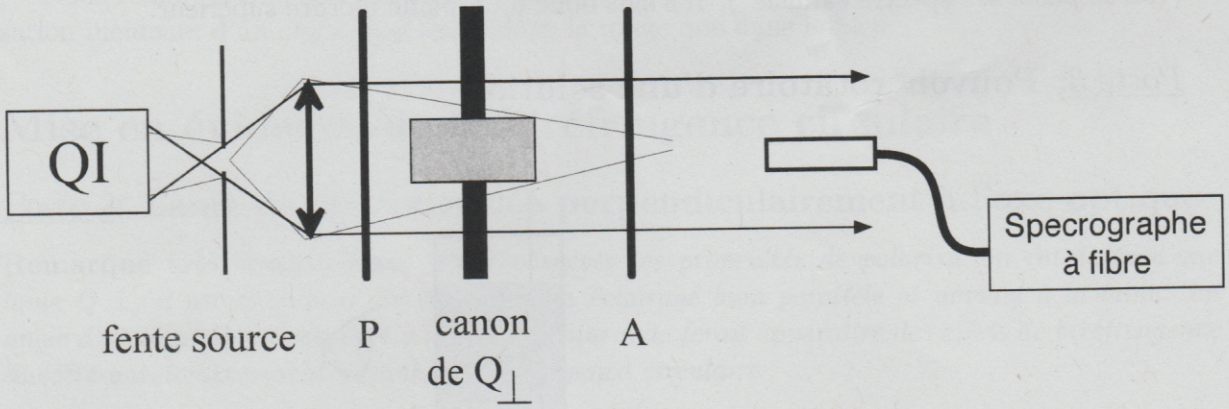


Figure 5: Montage pour l'enregistrement du spectre cannelé de polarisation rotatoire d'un long cristal de quartz (dit *canon de quartz) $Q \perp$ d'épaisseur $e \simeq 21,0$ mm.*

Mise en évidence du spectre cannelé

On réalise le montage de la Fig.5. Entre polariseur et analyseur croisés, le canon de quartz produit une extinction à chaque longueur d'onde λ_i telle que:

$$\psi(\lambda_i) = \frac{A}{\lambda_i^2} e = (k + i - 1)\pi \tag{1}$$

- Faire l'image d'une fente source sur l'écran et observer le spectre de la lumière émergeant du canon de quartz, à l'aide du prisme à vision directe.
- Tourner l'analyseur et observer que les cannelures se déplacent, contrairement à celles du spectre cannelé de biréfringence (pour lequel seul le contraste varie). Déduire du sens de leur déplacement, le sens du pouvoir rotatoire du canon de quartz. De quel angle faut-il tourner l'analyseur pour faire défiler une frange ?

Analyse spectrale avec un spectrographe à fibre

On peut utiliser le spectre cannelé pour mesurer le pouvoir rotatoire A.

- Faire un enregistrement du spectre à l'aide du spectrographe à fibre. Déduire de la position des cannelures le pouvoir rotatoire A et l'entier k de la relation (1).

  Note: La résolution du spectrographe et de l'ordre de 0.6 nm

Poste 5: Biquartz de SOLEIL

Principe de fonctionnement

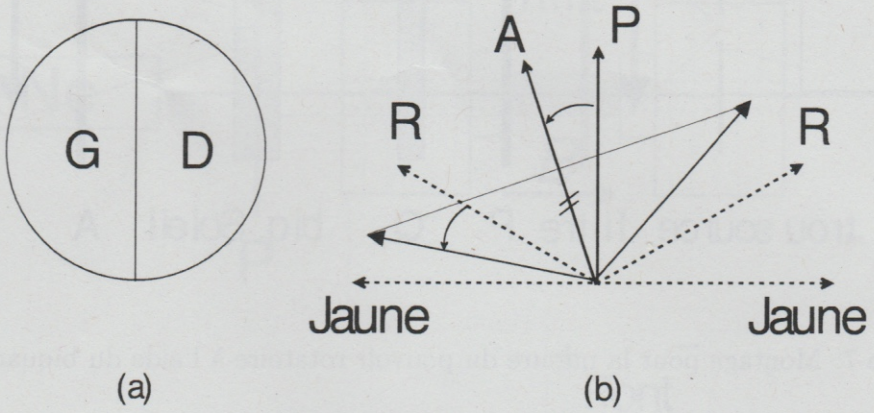


Figure 6: (a) demi-lames de quartz Droite et Gauche formant le biquartz de Soleil. (b) Rotation ψ introduite, pour le rouge R, par une lame de $Q_\perp$, et position de l'analyseur $\mathcal{A}$ qui permet de rétablir l'égalité des éclairements sur les deux demi-lames du biquartz.

En lumière monochromatique, le pointé d'une polarisation émergeante par extinction est peu précis (quelques degrés). On améliore considérablement cette précision grâce au biquartz de SOLEIL, constitué de 2 demi-disques de $Q_\perp$, l'un dextrogyre (D) l'autre lévogyre (G), de même épaisseur e (Fig.6(a)), tels que $\psi(560 \text{ nm}) = \pm 90°$ (soit $e = 3.75$ mm).

Entre polariseur et analyseur parallèles, les deux demi-lames présentent exactement la même teinte sensible, dite "lie de vin". L'introduction d'une lame de $Q_\perp$ déséquilibre les teintes sur les deux demi lames: pour rétablir l'égalité des éclairements, en lumière monochromatique, il faut tourner l'analyseur du même angle $\psi(\lambda)$ que celui introduit par la lame (voir Fig.6(b)). L'oeil étant très sensible à une différence d'éclairement, cette technique de pointé donne une mesure d'angle à mieux que $30'$ d'arc.

Mesure de la biréfringence circulaire

- Former l'image du biquartz sur l'écran (Fig.7), entre analyseur et polariseur parallèles. Les deux plages présentent la même teinte "lie de vin".
- Repérer le sens de chaque demi-lame.
- Intercaler la lame de $Q_\perp$ (D ou G) à étudier d'épaisseur $e = 1.5$ mm. Il réapparaît deux colorations distinctes sur chaque demi-lame: en déduire le sens (D ou G) de la lame intercalée.

On travaille maintenant en lumière monochromatique à l'aide de quelques filtres interférentiels $\lambda = 546, 589, 650$ nm.

- Mesurer l'angle $\psi(\lambda)$ dont il faut tourner l'analyseur pour rétablir l'égalité d'éclairement, et qui correspond à la rotation introduite par la lame.
- Tracer $\psi(1/\lambda^2)$ et en déduire le pouvoir rotatoire A de la lame de quartz.

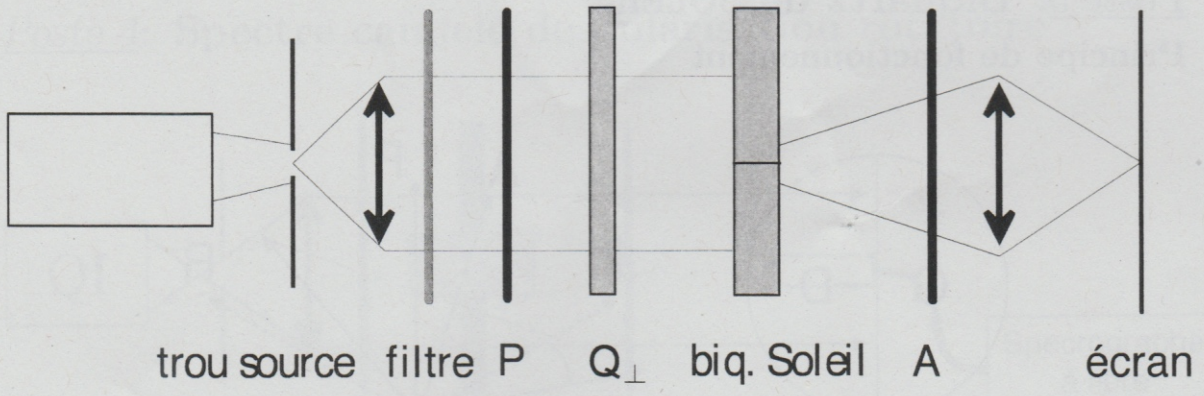


Figure 7: Montage pour la mesure du pouvoir rotatoire à l'aide du biquartz de Soleil.

Remarques

1. Si la lame est trop épaisse, la mesure effectuée ne donne le pouvoir rotatoire qu'à $k\pi$ près.
2. Le pointé d'une polarisation à l'aide du biquartz de SOLEIL s'apparente à la méthode de l'analyseur à pénombre (comparaison de plages d'éclairement), mais, contrairement à cette dernière, qui utilise une lame $\lambda_0/2$, il peut être fait à toute longueur d'onde.
3. Il existe d'autres types de biquartz (notamment tels que $\psi(\text{jaune}) = \pm 180°$ au lieu de $\psi(\text{jaune}) = \pm 90°$ que vous pourrez rencontrer dans les collections d'autres Préparations à l'Agrégation. Soyez donc vigilants!

Poste 6: Biréfringence circulaire induite. Effet FARADAY

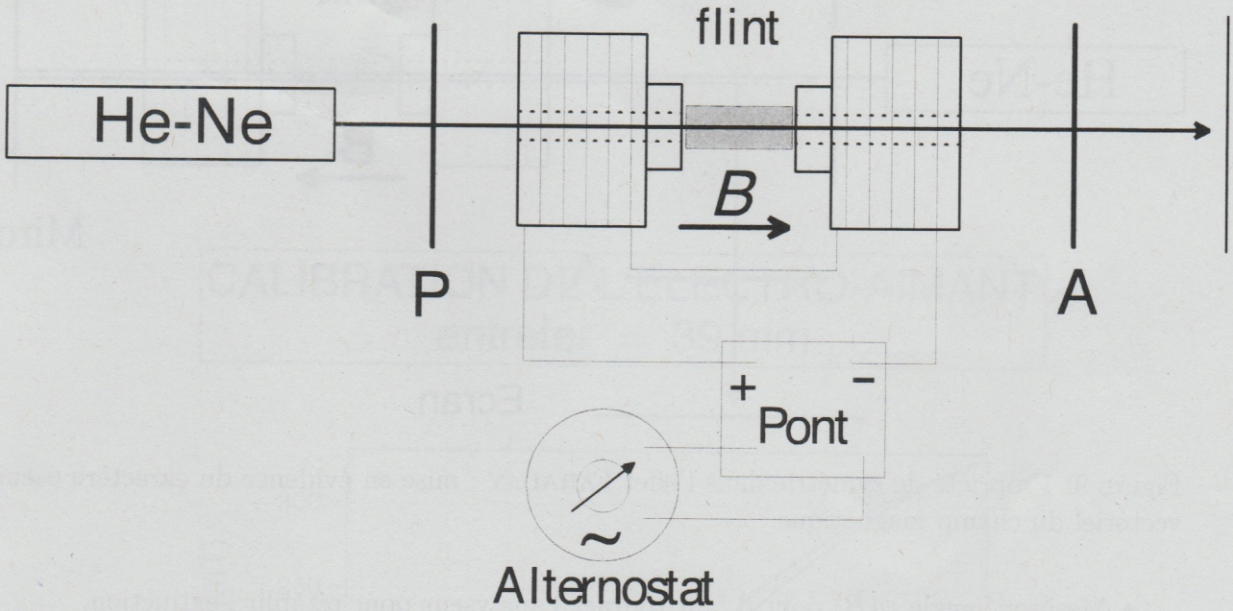


Figure 8: Montage pour observer l'effet FARADAY, de polarisation rotatoire induite par un champ magnétique.

Un corps transparent isotrope d'épaisseur ℓ, placé dans un champ magnétique B produit une rotation du plan de polarisation d'un faisceau qui le traverse parallèlement à la direction de B. L'angle de rotation ψ est compté positivement dans le sens du courant magnétisant circulant dans les bobines de l'électroaimant, et suit la loi de VERDET:

$$\psi = \rho \ell B, \tag{2}$$

où ρ représente la "constante" de VERDET, qui dépend de la longueur d'onde.

Mesure de la constante de VERDET

On réalise le montage de la Fig.8, où un barreau de verre en flint, de longueur $\ell = 30$ mm, est placé dans l'entrefer de l'électroaimant (alimenté en courant continu d'intensité inférieure à $I_{\text{max}} = 2$ A). La distance entre les pièces polaires coniques percées utilisées est d'environ 39 mm, et nous donnons sur la Fig.10 la dépendance $B(I)$, du champ au centre de l'entrefer, pour un courant d'intensité I circulant dans les bobines, dans cette configuration.

On pourra faire l'étude à deux longueurs d'onde: celle d'une diode laser verte ($\lambda = 532$ nm) et celle d'une diode laser rouge ($\lambda = 656$ nm)[6].

- Se placer entre analyseur et polariseur croisés. Introduire le barreau de flint dans l'entrefer. Il y a déjà une très faible rotation due au champ rémanant des pièces polaires. La mesurer.

[6] Il faut superposer les deux faisceaux à l'aide d'une lame séparatrice pour faire les mesures aux mêmes valeurs du champ.

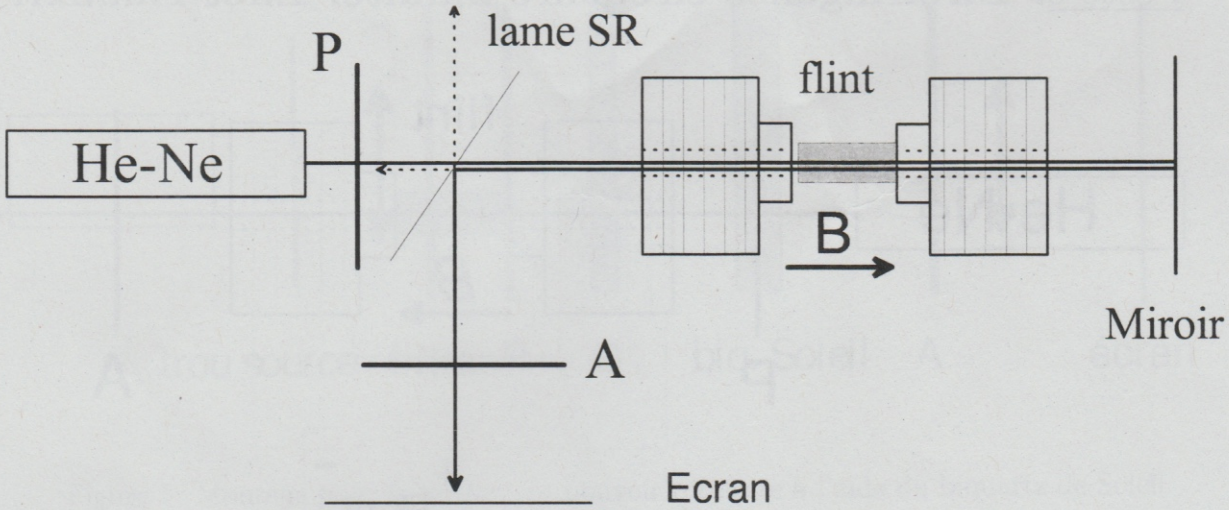


Figure 9: Propriété de symétrie dans l'effet FARADAY ; mise en évidence du caractère pseudo-vectoriel du champ magnétique.

- Mesurer l'angle $\psi(B)$ dont il faut tourner l'analyseur pour rétablir l'extinction.
- En déduire la constante de VERDET ρ aux deux longueurs d'onde de mesure. On s'attend à ce que $\rho(532\text{ nm}) > \rho(656\text{ nm})$.

Propriétés de symétrie

Le sens de rotation introduit par le barreau de flint est indépendant du sens de propagation de la lumière comme on peut s'en convaincre en réalisant l'expérience de la Fig.9.

- Introduire une lame semi-réfléchissante à l'entrée de l'électroaimant et un miroir en sortie qui permet un double passage.
- À l'aide de l'analyseur, montrer que l'angle de rotation correspond à l'angle cumulé d'un double passage[7].

Cette expérience illustre le principe d'un *isolateur optique*. Si le champ est choisi pour que la rotation soit de 45° après chaque passage, alors, après le double passage, elle sera de 90°. Le polariseur d'entrée éteindra alors tout retour de faisceau vers la source.

Il est aussi judicieux de faire remarquer à l'occasion de cette expérience, que cette propriété d'invariance du sens de rotation (vis-à-vis d'un observateur du faisceau venant vers lui), est liée à la symétrie des sources du champ[8], c'est à dire au caractère pseudo-vectoriel du champ magnétique qu'elles créent.

[7]Vous utiliserez un miroir en verre noir qui ne fait pas tourner la polarisation contrairement aux miroirs aluminisés.

[8]Les courants circulant dans les bobines sont invariants par symétrie par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe et passant au centre de l'entrefer.

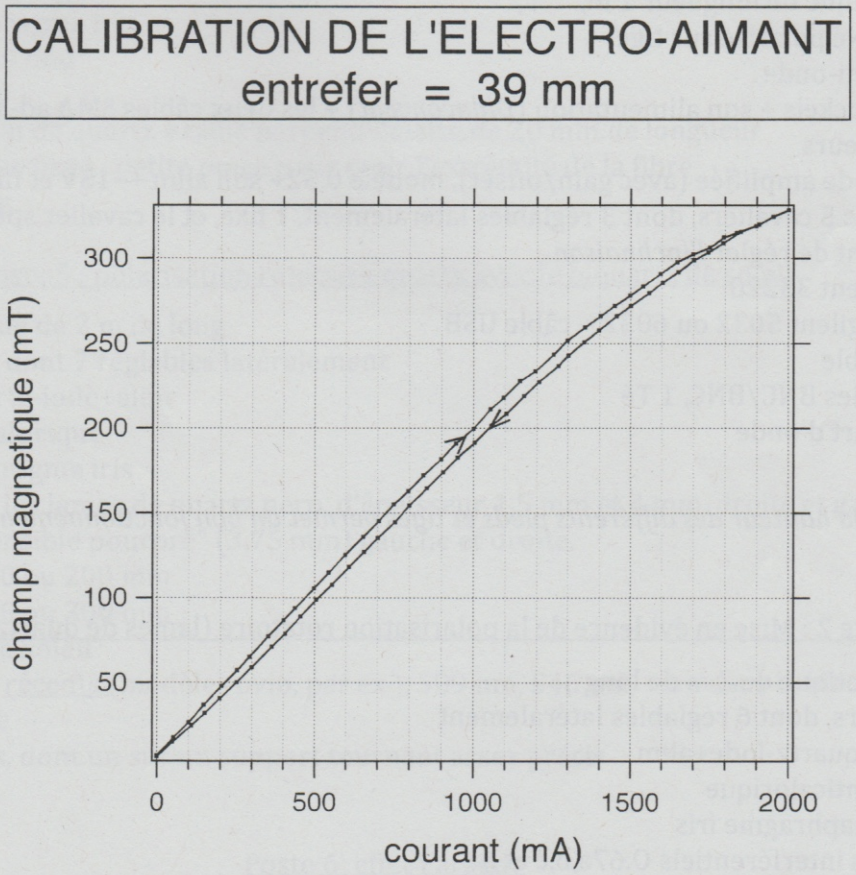


Figure 10: Courbe de calibration de l'électroaimant pour un entrefer correspondant à la longueur du barreau de verre flint. *Cette calibration n'est donnée qu'à titre indicatif. Elle doit être refaite pour plus de précision.*

TP optique anisotrope n°2

Liste du matériel

Mise à jour : 21/11/2017

Généralités

- Installation en salles de TP d'optique et de TP d'élec
- une lampe de chevet par poste.
- Répartition des postes : 5 en optique, 2 en élec (par exemple les deux Pockels)

Poste 1 : Effet Pockels

- banc optique de longueur 1 m,
- laser HeNe polarisé sur tige
- lame demi-onde
- cellule Pockels + son alimentation (*Didaconcept*) + les deux câbles SMA ad-hoc
- 2 polariseurs
- Photodiode amplifiée (avec gain/offset), modèle 0.52+ son alim +- 15V et fils ad-hoc
- cavaliers : 5 cavaliers, dont 3 réglables latéralement, 1 fixe, et le cavalier spécial permetant de régler *l'inclinaison*.
- GBF Agilent 33220
- oscillo Agilent 5032 ou 6032 + câble USB
- PC portable
- trois câbles BNC/BNC, 1 Té
- lame quart d'onde
- écran

Vérifier que la hauteur des différents pieds et tiges permet un bon fonctionnement de l'ensemble.

Poste 2 : Mise en évidence de la polarisation rotatoire (lames de quartz Q⊥)

- 1 banc optique de 2 m de long
- 9 cavaliers, dont 6 réglables latéralement
- 1 lampe quartz-iode+alim
- 1 filtre anticalorique
- 1 petit diaphragme iris
- les filtres interférentiels O.67a,b,c et d
- des lames de quartz perp., d'épaisseur 1,5 mm et 4 mm, droite et gauche
- 1 doublet 100 ou 200 mm
- 1 doublet 200 ou 300 mm
- 2 polariseurs, dont un sur un support tournant assez précis
- 1 écran

Poste 3 : polarisation rotatoire du glucose D

1) tube à fond plat, avec solution, polariseur tournant motorisé etc....
2) Expérience quantitative (en cuve)

- 1 lampe Na lumineuse
- 1 laser HeNe
- 1 condenseur

- 2 grands polariseurs grands (Spindler-Hoyer, par ex.)
- 1 doublet 200 mm
- 1 pied boy avec cuve en verre rectangulaire de 5/6 cm de long
- un réglet
- 200 mL de solution de glucose D+ (dextrose) à environ 300 g/L (préciser la concentration préparée SVP)
- si possible, un peu de solution de fructose (environ 50 mL, avec une concentration de l'ordre de 150 g/L connue)
- 1 écran

Poste 4 : spectre cannelé de pouvoir rotatoire

- 1 banc optique
- 8 cavaliers, dont 4 réglables latéralement
- 1 lampe quartz-iode+alim
- 1 filtre anticalorique
- 1 petit diaphragme iris
- 1 doublet 100 mm
- 2 polariseurs
- cristal « canon de quartz » taillé perpendiculaire de 20 mm de longueur
- spectrographe fibré ; petite pince pour tenir l'extrémité de la fibre
- 1 PC portable

Poste 5 : polarisation rotatoire quartz avec le biquartz de soleil

- 1 banc optique de 2 m de long
- 10 cavaliers, dont 7 réglables latéralement
- 1 lampe quartz-iode+alim
- 1 filtre anticalorique
- 1 petit diaphragme iris
- râtelier avec les lames de quartz perp. d'épaisseur 1,5 mm et 4 mm, droite et gauche et ep. "teinte sensible pourpre" (3.75 mm) gauche et droite.
- 1 doublet 100 ou 200 mm
- 1 doublet 200 ou 300 mm
- le biquartz de Soleil
- filtres interf. récents (modèles ovio, par ex.), 589 nm, 546 nm, + un dans le bleu et un dans le rouge
- 2 polariseurs, dont un sur un support tournant assez précis
- 1 écran

Poste 6: effet Faraday

- l'électro-aimant et son alim.
- le barreau de flint à forte constante de Verdet
- petit laser Nd :YAG doublé (émettant donc à 532 nm)
- 5 pieds croissants
- 2 polariseurs, dont 1 avec une monture assez précise (ex. : *Didalab* à aiguille)
- 1 lame semi-réfléchissante
- 1 miroir "noir", ou mieux : vrai miroir métallique sur une monture trait/point/plan

***

page 1

TP: P2

TP: Polarisation 2

Poste 3:
- faire extinction
- ajouter glucose
- mesurer l'angle pour ré-avoir l'extinction

Pour glucose D: 100g ds mL H_2O → 14° droite (avec laser He-Ne)

manip qualitative: pas exceptionnel

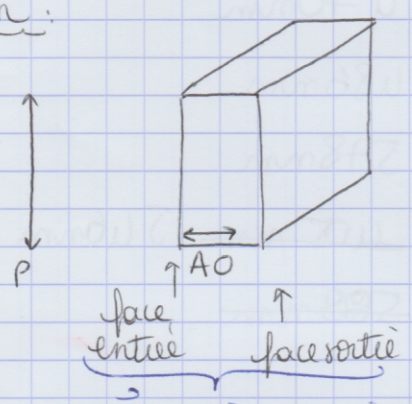
Poste 2:

lumière monochromatique: rouge: 31° gauche

bleu (436nm) ≃ entre 40° et 60° gauche

On n'y voit rien!

explication:



⇒ $\vec{E}$ ne voit jamais l'indice extraordinaire

⇒ biréfringence circulaire: 1 pdai° rectiligne = gauche + droite

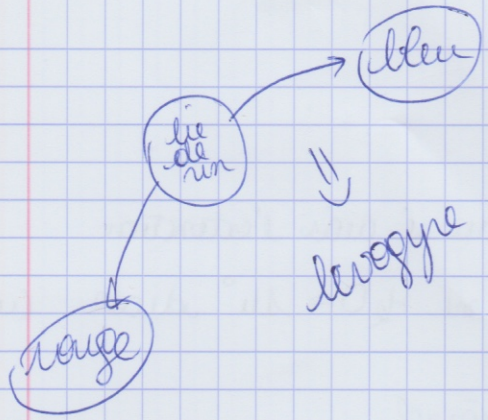
par passage dans la lame déphaso gauche pl droite.

+ déphasage en $\frac{1}{\lambda^2}$ donc bleu tourne ⊕ que rouge.

teinte sensible: extinction au jaune (⊕ sensible pour oeil) donc quand décalle un peu: on éteint le rouge ou le bleu (donc on voit bleu ou rouge).

Donc quand on tourne on observe la couleur complémentaire de celle qui a été éteinte (ⓘ si on déplaçait une cannelure sur le spectre)
↳ assez fin pour qu'on considère une longueur d'onde

cv filtre bleu ... g/ R → λ



Poste 5 :

on repère en lumière monoch → quand éteinte !

ψ	λ
25° (D)	505 nm.
60° (D)	470 nm
35° (D)	486 nm.
5° (D)	578 nm.
10° (D)	~~405 nm~~. 546 nm.
	~~588 nm~~.

données : $e_D = 3{,}75$ mm.

Poste 6 : il faut que ça se cumule c'est dû au dip maghe (qui est un pseudo radical)

Flash