

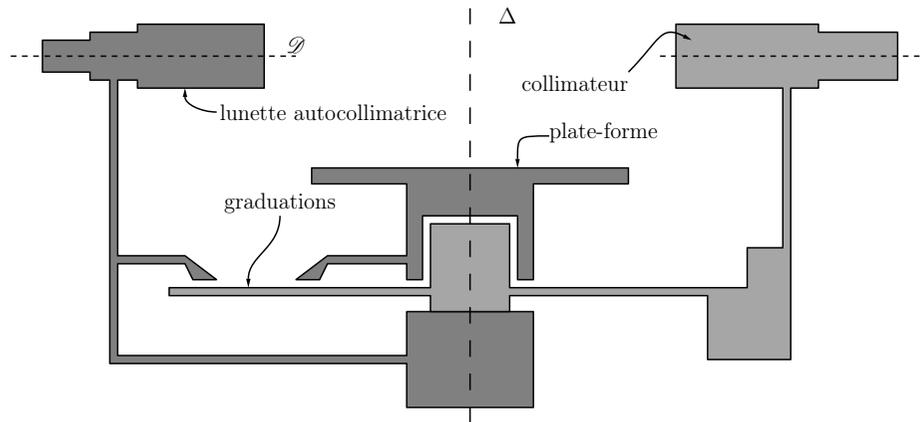
Goniomètre

L'objectif principal de ce TP est d'apprendre à régler et à utiliser un appareil optique de précision : le goniomètre à prisme. **Attention** : les différents instruments que vous allez utiliser sont prévus pour fonctionner dans des montages de précision, ils sont donc de grande qualité, fragiles et coûteux. Il sera donc impératif de redoubler de précaution lors des manipulations de lame à faces parallèles et autres prismes qui peuvent, plus que tout autre, vouloir s'échapper et finir leur vie sur le sol.

Ce TP s'appuie principalement sur le travail effectué lors des chapitres § OPT 1 Voir à travers et § OPT 3 Manipuler la lumière. On rappelle que les relations notées (*) sont celles qu'il faut savoir retrouver et que les durées mentionnées sont données à titre purement indicatif pour permettre l'évaluation de l'importance relative des différentes parties.

I) Présentation de l'appareil ⌚

1°) Description



Un goniomètre se compose :

- d'un disque horizontal gradué au demi degré près ;
- d'une plate-forme mobile autour d'un axe Δ passant par le centre du disque. C'est sur cette plate-forme réglable grâce à trois vis que nous disposerons l'objet à étudier : un réseau d'interférence (l'année prochaine) ou un prisme (dans ce TP) ;
- d'une lunette autocollimatrice mobile autour de Δ , une vis de réglage permet de régler l'angle entre son axe ϱ et Δ et une autre vis permet d'en fixer la position ;
- un collimateur fixe ou mobile (suivant les modèles) autour de Δ . Dans le cas d'un collimateur mobile, une vis permet d'en fixer la position ;
- un collimateur micrométrique mobile autour de Δ (non représenté et non utilisé dans ce TP).

2°) Objectifs

Une fois réglé, un goniomètre fait l'image à l'infini d'un objet à l'infini : il ne sert donc pas à mesurer des distances mais uniquement des angles, *ie.* des déviations. Ainsi, en utilisant différentes sources lumineuses éclairant un prisme :

- si les sources (*ie.* les longueurs d'ondes émises) sont connues, il est possible de déterminer l'indice $n(\lambda)$ du prisme ;
- si l'indice $n(\lambda)$ du prisme est connu, il est possible de déterminer la longueur d'onde inconnue d'une source lumineuse.

3°) Différents types de sources lumineuses

i. restriction

Nous ne nous intéressons ici qu'aux sources dites primaires, c'est-à-dire celles qui peuvent émettre de la lumière sans en avoir reçu au préalable.

ii. sources à spectre large

Lorsque la température d'un corps condensé augmente, celui-ci émet spontanément de la lumière sur une grande plage de fréquences. Plus la température est élevée, plus il y a de longueur d'ondes courtes (de « bleu »). C'est le cas notamment aux métaux en fusion, aux lampes à incandescence, aux étoiles ...

iii. sources à spectre de raies

Lorsqu'un gaz voit son énergie augmenter (par exemple avec des décharges électriques), il la renvoie sous forme lumineuse avec des photons dont les énergies associées correspondent à des transitions particulières entre deux niveaux d'énergie électronique. Comme les niveaux d'énergie sont quantifiés, les valeurs possibles pour les énergies des photons sont discrètes et nous observons seulement quelques longueurs d'onde. C'est le principe des lampes à vapeur de gaz.

Les lampes à vapeur de gaz mettent un certain temps à chauffer et doivent, de plus, totalement se refroidir avant d'être rallumées sous peine de détérioration. C'est pourquoi avant d'éteindre ou d'allumer une telle lampe, il faudra toujours vérifier l'intérêt d'une telle manœuvre : sauf cas exceptionnels, une lampe à vapeur ne s'allume et ne s'éteint qu'une seule fois par séance de TP. Il faut aussi faire attention à leur manipulation : en cours de fonctionnement leur température est assez élevée et les risques de brûlure (généralement légères) sont non négligeables pour les « têtes en l'air ».

Les lampes à vapeur les plus utilisées sont :

- lampe à vapeur de sodium (Na) : doublet jaune D $\lambda_{D1} = 589,0$ nm et $\lambda_{D2} = 589,6$ nm ;
- lampe à vapeur d'hydrogène (H_2) :
 - raie G' violette : $\lambda_{G'} = 434,0$ nm,
 - raie F bleue : $\lambda_F = 486,1$ nm,
 - raie C rouge : $\lambda_C = 656,3$ nm ;
- lampe à vapeur de mercure (Hg) :
 - raie violette : $\lambda = 404,7$ nm,
 - raie bleu-violette : $\lambda = 435,8$ nm,
 - raie verte : $\lambda = 546,1$ nm,
 - raie vert foncé : $\lambda = 512,8$ nm,
 - doublet jaune : $\lambda = 577,0$ nm et $\lambda = 579,1$ nm.

iv. le laser

Le laser est une source lumineuse telle que non seulement le spectre soit réduit à une seule raie très fine, mais aussi telle que tous les photons émis soient en phase, ce qui permet de multiples applications (cf. cours d'optique de 2^e année). Le laser He-Ne (le plus couramment utilisé en TP) est tel que $\lambda = 632,8$ nm.



Il ne faut jamais regarder un laser directement en face.

II) Préparer l'appareil

1°) Tout ce qu'il faut faire ☹️

Un goniomètre est parfaitement réglé lorsque il possède toutes les caractéristiques suivantes :

- le collimateur fabrique un objet optiquement à l'infini ;
- la lunette autocollimatrice fournit une image à l'infini d'un objet à l'infini ;
- l'axe \mathcal{D} de la lunette est perpendiculaire à l'axe Δ du goniomètre ;
- l'arrête utile \mathcal{U} du prisme est parallèle à Δ .

Ces réglages se font les uns après les autres et les qualités des uns dépendent de tous ceux qui précèdent. Il est donc fortement déconseillé de « bâcler » un réglage.

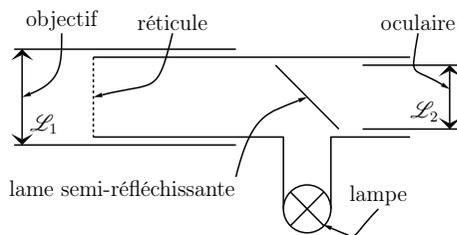
! ? Quelle est l'utilité / l'importance de ces réglages ?



2°) Lunette autocollimatrice 🕒

i. description

La lunette autocollimatrice diffère d'un viseur à frontale fixe non seulement par la présence d'un éclairage interne et d'une lame semi-réfléchissante, mais aussi par son but.



ii. réglage de l'oculaire

- Alors que la lampe est éteinte et la lame semi-réfléchissante **non** positionnée, réglez l'oculaire afin de voir net le réticule à l'infini, *ie.* sans accommoder (cf. TP-Cours opt1 Faire le point en optique).
- Le réglage de l'oculaire est le seul réglage qui peut être modifié à tout instant par quiconque et ce sans conséquence sur les autres réglages.

iii. réglage de l'objectif

Le but est de placer le réticule dans le plan focal de la lentille \mathcal{L}_1 . Ainsi les objets à l'infini se formeront ainsi dans le plan du réticule.

- Allumez la lampe, placez la lame semi-réfléchissante et installez un miroir plan devant \mathcal{L}_1 (utilisez une face d'une lame à faces parallèles si vous ne disposez pas de miroir) pour renvoyer dans la lunette la lumière qui en est issue.
- Modifiez alors le réglage pour voir apparaître net et en même temps le réticule \mathcal{R} et son image. La situation est alors la suivante : $\mathcal{R} \xrightarrow{\mathcal{L}_1} \infty \xrightarrow{\text{miroir}} \infty \xrightarrow{\mathcal{L}_1} \mathcal{R} \xrightarrow{\mathcal{L}_2} \infty$, ce qui signifie que \mathcal{R} est bien dans le plan focal de \mathcal{L}_1 .



Ne plus modifier, jusqu'à la fin du TP, quel qu'en soit le prétexte, le réglage de l'objectif.

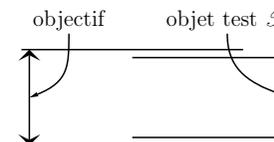
- Enlevez la lame semi-réfléchissante et éteignez la lumière.
- ! ? Expliquer le nom de la lunette.



3°) Collimateur 🕒

i. description

Le collimateur est un dispositif dont le but est de fabriquer un objet \mathcal{T} dit test à l'infini. Pour le goniomètre, l'objet test est une fente de largeur réglable.



ii. réglage

- Allumez la lampe à vapeur de mercure ou d'hydrogène (en tous cas pas celle à vapeur de sodium).
- Ouvrez la fente du collimateur à l'aide de la vis appropriée.
- ! ? Quel est l'intérêt d'augmenter la largeur de la fente ?



- Placez la lampe devant la fente et installez un papier calque entre la fente et la lampe.
- Observez la fente à travers la lunette (il est possible d'avoir à modifier la vis de réglage de l'axe \mathcal{D}).
- Modifiez le réglage du collimateur pour que l'image de la fente se forme dans le plan du réticule (on peut s'en assurer en bougeant légèrement la tête devant la lunette : si le collimateur est bien réglé, alors l'image de la fente et du réticule ne bougent **pas** l'un par rapport à l'autre).



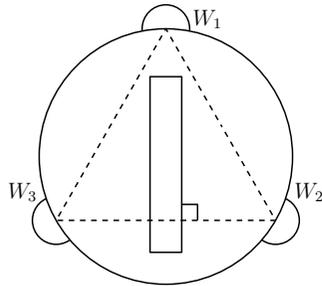
On ne modifiera désormais plus, jusqu'à la fin du TP, quel qu'en soit le prétexte, le réglage du collimateur.

4°) **Axe de la lunette** 

i. avec une lame à faces parallèles

Comme son nom l'indique, cet objet a deux faces rigoureusement parallèles, c'est la seule chose que nous savons, mais ça, nous le savons.

- Placez la lame à faces parallèles \mathcal{L} comme indiqué sur le schéma ci-dessous : avec les faces caractéristiques perpendiculaires à un des côtés (ici W_2W_3) du triangle formé par les trois vis de réglage du plateau.



- Avant de poursuivre, vérifiez que le plateau peut effectuer une rotation de 180° sans que la lame \mathcal{L} ne heurte le collimateur ou la lunette.

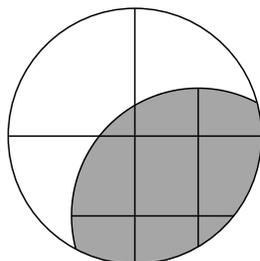


Une fois positionnée, il ne faudra plus toucher à la lame jusqu'à la fin du réglage sous peine de devoir tout recommencer.

ii. premier réglage à l'œil

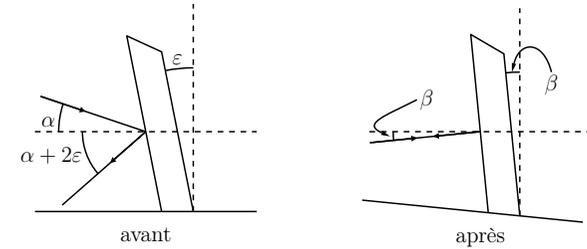
- Réglez à l'œil l'orthogonalité de \mathcal{D} et de Δ ainsi que la verticalité des faces de la lame \mathcal{L} .
- Installez la lame semi-réfléchissante et allumez la lampe de la lunette autocollimatrice.
- Recherchez l'image du réticule après réflexion sur une face de la lame (on veillera pour cela à ne pas regarder en face du collimateur afin d'éviter les images parasites).

Si vous ne la trouvez pas, la seule vis de réglage à modifier est celle de la direction de \mathcal{D} . Une fois trouvée, vous devez observer une image typiquement identique à la figure ci-contre.



- Superposez le fil horizontal de l'image \mathcal{R}' du réticule avec le fil horizontal du réticule \mathcal{R} . Pour cela, faites parcourir la moitié du chemin en utilisant la vis de réglage de la lunette et l'autre moitié en modifiant les vis W_2 et W_3 .

iii. affinage

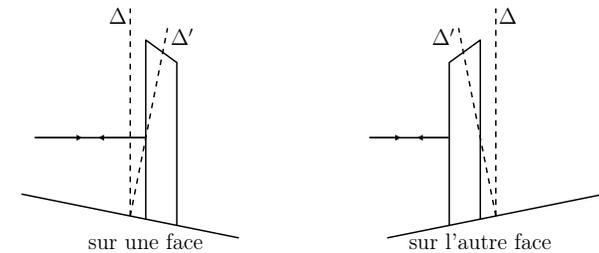


- Retournez de 180° la lame \mathcal{L} en faisant pivoter la plate-forme. Si l'angle β est suffisamment faible (cas souhaitable), vous devriez observer une partie de l'image \mathcal{R}' du réticule par réflexion sur \mathcal{L} sans réglage préalable. Si ce n'est pas le cas, il faut régler « à l'œil » l'orthogonalité de \mathcal{D} et de Δ jusqu'à observer une partie de l'image de \mathcal{R}' dans la lunette en modifiant pour moitié la vis de réglage de la lunette et pour moitié les vis de la plate-forme. C'est sans nul doute le passage délicat lors du réglage du goniomètre.

- Une fois l'image \mathcal{R}' visible, modifiez la vis de la lunette puis les vis W_2 et W_3 pour amener moitié par moitié le fil horizontal de \mathcal{R}' en coïncidence avec le fil horizontal de \mathcal{R} .

En théorie, après cette deuxième série de manipulations, \mathcal{D} est rigoureusement orthogonale à Δ . En pratique, comme il est difficile d'apprécier parfaitement les moitiés de chemin et que la lame n'est jamais rigoureusement bien placée, il est nécessaire de faire plusieurs séries de { demi tour + manipulation des vis } pour obtenir une coïncidence permanente des fils horizontaux de \mathcal{R} et \mathcal{R}' .

- ▀ *Remarque* : après un tel réglage, l'axe Δ' de la plate-forme n'est pas forcément vertical : cela dépend de la façon dont est taillée la lame \mathcal{L} comme l'illustrent les schémas ci-dessous.



Ne plus modifier, jusqu'à la fin du TP, quel qu'en soit le prétexte, le réglage de la vis de la lunette.

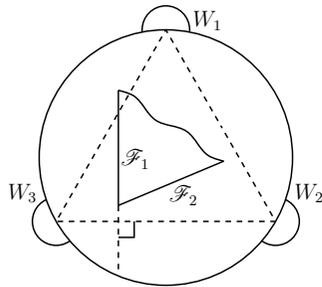
Vous pouvez désormais retirer la lame \mathcal{L} de la plate-forme.

5°) **Arrête du prisme** 

i. positionnement du prisme

- Réglez les vis W_1 , W_2 et W_3 à mi-course, de telle sorte que la plate-forme soit à peu près horizontale.
- Choisissez et repérez l'arrête utile \mathcal{U} du prisme : c'est celle qui sera étudiée, il est donc indispensable de ne pas la « perdre de vue ». Vous pouvez la repérez, par exemple, avec un petit bout de post-it (mais pas avec du scotch qui risquerait de laisser des traces), collé sur la face non utilisée ou avec un petit objet placé devant la base utilisée.

→ Positionnez le prisme pour avoir une des deux faces utilisée (ici \mathcal{F}_1) perpendiculaire avec un des côtés (ici W_1W_2) du triangle formé par les trois vis de réglage (cf. schéma ci-dessous)



→ Vérifiez qu'ainsi positionné, le collimateur peut éclairer en incidence rasante une grande portion des faces \mathcal{F}_1 et \mathcal{F}_2 du prisme (l'arête utile se trouve, finalement, assez proche du centre de la plate-forme).

Une fois positionné, il ne faut plus toucher, sous aucun prétexte, le prisme : même pas le déplacer d'un millimètre. En cas de mouvement « malencontreux », il est nécessaire de refaire tout le réglage décrit ci-dessous.



ii. réglage

Le but est de rendre l'arête \mathcal{U} parallèle à l'axe Δ . On utilise pour cela une technique identique à celle utilisée avec la lame à faces parallèles, à la différence près que l'on ne modifie pas la vis de réglage de la lunette.

- Lampe allumée et lame semi-réfléchissante positionnée, visez la face \mathcal{F}_1 (celle qui est perpendiculaire à W_2W_3) et modifiez les vis W_2 et W_3 (W_1 n'a aucune influence) pour superposer les fils horizontaux.
- Tournez le prisme et visez la face \mathcal{F}_2 . Modifiez W_1 (et uniquement W_1) pour amener les deux fils horizontaux l'un sur l'autre.
- Visez à nouveau et successivement \mathcal{F}_1 et \mathcal{F}_2 pour peaufiner le réglage.
- Éteignez la lampe de la lunette et ôtez la lame semi-réfléchissante : le goniomètre est prêt.



Maintenant que tout est réglé, il ne faut plus toucher à rien (même pas à la position du prisme sur la plate-forme) sous peine de devoir recommencer une bonne partie des réglages.

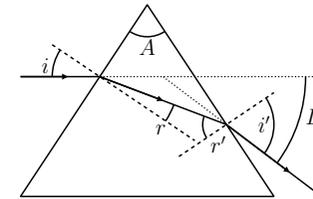
III) Utiliser le goniomètre

1°) Rappel

i. prisme

Les relations fondamentales du prisme sont $r + r' = A$ (*) et $D = i + i' - A$ (*). La courbe de déviation $D(i)$ présente un minimum D_m lorsque $i = i'$ tel que

$$\sin\left(\frac{D_m + A}{2}\right) = n \sin\left(\frac{A}{2}\right) \quad (*)$$



ii. loi de Cauchy

La loi de Cauchy donne l'indice en fonction de la longueur d'onde dans le vide :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \text{ avec } A, B > 0.$$

2°) Faire une mesure

i. repérer une bonne position

→ Observez l'image de la fente à travers la lunette (on pourra rechercher, à l'œil, son image à travers le prisme).

Nous appellerons « pointer » le fait de faire coïncider une image avec le fil vertical du réticule.

Pour pointer :

- cherchez à l'œil la raie que vous désirez pointer
- une fois repérée, sans la perdre de vue, amenez la lunette devant votre œil
- utilisez le déplacement manuel de la lunette afin de faire un réglage grossier, *ie.* de voir la raie à travers la lunette
- fixez la lunette avec la vis de blocage pour pouvoir utiliser la vis de réglage afin d'assurer au mieux la coïncidence entre le réticule et la raie

☛ *Remarque* : une fente fine permet une coïncidence plus précise mais est moins lumineuse, surtout à l'œil.

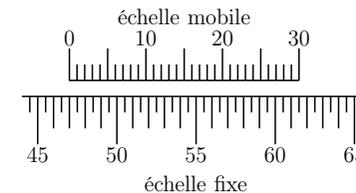
ii. lire une bonne position

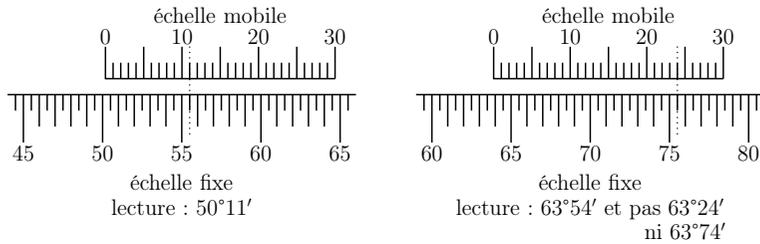
Nous allons utiliser un vernier qui permet la lecture à la minute près d'un angle. Rappelons la relation : $1' = \frac{1^\circ}{60}$.

Les 30 graduations de la partie mobile correspondent à 29 graduations de la partie fixe.

La position de la graduation 0 de l'échelle mobile indique la valeur de l'angle mesuré arrondi au demi-degré inférieur.

À cette valeur, il faut ajouter le nombre de minutes indiqué par la graduation de l'échelle mobile qui est parfaitement alignée avec une graduation de l'échelle fixe.

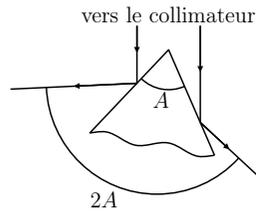




3°) Déterminer l'angle du prisme

i. première méthode ☹️

→ La lampe de la lunette autocollimatrice étant éteinte et l'arrête du prisme à peu près dirigé vers le collimateur, pointez les images de la fente source par chacun des deux faces utiles du prisme.



ℓ? Pourquoi est-il préférable, ici, d'affiner la fente source ?

ℓ? Comment montrer simplement que l'angle représenté ci-contre vaut bien 2A ?

$\theta_1 =$	$\theta_2 =$
$2A =$	$A =$

ii. deuxième méthode ☹️

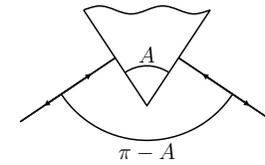


À ne faire qu'à la fin du TP s'il vous reste du temps.

Le but est ici de trouver les directions normales au prisme. Pour cela nous allons l'utiliser comme miroir comme lorsque nous avons réglé le parallélisme de l'arête utile du prisme avec l'axe du goniomètre

→ Allumez la lampe de la lunette et positionnez la lame semi-réfléchissante.

→ Pointez l'image \mathcal{R}' du réticule en réflexion sur \mathcal{F}_1 et repérez la position θ_1 de la lunette.



$\theta_1 =$

→ Pointez l'image \mathcal{R}' du réticule en réflexion sur l'autre face \mathcal{F}_2 et repérez la position θ_2 de la lunette.

$\theta_2 =$

→ Déterminez l'angle $A = \pi - |\theta_2 - \theta_1|$.

$A =$

☹️ Remarque : évitez d'avoir le 0 de la graduation des angles entre les deux pointés. Si tel est le cas, ajoutez 360° à la valeur la plus petite.

4°) Loi de CAUCHY

i. repérer un minimum de déviation ☹️

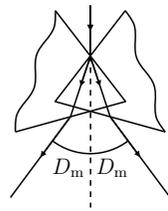
→ Diminuez autant que faire se peut la largeur de la fente.

ℓ? Pourquoi est-il important / utile de diminuer la largeur de la fente ?

→ En suivant à l'œil, vérifiez que lorsque la plate-forme tourne, la déviation de l'image de la fente passe pas un minimum. Une fois repéré, déterminez plus précisément ce minimum de déviation en observant cette image à travers la lunette.

ii. déterminer D_m ☹️

→ Repérez l'angle de la lunette correspondant au minimum de déviation lorsque la lumière du collimateur entre successivement par les deux faces \mathcal{F}_1 et \mathcal{F}_2 utilisées du prisme. L'écart angulaire entre ces deux positions vaut immédiatement $2 D_m$ (cf. schéma ci-dessous).



ii) Pourquoi mesurer $2D_m$ et non D_m directement ?

iii. ajuster les coefficients A et B ☺

→ Pour toutes les raies visibles de la lampe spectrale utilisée, déterminer le minimum de déviation D_m pour chacune des longueurs d'onde. Les valeurs sont proches mais nettement différentes.

Déviations minimales						
raie n°	1	2	3	4	5	6
couleur						
λ						
θ_1						
θ_2						
D_m						
n						

→ En déduire pour chaque longueur d'onde l'indice $n(\lambda)$ (dernière ligne du tableau ci-dessus).

→ En considérant la droite $n(x) = A + Bx$ où $x = \frac{1}{\lambda^2}$, déterminez à l'aide d'une régression linéaire, les coefficients A et B ainsi que leurs incertitudes.

$A =$ $B =$ $r =$

$\Delta A =$ $\Delta B =$

5°) Avec la lampe à vapeur de sodium

i. repérer le minium de déviation

→ Éteignez la lampe précédemment utilisée et allumez celle à vapeur de sodium.

→ Repérez le minimum de déviation.

$\theta_1 =$ $\theta_2 =$ $D_m =$

ii. en déduire la longueur d'onde

→ Utilisez la loi de CAUCHY précédemment calculée pour déterminer l'indice auquel correspond une telle déviation, puis en déduire la longueur d'onde associée.

$n =$ $\Delta n =$

$\lambda_{\text{exp}} =$ $\Delta \lambda_{\text{exp}} =$

→ Comparez avec la valeur attendue.