

# TP3- MESURE D'INDICE DE REFRACTION PAR GONIOMETRIE

## Dispersion chromatique d'un prisme de verre

### PRESENTATION

#### Sujet

Etudier l'indice de réfraction  $n(\lambda)$  d'un verre selon la couleur de la lumière en mesurant par goniométrie la déviation d'un faisceau lumineux due à un prisme de ce verre.

#### Objectifs

- Savoir utiliser un prisme et gérer l'angle d'incidence ainsi que la déviation
- Savoir régler un goniomètre en plusieurs étapes (lunette, collimateur, horizontalité du plateau)
- Savoir régler une déviation minimale et en déduire la valeur de l'indice.
- Déterminer le modèle numérique d'un verre sous la forme  $n(\lambda) = A + B / \lambda^2$
- Comprendre le caractère dispersif d'un prisme

#### Consignes et sécurité

- **Au démarrage du PC** : un utilitaire rafraîchit et ouvre le répertoire de travail « E:\MesDocs ». Ce dossier contient le texte complet du TP en couleur avec ses annexes.
- **Le prisme ne DOIT jamais tomber !**
- **La lampe spectrale reste allumée pendant toute la durée des phases de réglages et de mesures**

#### Plan du TP

- 1- Principe de l'expérience p 2
- 2- Principe, description et réglages du goniomètre p 3
- 3- Mesures d'indice pour un prisme de verre p 4
- 4- Etude d'un modèle numérique de la dispersion de ce verre p 6

#### Annexes :

##### Version en couleur dans E:\MesDocs

A1- Liste du matériel utilisé p 7

A2- Procédures de réglage du goniomètre p 8

### 0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

Le texte du TP en couleur, ses annexes complètes et les logiciels de simulation sont accessibles sur Internet par <http://mpsn.free.fr>

- Lire attentivement le texte de TP, en particulier les §1- et §2- .
- Réaliser **avant le TP** l'expérience virtuelle du TP décrite au §1.2-

# 1- PRINCIPE DE L'EXPERIENCE ET DE LA MESURE

## 1.1- Indice de réfraction et dispersion de la lumière

Un matériau transparent laisse passer la lumière mais en la « freinant » : c'est le phénomène de **réfraction**. La vitesse de la lumière est  $c = 299\,792\,458\text{ m.s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8\text{ m.s}^{-1}$  dans le vide mais elle n'est plus que de  $v = 2.25 \cdot 10^8\text{ m.s}^{-1}$  dans l'eau ou encore  $\approx 2 \cdot 10^8\text{ m.s}^{-1}$  dans un verre usuel.

L'**indice de réfraction n** d'un matériau quantifie l'importance de sa réfraction.

On a toujours  $n > 1$  car  $n = c / v$  et  $c > v$

Exemples :  $n \approx 1$  dans l'air, 1.33 dans l'eau, 1.4 à 1.8 dans des verres courants etc.


Pour des raisons liées à la structure des matériaux, on constate que généralement l'indice varie un peu avec la longueur d'onde :  $n(\lambda)$ . C'est le phénomène de **dispersion chromatique**.

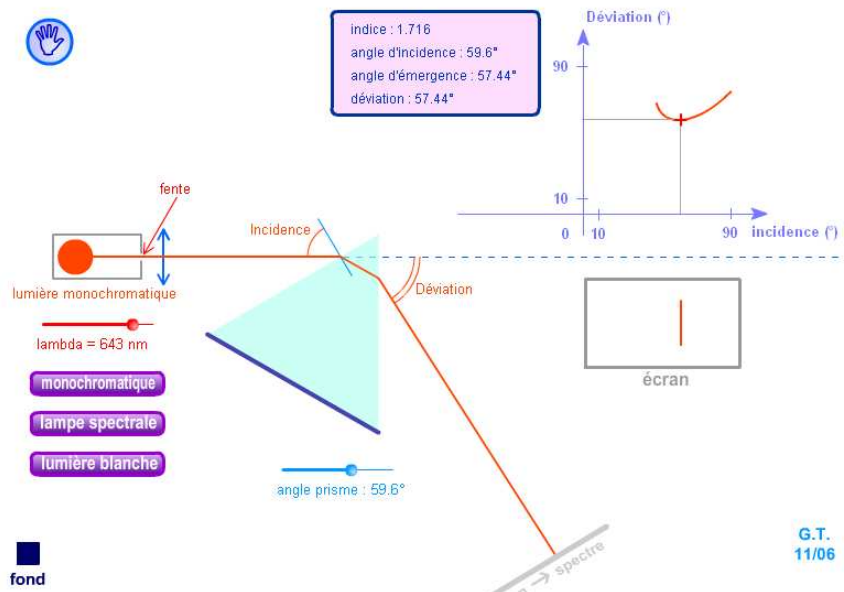
La **loi des sinus** de Snell-Descartes décrivant la réfraction  $n_i \sin i = n_r \sin r$  montre que la direction des rayons dépend donc de la couleur des lumières réfractées sur les dioptres.

Le caractère dispersif de la réfraction est incontournable. Il explique l'arc-en-ciel (voir l'applet §5), a été exploité utilement dans les premiers spectroscopes à prisme (d'usage peu pratique) mais est le plus souvent une source de difficultés, nécessitant des corrections, lors de la conception des systèmes optiques à lentilles ou à fibres optiques.

## 1.2- Expérience virtuelle par simulation (à faire avant le TP)

L'applet due à G. Tulloue (Université de Nantes) a été choisie pour la simplicité de son usage.

 fournit le mode d'emploi simplifié. Elle est disponible en ligne (cf. §0) et sur le bureau du PC.



### Simulations demandées

- Repérer l'angle du prisme responsable de la déviation et le régler à environ 60°.
- Voir en monochromatique l'effet de l'angle d'incidence sur la déviation. Repérer la situation de réflexion totale, celle de déviation minimale.
- Réglé en déviation minimale, voir les effets du changement de couleur en changeant la valeur de  $\lambda$ .
- Faire enfin un essai en lampe spectrale puis en lumière blanche

## 1.3- Principe de la mesure de $n(\lambda)$

Si  $S$  est l'angle du prisme et  $D_m(\lambda)$  la déviation minimale pour la radiation  $\lambda$ , l'indice de réfraction  $n(\lambda)$  du verre constituant le prisme est donné par la formule ci-contre :

$$n(\lambda) = \frac{\sin\left(\frac{S + D_m(\lambda)}{2}\right)}{\sin\left(\frac{S}{2}\right)}$$

Il suffit de mesurer l'angle  $S$  du prisme et les angles  $D_m(\lambda)$  pour les différentes longueurs d'onde afin de pouvoir calculer  $n(\lambda)$ .

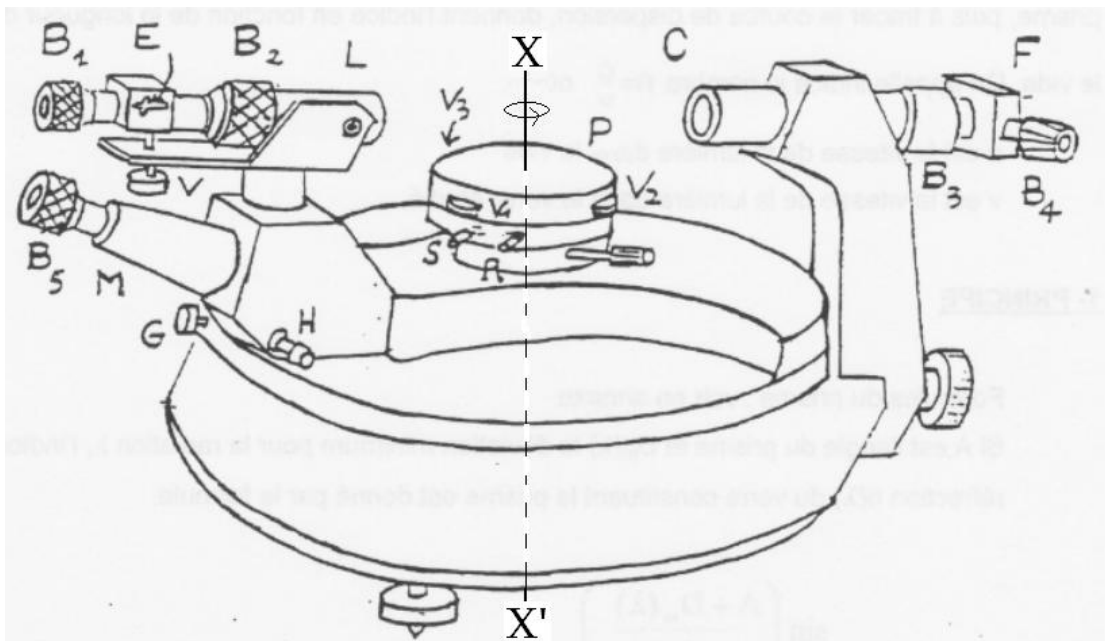
## 2- PRINCIPE, DESCRIPTION ET REGLAGE DU GONIOMETRE

### 2.1- Principe du goniomètre

Comme le montre l'expérience virtuelle précédente, le goniomètre doit permettre de réaliser :

- le **réglage de l'angle d'incidence  $i$** . Le prisme sera posé sur une plate-forme P capable de tourner autour de son axe vertical  $XX'$ .
- un faisceau de lumière incidente, composé de **rayons parallèles** pour qu'il n'y ait pas de biais de mesure sur l'angle de déviation. C'est la fonction du **collimateur C** que de fournir ce faisceau issu d'un objet constitué d'une fente éclairée par la source de lumière à analyser, au foyer de sa lentille.
- une observation nette de la lumière déviée issue du prisme qui est donc, **pour une couleur donnée**, composée de lumière parallèle. C'est la fonction d'une **lunette L, réglée sur l'infini optique**, que de donner dans son plan focal une image nette de la fente initiale. La lunette tourne autour du même axe  $XX'$ . Cette lunette servira aussi à régler le collimateur.
- l'autoréglage de cette lunette au préalable. Il faut donc disposer d'une **lunette autocollimatrice** dont la ligne de visée est alignée sur l'axe  $XX'$  et celui du collimateur.
- la mesure de **l'angle de positionnement de la lunette** : c'est le rôle des graduations d'un cercle de verre, enfermé dans un carter situé à la base de l'appareil et observable au moyen d'un viseur M monté sur le même support que la lunette (mesure des angles à 30 "près).

### 2.2- Description du goniomètre



<b>B<sub>1</sub></b>	Mise au point de l'oculaire de la lunette sur le réticule	<b>H</b>	Mouvement lent de l'ensemble lunette-viseur M
<b>B<sub>2</sub></b>	Déplacement de l'ensemble oculaire-réticule	<b>L</b>	Lunette autocollimatrice
<b>B<sub>3</sub></b>	Mise au point du collimateur	<b>M</b>	Viseur pour les mesures d'angle de positionnement
<b>B<sub>4</sub></b>	Ouverture de la fente (visser $B_4$ pour ouvrir F)	<b>P</b>	Plate-forme réglable horizontalement et tournante
<b>B<sub>5</sub></b>	Mise au point du viseur	<b>R</b>	Blocage de la plate-forme
<b>C</b>	Collimateur réglable par $B_3$	<b>S</b>	Mouvement lent de la plate-forme
<b>E</b>	Commande du miroir d'éclairage du réticule	<b>V</b>	Mouvement de la lunette autour de son axe horizontal
<b>F</b>	Fente réglable par $B_4$	<b>V<sub>1</sub></b>	
<b>G</b>	Blocage de l'ensemble lunette-viseur M	<b>V<sub>2</sub></b>	Vis de calage de la plate-forme
		<b>V<sub>3</sub></b>	

## 2.3- Réglages du goniomètre

Les **procédures de réglage** détaillées et illustrées sont regroupées dans **l'annexe A2-**

La justification détaillée de ces réglages optiques est développée dans le texte du TP2 qu'il peut être instructif de lire en préparation.

### Réglages demandés :

*Il faudra donc, avec l'annexe A2-, régler successivement :*

- les deux oculaires  $B_1$  et  $B_5$
- la lunette  $L$  sur l'infini par autocollimation (utiliser une face du prisme comme miroir)
- la largeur de fente
- le collimateur
- l'horizontalité de la plate-forme qui devrait être ainsi parallèle à la ligne de visée et de collimation (et donc perpendiculaire à son axe de rotation vertical  $XX'$ ).

**Ne plus déplacer le prisme à la main, une fois ces réglages faits.**

## 3- MESURES D'INDICE POUR UN PRISME DE VERRE

### 3.1- Angle au sommet $S$ du prisme

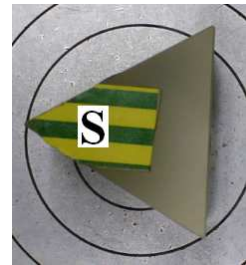
L'angle au sommet  $S$  du prisme est celui des trois angles qui est repéré par un scotch de couleur. Le côté opposé est la « base » du prisme.

→ Faire bien attention par la suite d'utiliser ce sommet -là !

On considère  $S = 60^\circ$

La mesure fine de  $S$  est possible directement avec le goniomètre.

Le faible écart observé de quelques centièmes de degré peut-être considéré comme une source supplémentaire d'incertitude.



### 3.2- Mesure du minimum de déviation

#### Observation du spectre issu du prisme :

- Eteindre la lampe d'autocollimation.
- Tourner la plate-forme pour éclairer le prisme près de son arête repérée. Régler l'angle d'incidence vers  $60^\circ$ . Comparer à l'écran de l'applet de simulation réglée de façon comparable (cf. §1.2- ).
- Déplacer la lunette hors du secteur angulaire d'observation afin de rechercher le spectre à l'œil nu.
- Se positionner à 1 m environ du goniomètre et regarder « dans la bonne direction » (!) en se rappelant que **le prisme dévie la lumière vers sa base**. Observer un spectre coloré dont les raies sont floues (l'observateur est sensé « être à l'infini » !).
- Positionner la lunette dans la direction repérée et observer un spectre dont les raies doivent être fines mais suffisamment lumineuses. En cas de difficulté, expérimenter à nouveau avec l'applet de simulation.

#### Recherche du minimum de déviation :

- Travailler avec la raie verte qui est la plus lumineuse.
- En faisant tourner à la main la plate-forme **toujours dans le même sens**, observer le déplacement du spectre d'abord dans le même sens puis à partir d'une position donnée dans le sens inverse. La position pour laquelle on voit le spectre s'immobiliser avant de rebrousser chemin est le minimum de déviation. En cas de difficulté, expérimenter à nouveau avec l'applet de simulation.

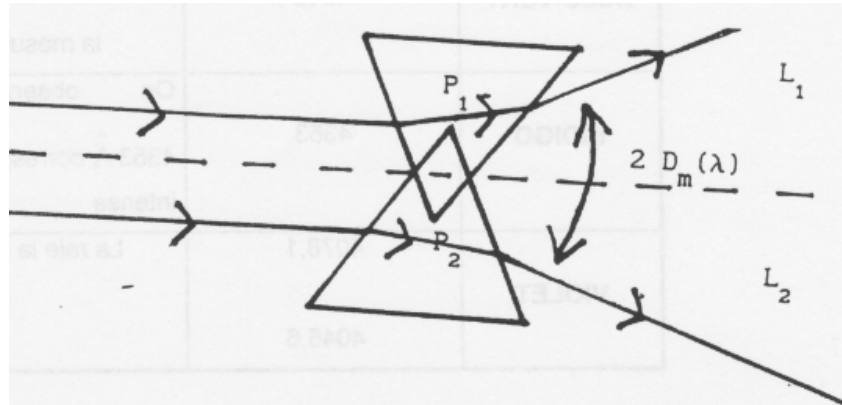
**Mesure du minimum de déviation :**

- En observant le spectre à la lunette, régler le prisme au minimum de déviation ( $P_1$ ) pour la raie verte **de façon précise** ; noter alors la position  $L_1$  de la lunette ; le faire ensuite pour toutes les autres raies.

- La première mesure a, par exemple, été faite avec l'arête de l'angle  $S$  vers la gauche. Faire tourner le plateau d'un demi-tour (le prisme aura alors son angle  $S$  vers la droite) pour pouvoir éclairer l'autre face du dièdre d'angle  $S$ . Cette méthode symétrise la mesure et élimine l'erreur de zéro d'échelle.

- Chercher la position du prisme ( $P_2$ ), symétrique de  $P_1$  par rapport à l'axe du collimateur pour laquelle on obtient un nouveau minimum de déviation ; on note la position  $L_2$  de la lunette.

- L'angle entre les deux positions  $L_1$  et  $L_2$  repéré sur le cercle gradué vaut  $2 D_m(\lambda)$ .



- En principe, il faudrait régler le prisme au minimum de déviation pour chaque radiation. Mais, étant donnée la précision des mesures, il suffira de régler le prisme au minimum de déviation pour la raie verte (en milieu de plage « visible »). On pourra alors considérer que le prisme est réglé au minimum de déviation pour toutes les radiations (on pourra vérifier expérimentalement la validité de cette approximation).

**Mesures demandées :**

- Pour une orientation du prisme, puis ensuite pour l'autre, régler le minimum de déviation pour le vert. Dans chacun des deux cas, faire les mesures d'angle nécessaires au calcul de  $D_m$  pour la raie verte et les 5 autres raies les plus lumineuses du spectre de la lampe à vapeur de mercure.

- Regrouper toutes les données utiles à ces calculs dans un tableau qui sera à compléter au §4.1- (donc relire aussi §4.1- pour prévoir !)

Le **pointé** précis de la position de la raie est réalisé lorsque le **trait vertical du réticule** objet est bien **superposé au centre de la raie étudiée**.

A cause d'un défaut d'achromatisme de la lunette et du collimateur, il faut chercher le maximum de netteté pour les différentes images monochromatiques en réglant pour chaque cas la lunette ( $B_2$ ).

Couleurs et spectre du mercure, dans le vide		
Couleur	Longueur d'onde dans le vide, en nm	Remarques
Jaune	579.07 576.96	Un « doublet » de raies très voisines séparées de 2.1 nm.
Vert	546.1	Raie particulièrement lumineuse.
Bleu - Vert	491.6	On peut observer deux raies vers cette valeur : effectuer la mesure sur la plus lumineuse.
Indigo	435.3	On observe plusieurs raies : 435.3 nm correspond à la raie la plus lumineuse.
Violet	407.81 404.66	On observe plusieurs raies : 404.6 nm correspond à la raie la plus lumineuse.

## 4- MODELE NUMERIQUE DE LA DISPERSION DE CE VERRE

### 4.1- Calcul des indices de réfraction mesurés

#### Travail demandé :

- Calculer pour chaque cas la valeur de l'indice (cf. formule §1.3-)
- Regrouper les données suivantes dans un tableau :  $\lambda$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $D_m$ ,  $n$ ,  $1/\lambda^2$

### 4.2- Modèle numérique de dispersion chromatique

#### Modèle numérique de Cauchy (1789-1857) :

En première approximation, on peut décrire la variation de l'indice de réfraction d'un verre en fonction de la longueur d'onde dans le vide à l'aide de la formule de CAUCHY :  $n = A + B / \lambda^2$

Ce modèle est qualifié de « phénoménologique », ce qui veut simplement dire qu'il ne résulte en rien d'une analyse théorique mais qu'il s'ajuste bien aux données numériques disponibles. Un tel modèle ne contient donc pas d'éléments d'explication physique mais a cependant un caractère prédictif.

#### Graphes demandés :

- Tracer sur papier millimétré la courbe de dispersion du verre du prisme  $n = f(\lambda)$  Choisir l'échelle de  $n$  de façon pertinente (selon les indices mesurés du prisme étudié).
- Tracer ensuite celle correspondant au modèle de Cauchy, soit la courbe  $n = f(1/\lambda^2)$ .

#### Calculs demandés :

- Déterminer à partir de ce graphe, ainsi que par régression à la calculatrice, les coefficients  $A$  et  $B$  du modèle de Cauchy.

Depuis le XVIII<sup>ème</sup> siècle, les verriers ont pris l'habitude de caractériser globalement un verre à partir des valeurs de son indice pour certaines des radiations visibles de référence les plus lumineuses disponibles au laboratoire à leur époque. Il s'agit des raies suivantes :

- raie D du sodium  $\lambda = 589,3$  nm (moyenne du doublet jaune)
- raie C de l'hydrogène  $\lambda = 656,3$  nm (rouge)
- raie F de l'hydrogène  $\lambda = 486,1$  nm (bleu)

Les quantités habituellement utilisées pour cette caractérisation élémentaire du verre sont :

- l'indice  $n_D$  pour la raie D (jaune : vers le milieu de la bande visible)
- l'écart entre les raies C et F  $\Delta n = n_F - n_C$  (rouge /bleu : variation sur environ toute la bande visible)
- la **constringence** définie par le rapport  $\nu = \frac{n_D - 1}{\Delta n}$

- Déterminer ces différentes grandeurs en exploitant le modèle  $n = f(1/\lambda^2)$

## 5- POUR ALLER PLUS LOIN APRES LE TP

- Identifier les sources d'incertitudes dans la mesure de  $n$ .
- Vérifier si les objectifs initiaux ont été atteints : reprendre a posteriori avec le Cours et les TD.
- Vérifier votre compréhension des phénomènes et analyser vos résultats avec cette autre applet un peu plus sophistiquée, proposée par « JavaOptics. Grup d'Innovació Docent en Òptica Física i Fotònica. Universitat de Barcelona » :  
<http://www.ub.es/javaoptics/applets/DisperEn.html>

Cette seconde applet étudie aussi le phénomène de **réfraction dans un arc-en-ciel**.

# ANNEXES

## Annexe A1- LISTE DU MATERIEL UTILISE

### Matériel utilisé

- un goniomètre (au 30°)
- un prisme de la collection
- une lampe spectrale « mercure »
- un support réglable « Boy » pour cette lampe
- deux textes de TP avec Annexes et fiches techniques

### Matériel informatique et logiciels utilisés

- un ordinateur PC (a priori « MP-Optique4 »)
- navigateur avec plugin java à jour.

#### Applets de simulation d'un prisme

Les logiciels de simulation sont accessibles sur Internet par <http://mpsn.free.fr>

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/prisme/prisme.html>  
G. Tulloue (Université de Nantes)

<http://www.ub.es/javaoptics/applets/DisperEn.html>  
JavaOptics. Grup d'Innovació Docent en Òptica Física i Fotònica. Universitat de Barcelona.

## Annexe A2- PROCEDURES DE REGLAGE DU GONIOMETRE

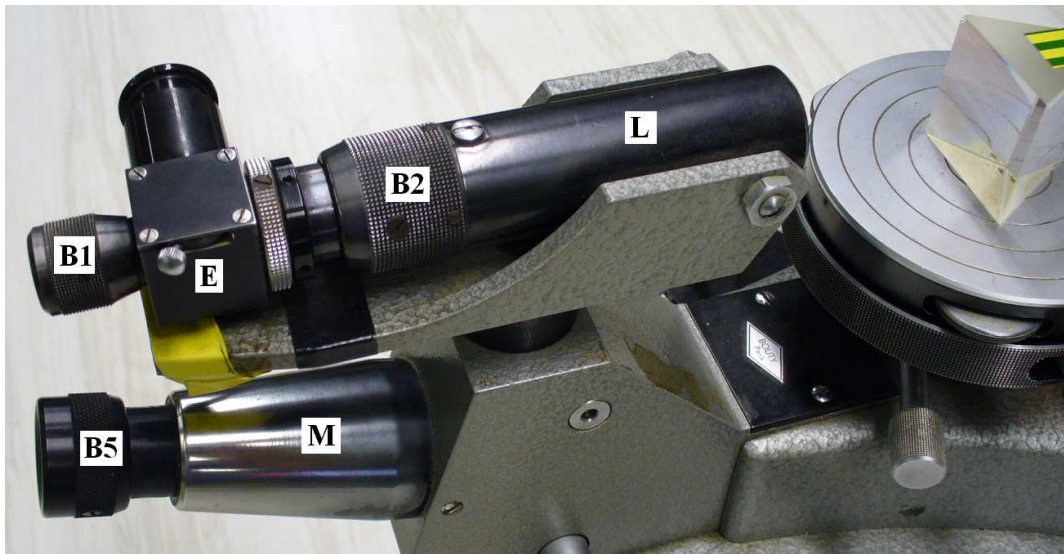
### Mise à la vue des oculaires

#### Oculaire B1 de la lunette L

- Allumer l'éclairage de la lunette autocollimatrice.
- Mettre au point l'oculaire B1 (en le faisant tourner sur lui-même) afin de voir très net le réticule en forme de croix. Chaque opérateur devra reprendre ce réglage qui lui est personnel.

#### Oculaire de lecture M

- Mettre aussi au point l'oculaire B5 de la lunette de lecture des graduations.

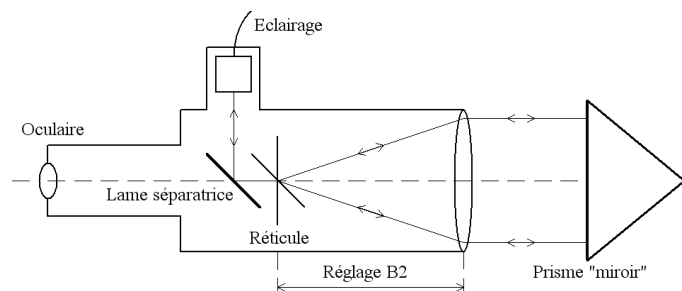


### Mise au point à l'infini de la lunette L par autocollimation

#### Principe :

Le réglage de **mise au point sur l'infini par autocollimation** consiste à placer le réticule objet au foyer objet de la lentille de la lunette afin que son image soit formée a priori à l'infini. Les rayons sortants sont alors réfléchis par un miroir plan et retournent vers la lentille. **La lumière semblant venir de l'infini, l'image se formera alors au foyer image de la lentille** : il y aura superposition de l'image dans le plan objet.

Le curseur de réglage E consiste à déplacer une **lame séparatrice**. La lame est mise à  $45^\circ$  dans la direction de visée lorsqu'on veut utiliser l'éclairage de la lunette pour éclairer le réticule par l'arrière. La lame peut s'écarter lorsqu'on utilise le goniomètre comme spectromètre.



#### Réglages :

- Pousser le bouton chromé E **du côté de la plate-forme** : de la lumière sort alors de la lunette.
- Positionner le prisme sur la plate forme de sorte qu'une de ses faces soit bien perpendiculaire à la lunette. Cette face servira de miroir d'autocollimation.
- Tourner la molette B2 jusqu'à voir bien nette l'image du réticule qui vient alors se superposer.

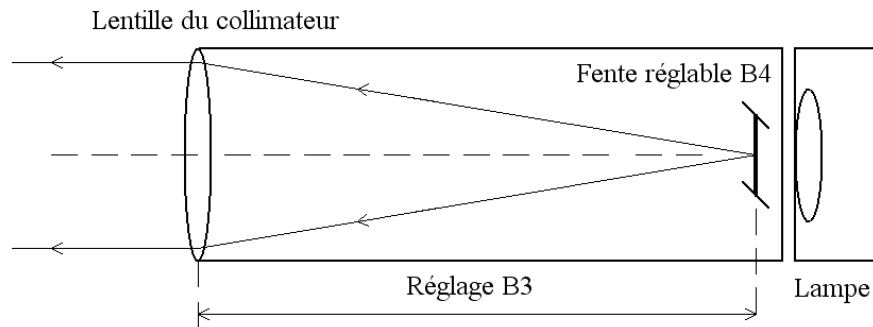
**Attention** : bien identifier l'image principale car on observe parfois une seconde image du réticule qui est moins lumineuse et qu'il faut ignorer.



## Réglages du collimateur

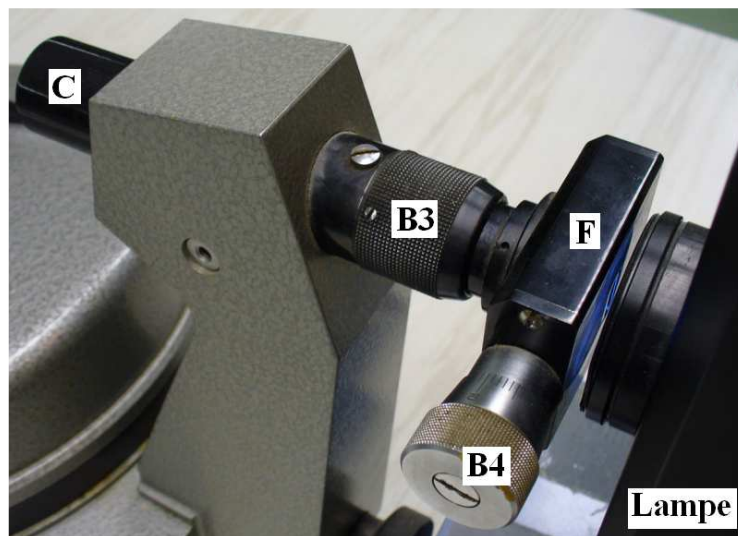
### Principe :

La fonction du collimateur est de générer un faisceau de **lumières parallèles** en formant à l'infini l'image d'une fente objet. Cette fente doit donc être placée au foyer objet de la lentille du collimateur.



### Réglages :

- Enlever le prisme de la plate-forme et le **ranger en sécurité**.
- Mettre en marche la lampe spectrale ; la positionner devant la fente F, en entrée du collimateur.
- Mettre la lunette L en ligne avec l'axe du collimateur et la bloquer avec la vis G.
- Pousser le bouton chromé E **du côté de l'oculaire** : il n'y a plus de lumière sortant de la lunette.



- Observer la fente en regardant dans la lunette. Régler la largeur de la fente F avec le bouton B4. On cherche à voir un « rectangle » lumineux dont la largeur est en apparence environ 10 fois celle du réticule de la lunette.
- Mettre bien au point le collimateur C en tournant la molette B3 jusqu'à voir une **image bien nette et bien rectangulaire** de la fente.
- Affiner enfin le réglage de fente.

**Critère** : obtenir une image de la fente bien nette et rectangulaire dont la largeur est en apparence environ 5 fois celle du réticule.

## Réglage de la plate-forme

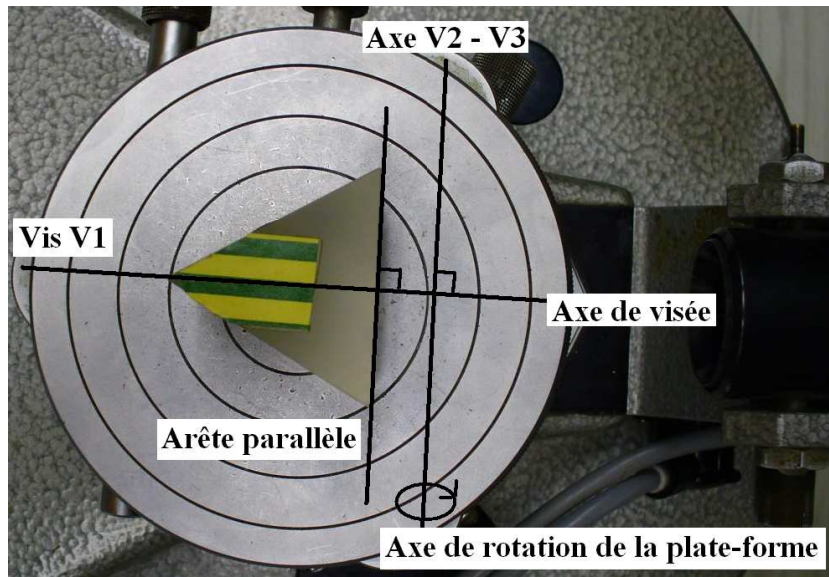
### Principe :

L'horizontalité de la plate-forme est réglable à l'aide des trois vis V1, V2 et V3.

Lorsque l'on place le prisme avec **ses trois arêtes bien en direction des trois vis**, l'action sur une vis fait pivoter un peu la face opposée du prisme : cela permet d'en régler la verticalité car il y a rotation autour de l'axe passant par les deux autres vis.

La verticalité est réglable finement en utilisant une visée à la lunette.

Si les faces du prisme sont bien verticales, la plate-forme est évidemment horizontale : on pourra donc positionner le prisme à volonté sur le plateau dans la suite de l'expérience.



### Réglages :

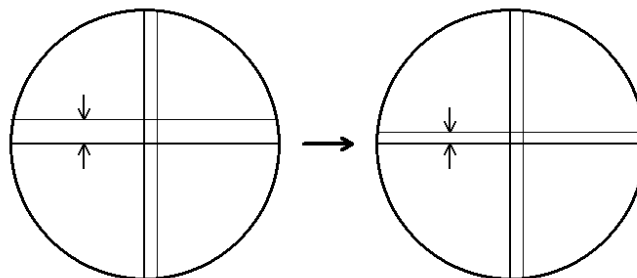
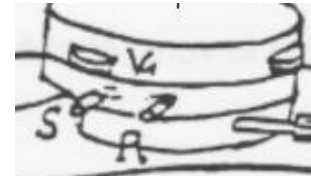
- Positionner le prisme est bien au centre de la plate-forme avec ses trois arêtes bien en direction des trois vis  $V_i$ .

A partir de ce moment, on ne touche plus le prisme à la main.

- Débloquer la plate-forme (réglages R et/ou S)

- Mettre une face en direction de la lunette. Agir sur la vis calante opposée afin de diminuer par 2 l'écart entre les traits horizontaux des réticules objet et image.

- Faire tourner la plate-forme d'un tiers de tour et recommencer l'action pour le couple face/vis calante suivant.



- Recommencer pour la face suivante etc. Usuellement après deux tours complets (soit 6 réglages successifs), on obtient un réglage convenable. Faire constater par l'enseignant.

**Critère** : soit on a pu correctement superposer **pour les trois faces** les deux réticules horizontaux (situation idéale recherchée) soit il reste un **écart résiduel faible mais identique** sur les trois faces (la lunette n'est plus parfaitement horizontale : il faudrait alors retoucher un peu le réglage V de la lunette (vis bloquée par un adhésif : **réglage réservé** à l'enseignant).

→ Le goniomètre est complètement préréglé ☺

# **TP3- MESURE D'INDICE DE REFRACTION PAR GONIOMETRIE**

## **Dispersion chromatique d'un prisme de verre**

<b>PRESENTATION .....</b>	<b>1</b>
<b>0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP .....</b>	<b>1</b>
<b>1- PRINCIPE DE L'EXPERIENCE ET DE LA MESURE .....</b>	<b>2</b>
<b>2- PRINCIPE, DESCRIPTION ET REGLAGE DU GONIOMETRE .....</b>	<b>3</b>
<b>3- MESURES D'INDICE POUR UN PRISME DE VERRE .....</b>	<b>4</b>
<b>4- MODELE NUMERIQUE DE LA DISPERSION DE CE VERRE .....</b>	<b>6</b>
<b>5- POUR ALLER PLUS LOIN APRES LE TP .....</b>	<b>6</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>7</b>
<b>Annexe A1- LISTE DU MATERIEL UTILISE.....</b>	<b>7</b>
<b>Annexe A2- PROCEDURES DE REGLAGE DU GONIOMETRE.....</b>	<b>8</b>

**Ouvrir une session sur l'ordinateur :**

Utilisateur : **etmp**

Mot de passe : **mesures**