

TP3- MESURE D'INDICE DE REFRACTION PAR GONIOMETRIE

Dispersion chromatique d'un prisme de verre

PRESENTATION	2
0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP	2
1- PRINCIPE DE L'EXPERIENCE ET DE LA MESURE	3
2- PRINCIPE, DESCRIPTION ET REGLAGE DU GONIOMETRE	4
3- MESURES D'INDICE POUR UN PRISME DE VERRE	5
4- MODELE NUMERIQUE DE LA DISPERSION DE CE VERRE	7
ANNEXES	8
Annexe A1- LISTE DU MATERIEL UTILISE.....	8
Annexe A2- PROCEDURES DE REGLAGE DU GONIOMETRE.....	9

Ouvrir une session sur l'ordinateur :

Utilisateur : **etmp**

Mot de passe : **mesures**

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 3
- 2- Principe, description et réglages du goniomètre p 4
- 3- Mesures d'indice pour un prisme de verre p 5
- 4- Etude d'un modèle numérique de la dispersion de ce verre p 7

Annexes :

Version en couleur dans E:\MesDocs

A1- Liste du matériel utilisé p 8

A2- Procédures de réglage du goniomètre p 9

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.

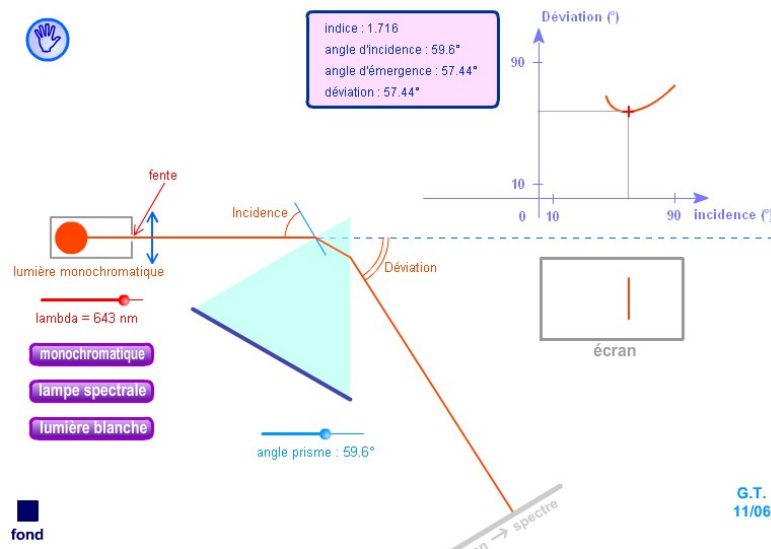
Le caractère dispersif de la réfraction est incontournable. Il explique l'arc-en-ciel (voir l'applet §5), a été exploité utilement dans les premiers spectroscopes à prisme (d'usage peu pratique) mais est le plus souvent une source de difficultés, nécessitant des corrections, lors de la conception des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

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

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

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

Attention : un plugin « Flash » à jour doit être installé dans votre navigateur et vous devez lui donner l'autorisation de s'exécuter. Cette démarche est possible dans Mozilla Firefox.



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 λ .
- 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 λ , 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 $n(\lambda)$.

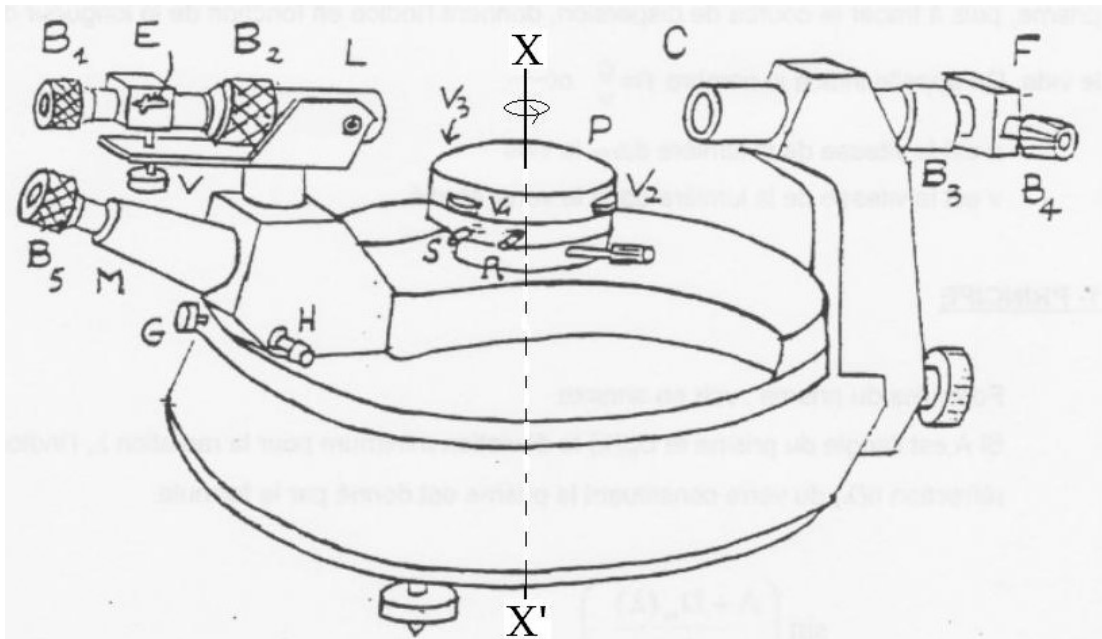
2- PRINCIPE, DESCRIPTION ET REGLAGE DU GONIOMETRE

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



B₁	Mise au point de l'oculaire de la lunette sur le réticule	H	Mouvement lent de l'ensemble lunette-visueur M
B₂	Déplacement de l'ensemble oculaire-réticule	L	Lunette autocollimatrice
B₃	Mise au point du collimateur	M	Visueur pour les mesures d'angle de positionnement
B₄	Ouverture de la fente (visser B ₄ pour ouvrir F)	P	Plate-forme réglable horizontalement et tournante
B₅	Mise au point du viseur	R	Blocage de la plate-forme
C	Collimateur réglable par B ₃	S	Mouvement lent de la plate-forme
E	Commande du miroir d'éclairage du réticule	V	Mouvement de la lunette autour de son axe horizontal
F	Fente réglable par B ₄	V₁	
G	Blocage de l'ensemble lunette-visueur M	V₂	Vis de calage de la plate-forme
		V₃	

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 sera instructif de lire en préparation.

Réglages demandés :

Il faudra donc, en respectant les consignes détaillées de l'annexe A2-, régler successivement :

Réglages pour un opérateur donné :

- les deux oculaires B_1 et B_5 (le seul réglage à refaire à chaque changement d'opérateur)

Réglages commun aux différents opérateurs :

- la lunette L sur l'infini par autocollimation (utiliser une face du prisme comme miroir)
- la largeur de fente
- le collimateur

Attention : une fois lunette et collimateur réglés mais avant de poser définitivement le prisme, pointer le centre de la fente fine et lire sur l'échelle de repérage angulaire la position centrale, soit la lecture L_0 .

Puis poser correctement le prisme et régler :

- 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

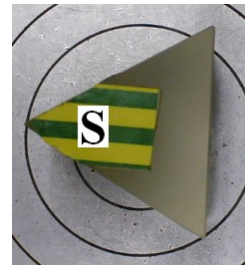
L'angle au sommet S du prisme est celui des trois angles qui est repéré par un scotch de couleur. Le coté opposé est la « base » du prisme.

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

On considère $S = 60.00^\circ$

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

On retiendra qu'un **goniomètre** n'est a priori destiné qu'à faire des **mesures précises de déviation angulaire** (soit en incidence normale, soit en déviation minimale).

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° . 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.

Procédure pour la mesure du minimum de déviation :

- En observant le spectre à la lunette, régler **de façon précise** le prisme au minimum de déviation (P_1) pour la raie verte;

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**.

Noter alors la position L_1 de la lunette pour la raie verte ; puis successivement « pointer » toutes les autres raies du spectre.

Réfléchir au lien entre la valeur de l'angle D_m et les positions de lectures L_1 et L_0 .

- 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.

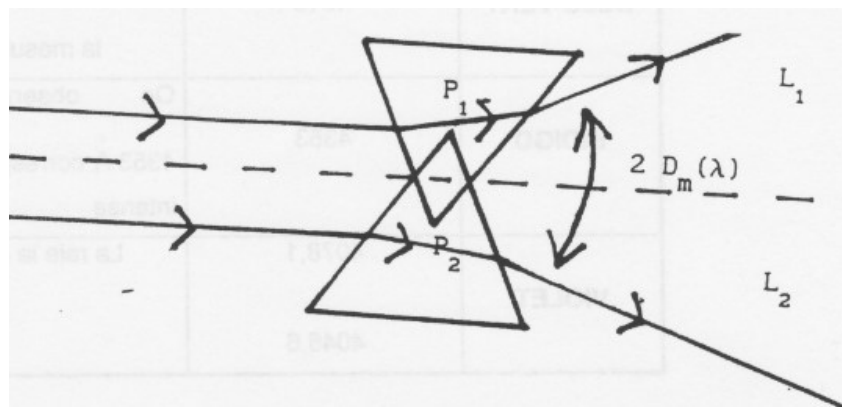
- Chercher la position du prisme (P_2), symétrique de P_1 par rapport à l'axe du collimateur pour laquelle on obtient un nouveau minimum de déviation ; on note la position L_2 de la lunette.

Réfléchir au lien entre la valeur de l'angle D_m et les positions de lectures L_2 et L_0 .

- Réfléchir au lien entre la valeur de l'angle $D_m(\lambda)$ et les positions de lectures L_1 et L_2 . Faire attention aux signes éventuels.

Cette méthode symétrise la mesure et élimine « l'erreur de zéro » d'échelle. D'ailleurs ici, devant l'inutilité d'essayer de régler le système de lecture à $L_0 = 0.00$ de façon définitive (du fait par exemple des dilatations etc.) on opte pour une valeur franchement quelconque.

La lecture L_1 n'est donc pas du tout la valeur de la déviation cherchée.



- En principe, il faudrait régler le prisme au minimum de déviation pour chaque radiation. Mais, étant donnée la précision des mesures, il suffit 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 visibles (on pourra vérifier expérimentalement la validité de cette approximation).

Conseil : après réflexion, vérifier auprès de l'enseignant votre formule de calcul de D_m .

Mesures demandées :

- Pour chacune des deux orientations du prisme, régler le minimum de déviation pour le vert puis faire les mesures de position L_1 (respectivement L_2) nécessaires au calcul des différentes déviations minimales 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 lire aussi §4.1- pour prévoir la construction du tableau !)

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	Un « doublet » de raies très voisines séparées de 2.1 nm.
	576.96	
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	On observe plusieurs raies : 404.6 nm correspond à la raie la plus lumineuse.
	404.66	

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 : λ , 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^{ème} 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 $n = f(1/\lambda^2)$

- Enfin identifier les sources d'incertitudes dans la mesure de n .

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 FLASH à jour et autorisé.

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)

Pour aller plus loin :

<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

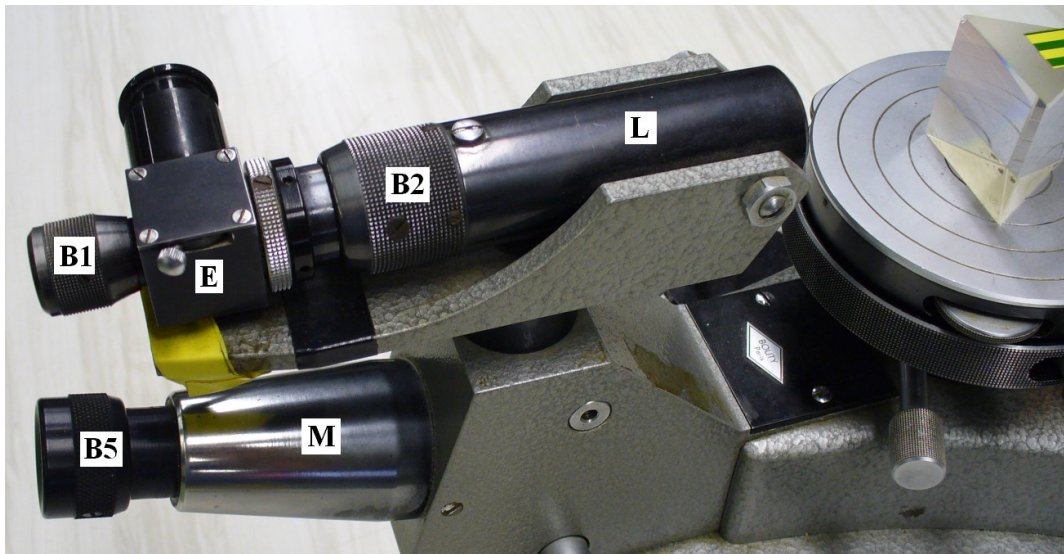
Mise à la vue des oculaires

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.

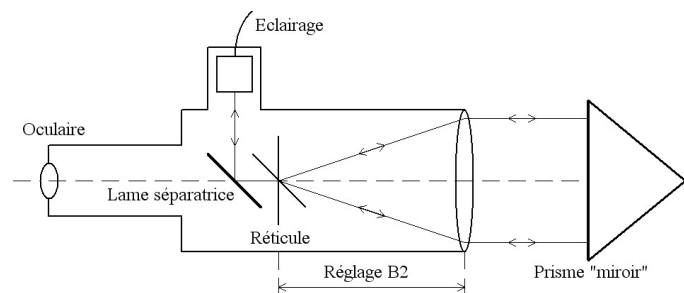


Mise au point à l'infini de la lunette L par autocollimation

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° 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 :

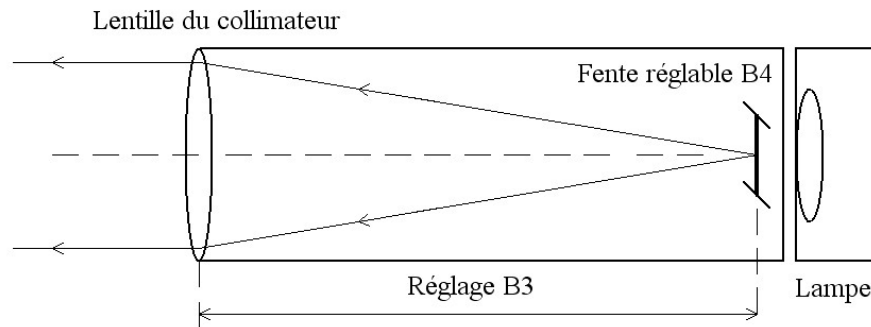
- Pousser le bouton chromé E **du côté de la plate-forme** : de la lumière sort alors de la lunette.
- Positionner le prisme sur la plate forme de sorte qu'une de ses faces soit bien perpendiculaire à la lunette. Cette face servira de miroir d'autocollimation.
- Tourner la molette B2 jusqu'à voir bien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

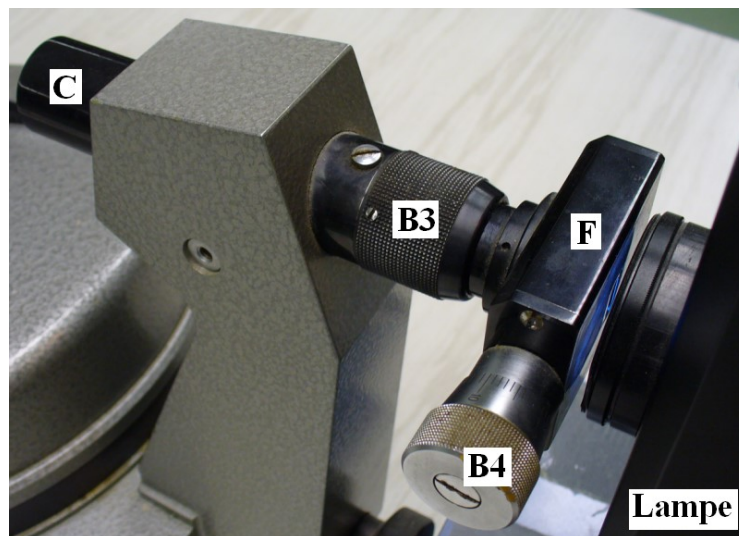
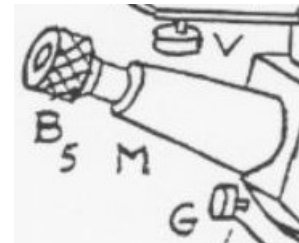
Principe :

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.

Attention (cf. §2.3) : une fois lunette et collimateur réglés mais avant de poser définitivement le prisme, pointer le centre de la fente fine et lire sur l'échelle de repérage angulaire la position centrale, soit la lecture L_0 .

Réglage de la plate-forme

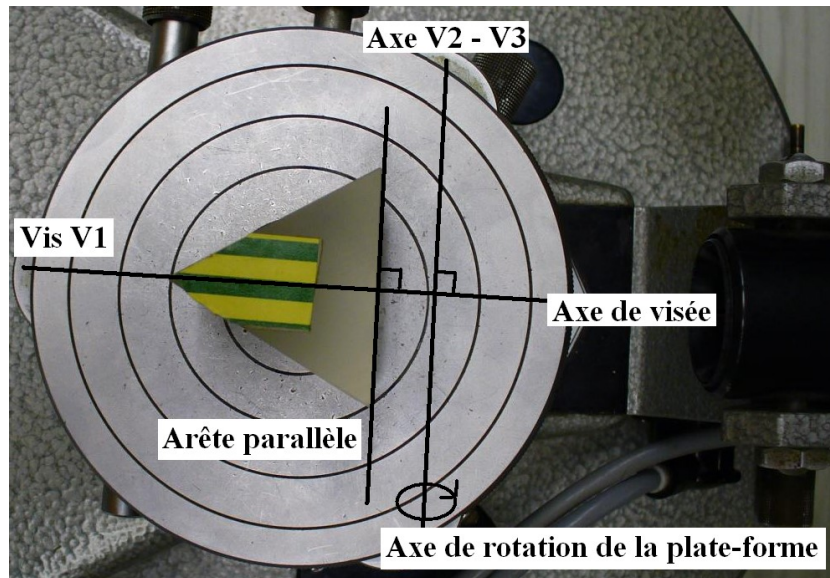
Principe :

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 :

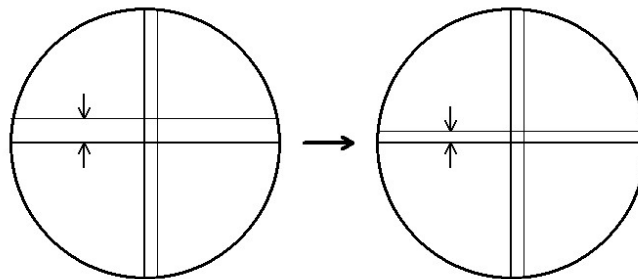
- Positionner le prisme est bien au centre de la plate-forme avec ses trois arêtes bien en direction des trois vis V_i .

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 ☺