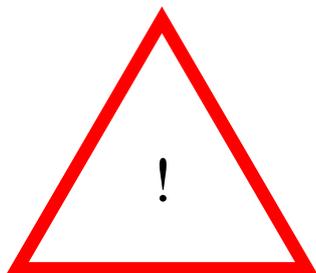


## ACTIVITE OPTIQUE ET EFFET FARADAY



Laser de 400 à 650nm type  
Diode elliptique de 3 à 10mW class II b  
Ne jamais regarder le faisceau du rayon laser droit dans  
les yeux, attention aux réflexions.  
Utiliser les lunettes de protection mises à disposition en  
fonction de la longueur d'onde !!!

### 1. But :

Etudier la rotation de la polarisation optique par des molécules organiques chirales (l'activité optique naturelle) et celle par des matériaux soumis à un champ magnétique (l'effet Faraday)

### 2. Introduction

L'*activité optique* est une tendance de certains matériaux à tourner le vecteur de polarisation de la lumière les traversant. Ce phénomène, qui est appelé aussi la *biréfringence circulaire*, a lieu lorsque les indices de réfraction  $n_D$  et  $n_G$  (ainsi que les vitesses de lumière  $v_D$  et  $v_G$ ) correspondants à la polarisation circulaire droite (D) et à la polarisation circulaire gauche (G) ne sont pas égales. Cette distinction provient d'une absence de symétrie entre les directions droite et gauche.

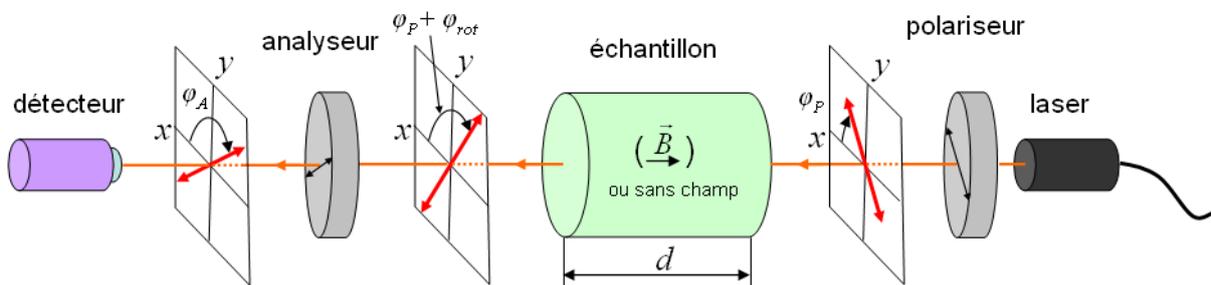
Il faut distinguer l'activité optique *naturelle*, déjà présente en l'absence de tous les facteurs externes et la rotation de polarisation engendrée par le champ magnétique, qui supprime la symétrie physique entre les directions droite et gauche (*effet Faraday*). Dans ces deux cas, l'origine de biréfringence circulaire est nettement différente.

Au cours de cette expérience, nous allons nous familiariser avec l'activité optique naturelle dans les solutions de sucre et de fructose. Nous allons aussi étudier l'effet Faraday dans des barreaux de verre dopé par certains atomes magnétiques. Pour atteindre ce but, on va d'abord assembler et tester un polarimètre.

### 3. Théorie

#### A. La polarimétrie et la loi de Malus

La polarisation de la lumière est définie comme la direction du vecteur électrique  $\vec{E}$  de l'onde électromagnétique. Dans le cas de la polarisation rectiligne, le vecteur électrique est toujours le long de la même direction. Ce genre de lumière est produit, par exemple, après le passage d'un faisceau optique à travers un polariseur (Polaroid), qui se compose de longues molécules conductrices alignées selon un certain axe. La composante du vecteur électrique parallèle à cet axe est presque complètement absorbée, tandis que l'autre composante traverse le polariseur quasiment sans pertes. La polarisation de la lumière après le passage dans le polariseur est définie comme l'axe du polariseur.



**Fig.1** Schéma d'expérience optique. Les flèches rouges indiquent la polarisation de la lumière.

Considérons le passage de la lumière à travers deux polariseurs comme décrit dans la Fig. 1. Habituellement, on nomme le premier et le deuxième polariseur respectivement 'polariseur' et 'analyseur'; les orientations de ces axes sont décrits par les angles  $\varphi_P$  et  $\varphi_A$ . Typiquement, on fixe le polariseur et on tourne l'analyseur, vu que certaines sources de lumière (par exemple, le laser) sont déjà largement polarisées. L'intensité  $I$  enregistrée par le détecteur est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique. En absence d'échantillon optiquement actif, on obtient une extinction presque complète du faisceau en croisant les axes du polariseur et de l'analyseur. Par contre, si ces axes sont parallèles, le maximum de transmission est atteint. La loi de Malus indique que l'intensité de lumière qui traverse un tandem de polariseurs est proportionnelle au cosinus carré de la différence d'angles du polariseur et de l'analyseur) :

$$I = I_0 \cos^2(\varphi_P - \varphi_A) . \quad (1)$$

Si un échantillon est placé entre les polariseurs, il provoquera la rotation du vecteur de polarisation par un certain angle  $\varphi_{rot}$ , et la relation (1) devient :

$$I = I_0 \cos^2(\varphi_P - \varphi_A + \varphi_{rot}) . \quad (2)$$

La rotation peut être déterminée en mesurant le changement de position des minima (ou des maxima) de la courbe  $I(\varphi_A)$ .

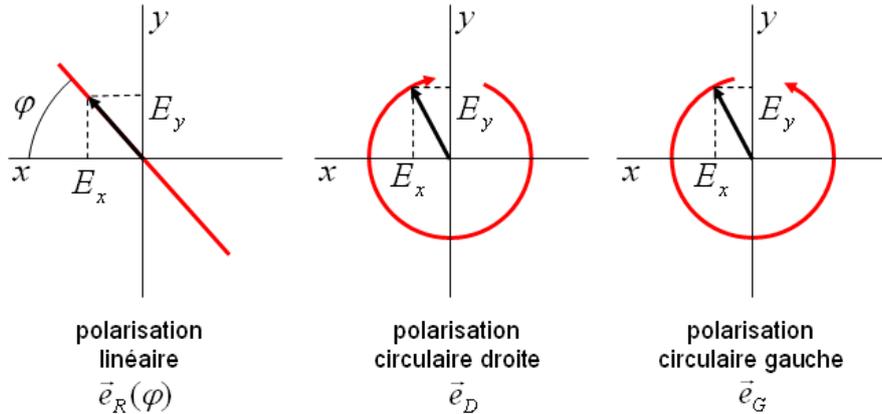
#### B. Description mathématique de la rotation optique

Afin de démontrer qu'une différence entre  $n_D$  et  $n_G$  se traduit par la rotation de la polarisation, il

faut représenter la polarisation par le vecteur électrique, aussi appelé le vecteur de Jones :

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

où Oxy est le plan perpendiculaire à la propagation de lumière (Fig.1).



**Fig.2** La trajectoire (en rouge) du vecteur électrique (en noir) correspond aux polarisations linéaires et circulaires (droite et gauche).

Le vecteur électrique d'une lumière linéairement polarisée (normalisé par unité) est donné par

$$\vec{e}_R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

et peut toujours être écrit comme la somme de deux faisceaux ayant des polarisations circulaires droite et gauche décrites par les vecteurs normalisés

$$\vec{e}_D = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \text{ et } \vec{e}_G = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Ainsi :

$$\vec{e}_R(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \vec{e}_D e^{i\varphi} + \vec{e}_G e^{-i\varphi} \}. \quad (6)$$

Fig.2 décrit le mouvement du vecteur électrique dans le plan Oxy pour toutes les trois polarisations.

À l'entrée de l'échantillon, le faisceau a le vecteur électrique selon l'axe du polariseur :

$$\vec{E}_{\text{entrée}} = A \vec{e}_R(\varphi_P) = \frac{A}{\sqrt{2}} \{ \vec{e}_D e^{i\varphi_P} + \vec{e}_G e^{-i\varphi_P} \}, \quad (7)$$

( $A$  étant l'amplitude dont la valeur exacte ne nous intéresse pas) Après avoir parcouru une distance  $d$  dans le matériau, chaque composante acquiert la phase additionnelle  $\varphi_D = 2\pi n_D d / \lambda$  et  $\varphi_G = 2\pi n_G d / \lambda$  ( $\lambda$  est la longueur d'onde de lumière dans le vide). A cause de l'absorption de la lumière dans l'échantillon, l'amplitude du faisceau va aussi être diminuée par le coefficient de transmission  $T$  (nous supposons que  $T$  soit le même pour les deux composantes). À la sortie de l'échantillon, le vecteur de Jones total devient

$$\vec{E}_{\text{sortie}} = T \frac{A}{\sqrt{2}} \{ \vec{e}_D e^{i\varphi + i\varphi_D} + \vec{e}_G e^{-i\varphi + i\varphi_G} \} = TA \vec{e}_R(\varphi + \varphi_{\text{rot}}) e^{i\varphi + i\varphi_{\text{ moy}}} \quad (8)$$

où

$$\varphi_{rot} = \frac{\varphi_D - \varphi_G}{2} = \pi(n_D - n_G) \frac{d}{\lambda} \quad (9)$$

$$\varphi_{moy} = \frac{\varphi_D + \varphi_G}{2} = \pi(n_D + n_G) \frac{d}{\lambda} \quad (10)$$

On voit qu'après le passage de la lumière à travers l'échantillon, on retrouve de nouveau la polarisation linéaire. Mais cette fois la polarisation est tournée par d'un angle  $\varphi_{rot}$ . La rotation est donc proportionnelle à la distance parcourue et à la différence entre  $n_D$  et  $n_G$ .

Notons qu'il faut bien distinguer la rotation du plan de polarisation linéaire de la lumière qui traverse le matériau optiquement actif et la rotation du vecteur électrique qui correspond à la polarisation circulaire.

### C. L'activité optique naturelle

Certains milieux font tourner le plan de polarisation de la lumière en l'absence de champ magnétique. La première fois, la rotation optique a été observée par Arago en 1811 dans le quartz. Actuellement, un grand nombre des composés chimiques (surtout organiques) possédant cette propriété sont connus. Notamment, la rotation optique est très forte dans les solutions de sucre (saccharose, glucose, fructose etc.) ce qui permet d'utiliser la polarimétrie pour la détection précise de la concentration de ces composants dans les produits alimentaires au niveau industriel (saccharimétrie).

La rotation peut se produire dans les deux sens. Les composés induisant une déviation de la polarisation vers la droite, lorsqu'on fait face à la lumière, sont appelées dextrogyres ( $\varphi_{rot} > 0$ ); les composés induisant la rotation vers la gauche sont qualifiés de lévogyres ( $\varphi_{rot} < 0$ ). L'angle de rotation est proportionnel à la densité volumique  $\rho$  de composé optiquement actif et la distance parcourue par la lumière :

$$\varphi_{rot} = \alpha \cdot \rho \cdot d \quad (11)$$

Le coefficient  $\alpha$  qui dépend de la température et la longueur d'onde, est appelé la rotation spécifique (aussi le pouvoir rotatoire). Dans le système SI, on mesure  $\rho$  en  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ , la distance est exprimée en mètres et l'angle est mesuré en degrés; alors l'unité de  $\alpha$  est  $[\text{deg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}]$ . Cependant, en applications pratiques, l'unité  $[\text{deg} \cdot \text{dm}^{-1} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}]$  est généralement utilisée, ce qui correspond à la densité exprimée en  $[\text{g}/\text{cm}^3]$ , et à la distance mesurée en dm.

Dans les solutions liquides, l'orientation des molécules est aléatoire. Pour cette raison, la solution est absolument isotrope et l'angle de rotation optique est indépendant de la direction du faisceau et de son plan de polarisation à l'entrée de l'échantillon.

L'activité optique est observée dans les matériaux contenant les structures moléculaires qui n'ont pas de la symétrie 'droite  $\leftrightarrow$  gauche'. Plus précisément, les molécules ont une structure qui ne permet pas de retrouver par rotation le miroir de cette même structure. Les molécules de ce genre sont dites *chirales*. La *chiralité* est donc l'origine de l'activité optique naturelle.

Le paramètre important pour la valeur de rotation optique naturelle est le rapport  $(a/\lambda)$  de la taille des molécules  $a$  chirales. L'effet diminue vite avec la longueur d'onde et disparaît dans la limite des grandeurs  $\lambda$  dans la région infrarouge et micro-ondes.

La théorie quantitative de rotation optique naturelle est assez compliquée, ce qui ne nous permet

pas de l'aborder dans cette introduction.

La solution contient plusieurs substances actives, sans interaction entre-elles, le pouvoir rotatoire du mélange est la somme des pouvoirs rotatoires des constituants :

Pour une solution de *plusieurs* substances optiquement actives, *la loi de Biot* dit que sans interaction entre les substances, la rotation spécifique est la somme pondérée des rotations spécifiques des constituants :

$$\alpha_{tot} = \sum_i c_i \alpha_i \quad (12)$$

où  $c_i$  sont les concentrations normalisées de substances ( $\sum_i c_i = 1$ ).

#### D. Effet Faraday

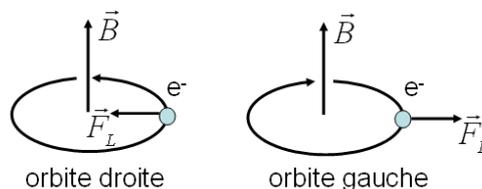
On peut aussi observer la rotation de polarisation dans les milieux sans activité optique naturelle, soumis à un champ magnétique parallèle au faisceau de lumière. Ce phénomène a été découvert par Faraday en 1846. En contraste avec la rotation naturelle, le sens de la rotation magnétique n'est pas lié à la direction de propagation du faisceau. Au contraire, il dépend seulement de la direction du champ. Par exemple, si après une première traversée d'un échantillon, le faisceau est réfléchi par un miroir et traverse à nouveau l'échantillon mais dans le sens inverse, la rotation Faraday totale acquise va doubler, tandis que dans la même géométrie, en cas d'activité naturelle, l'effet total sera nul. Si l'observateur regarde en direction du champ magnétique, la rotation droite est considérée comme positive, la rotation gauche est négative. Donc, selon la définition de l'angle de rotation  $\varphi_{rot}$  dans Fig. 1 la direction de champ magnétique vers droite est positive et celle vers la gauche est négative.

Pour des valeurs de champ magnétique assez basses, la rotation de Faraday est proportionnelle à B :

$$\varphi_{rot} = \nu \cdot B \cdot d \quad (12)$$

Le coefficient  $\nu$  est appelé la constante de Verdet du matériau (mesurée en  $[\text{rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$  ou en  $[\text{min} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}]$ ).

Au niveau de la mécanique classique, la différence entre les rotations gauche et droite, qui se manifeste dans l'effet Faraday, provient de la force de Lorentz agissant sur un électron tournant sur une orbite circulaire (Fig.3). La direction de cette force est vers le centre pour le mouvement droite et vers l'extérieur pour le mouvement gauche. Dans les deux cas, l'énergie de l'électron n'est pas la même. Vu que la vitesse de la lumière dans le milieu est déterminée par son interaction avec les électrons constituant le milieu, cette différence se traduit par la différence de vitesse de lumière pour les polarisations circulaire gauche et droite. L'explication rigoureuse de l'effet Faraday ne peut être donnée que dans la mécanique quantique.



**Fig.3** La direction de la force de Lorentz agissant sur un électron qui tourne dans orbite circulaire.

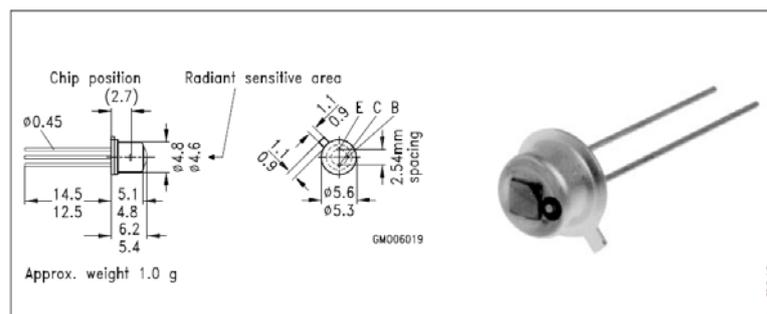
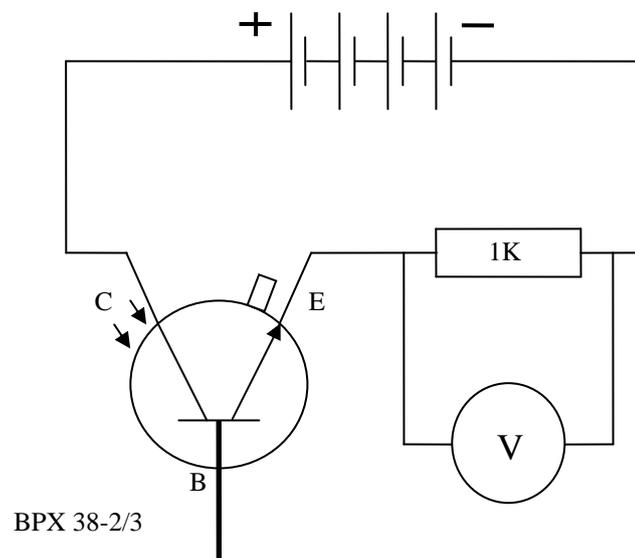
Dans cette expérience on va observer l'effet Faraday dans des barreaux de verre dopés avec entre

autre du Terbium. Les électrons de ce dernier sont à l'origine de la plupart de la rotation optique.

#### 4. Manipulations

##### A. L'activité optique naturelle

1. Mettez les lunettes de protection adaptées au type de laser.
2. Placez le laser et le support du détecteur avec la rondelle de centrage sans détecteur sur le rail optique. Alignez-les afin que le faisceau soit horizontal et que le signal soit optimum, centré en sortant du support détecteur. Pour simplifier l'alignement, rapprochez le support détecteur contre le faisceau laser afin qu'ils soient au même niveau. Eloignez-le détecteur et affinez le réglage du laser avec les vis de réglage du laser.
3. Focalisez le laser pour obtenir un faisceau correspondant à la taille du détecteur. Un filtre brun transparent ou un bout de papier vous permet de voir le faisceau pour bien le centrer. Ajoutez le polariseur et l'analyseur. Laissez au moins 300mm entre eux.
4. A l'aide de la fonction sonnette du multimètre, insérez deux fils dans la plaque d'expérimentation afin de définir les liaisons linéaires, faites un croquis de la connectique de la plaque d'expérimentation, puis, faites le montage du circuit électronique sur la plaque d'expérimentation selon le schéma ci-dessous. Différents détecteurs et résistances sont disponibles, choisissez la bonne valeur de résistance. Plus d'informations se trouvent dans le classeur de l'expérience.
5. Insérez délicatement le détecteur dans le support, faire en sorte que le signal soit maximum, env. 4.6V, mesuré avec le multimètre puis, réduisez à l'aide d'un polariseur complémentaire placé juste après la source pour éviter la saturation du détecteur (à vous de déterminer la valeur idéale)



6. Pour obtenir les valeurs du détecteur sur le module E/S National Instrument relié à l'ordinateur, branchez en parallèle au voltmètre les fils sur l'entrée GND et +AI0, seul ces deux entrées sont configurées par le programme « Faraday ».
7. Il est possible de remplacer les 4 accumulateurs de 1.2V (peuvent fournir plus de 1.3V bien chargés) par la sortie du module E/S GND et +5V (Attention à la saturation du détecteur !!!) Avant utilisation, vérifiez que chaque accumulateur fournisse environ 1.2V.
8. Avec le polariseur fixe (celui placé à côté du laser, appliquez une certaine valeur d'angle de polarisation  $\varphi_p$ , au choix), tourner l'analyseur de 0 à 360 degrés, chaque 10 degrés. Enregistrez le signal (la tension  $V$  sur le détecteur) par rapport à l'angle de l'analyseur  $\varphi_A$ . Attention: la valeur de saturation du signal est d'environ 4.6 Volts. Déterminez la précision de validité de la loi de Malus en faisant le fit  $V(\varphi_A) = V_0 \sin^2(\varphi_A - \varphi_{A,\min}) + V_{\min}$ , déterminez l'angle d'extinction  $\varphi_{A,\min}$ . Pourquoi  $V_{\min} > 0$ , i.e. l'extinction n'est pas complète ?
9. Tournez le polariseur de quelques dizaines de degrés et répétez les mesures de  $V(\varphi_A)$ . Pourquoi l'amplitude de la variation du signal s'est modifiée ( $V_0$ ) ?
10. Mettez le réservoir pour liquides entre les polariseurs parallèlement au rail. Mesurez à nouveau l'angle d'extinction (qui peut être modifié par la cuvette).
11. En utilisant le matériel à disposition (des bécards, la balance, etc.) préparez **dans le bac noir**, une solution de sucre de  $0.3 \text{ g/cm}^3$ . Avec la seringue, remplissez le réservoir en verre avec le sirop, sans modifier sa position. Mesurez la rotation optique.
12. De la même manière, mesurez la rotation pour des concentrations de 0.2, 0.1 et  $0 \text{ g/cm}^3$ . En utilisant les résultats pour les trois concentrations, déterminez la rotation spécifique du sucre.
13. Déterminez la rotation spécifique du fructose.
14. Déterminez le rapport de sucre et de fructose dans la poudre mélangée par le préparateur.  
2 bidons de 10l d'eau distillée se trouvent dans la salle 107. Toujours placer tous les accessoires pour le mélange de sucre dans le bac. Avec l'éponge, nettoyez le bac et les accessoires à la fin de l'expérience.

## B. Effet Faraday

1. Mesurez la dépendance du champ magnétique  $B$  dans la bobine (en mT) en fonction du courant  $J$  (en A) pour les deux sens du courant. Attention : le courant ne peut dépasser 5A que pendant de courtes périodes afin d'éviter de trop chauffer la bobine. Une minuterie est placée dans l'alimentation de la bobine, éteignant toutes les 30 secondes l'alimentation. Pour éviter une coupure de courant, pressez sur le bouton vert avant les 30 secondes. Vérifiez le courant appliqué. Utilisez un tesla-mètre (à demander au préparateur, attention à la sonde, son embout souple est très fragile). Repérez la direction du champ en fonction du sens du courant. Faites le graphique et déterminez la pente. Déterminez l'inhomogénéité du champ (mesurer la valeur du  $B$  par rapport à la distance du centre de la bobine).
2. Installez la bobine entre les polariseurs avec au minimum 170mm d'espace avec le polariseur pour pouvoir insérer le Tesla-mètre sans le tordre (très fragile !!!); laissez le faisceau passer en son milieu sans interruption.
3. En l'absence de l'échantillon, mesurez la courbe  $V(\varphi_A)$  (pour les valeurs 0, 10, ... 180°). Avec le fit sinusoidal  $V(\varphi_A) = V_0 \sin^2(\varphi_A - \varphi_{A,\min}) + V_{\min}$ , déterminez l'angle d'extinction  $\varphi_{A,\min}$ .
4. Mettez l'échantillon de verre MR1 dans le centre de la bobine (placé au centre à l'aide du fil vert-jaune protégé à son extrémité pour ne pas rayer le verre, idem pour le sortir) Déterminez l'angle d'extinction pour  $B = \pm 20 \text{ mT}$  et  $\pm 40 \text{ mT}$ . Puis faites le graphique de l'angle de Faraday

$\varphi_F(B) = \varphi_{A,\min}(B) - \varphi_{A,\min}(0)$  en fonction du champ. Dérivez la constante de Verdet  $\nu$  pour ce matériau, discutez l'origine et calculez l'incertitude.

5. Déterminez la constante de Verdet avec une méthode « rapide » : tracez  $V(\varphi_{A,1/2})$  en fonction de champ magnétique, où  $\varphi_{A,1/2}$  est l'angle de l'analyseur qui correspond à la moitié de la valeur de signal au maximum (pour  $B = 0$ ). Utilisez les valeurs du courant dans les bobines : -2.0, -1.5, -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 et 2.0 A. Déterminez la pente de la courbe  $V(\varphi_{A,1/2}) = f(B)$  et dérivez la constante de Verdet  $\nu$ . Analysez l'incertitude.
6. Comparez les deux valeurs obtenues de  $\nu$ . Discutez la différence, les avantages et désavantages de ces deux méthodes.
7. Déterminez la constante de Verdet pour l'échantillon MR3-2 (50 mm) avec les deux méthodes. Comparez avec l'échantillon MR1.
8. Prenez l'échantillon MR3-2 (25 mm). Avec la méthode « rapide » vérifiez si la rotation de Faraday est proportionnelle à la longueur de l'échantillon.
9. Faites des conclusions

5. Questions sur l'expérience :

1. Dérivez la loi de Malus.
2. Quelle est la différence entre l'effet Faraday et la rotation optique naturelle ?
3. Démontrez la relation (5)
4. Quelles sont les sources d'erreurs les plus importantes pendant la mesure de la rotation optique ?
5. Comment fonctionne le Tesla-mètre ?
6. Expliquez le principe physique et les caractéristiques du laser à diode, du filtre polarisant et du détecteur utilisé ?
7. Comment distinguer l'effet Faraday et l'activité optique naturelle dans un milieu où les deux effets sont présents ?

## 6. Matériel à disposition

Toujours ranger les barreaux de verre à leur emplacement prévu dans le tiroir, ne jamais les laisser traîner sur la place de travail, ils sont fragiles et très cher !

Nettoyer toutes traces de sucre sur l'expérience, bien rincer les différents objets en verre.

Rail optique, supports optiques

Laser 650nm elliptique 3mW

Laser 532nm elliptique 4mW

Laser 400nm elliptique 10mW

Détecteur (phototransistor, plusieurs modèles)

Polariseurs (Polaroids) tournants

Réservoirs en verre pour liquides

Solénoïde

Balance 0 - 200 g

Poudre de sucre

Poudre de fructose

Barreau de verre MR3-2 (fragile, ne pas toucher les extrémités, ranger immédiatement)

Barreau de verre MR1 (fragile, ne pas toucher les extrémités, ranger immédiatement)

Alimentation courant continu 12V, 10A (vérifiez la précision des appareils)

Câbles de branchements

Seringues et béchers par type de sucre

Plaque d'expérimentation électronique, piles, fils, résistances

Tesla-mètre (à demander au préparateur et lui rendre dès que terminé, car partagé avec d'autres expériences...)

## 7. Références

- 1) G. Bruhat, Cours de Physique Générale – Optique, 6-ème Ed. par A. Kastler ; Masson & Cie (1965)
- 2) Eu. Hecht, Optics, 4th Edition, Addison Wesley (2002).

Version 15.02.10 / ak  
Mise à jour 02.11.10/lw  
Mise à jour 04.03.13/lw