

## 205 160 : Réalisation d'un monochromateur

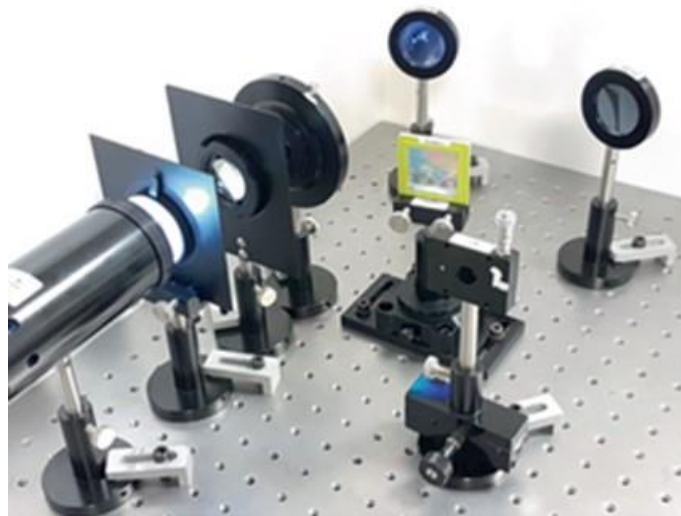
**Mots clés :** dispersion par un réseau en réflexion, monochromateur de Czerny-Turner

**Prérequis :** formation des images en optique géométrique, notions sur la nature ondulatoire de la lumière (réseau, diffraction)

**Contenu :** notice de montage, idées de TP, ressources pédagogiques

**Objectifs :**

- Réglages optiques d'un monochromateur
- Résolution et séparation spectrale d'un spectre de raies



# Table des matières

---

I. INTRODUCTION.....	3
II. PREPARER .....	4
III. EXPERIMENTER : REGLAGE PAS-A-PAS.....	7
IV. DISPERSION DE LA LUMIERE PAR UN RESEAU.....	11
V. PARAMETRES INFLUENÇANT LA RESOLUTION .....	14
VI. CALIBRATION EN LONGUEUR D'ONDE .....	18
VII. UTILISATION DU LOGICIEL GEOGEBRA® .....	21
VIII. RESSOURCES PEDAGOGIQUES .....	26

# I. Introduction

Les spectromètres sont des instruments qui collectent et dispersent, à l'aide d'un prisme ou d'un réseau, une émission lumineuse et délivrent un spectre dans un plan image. Ce spectre est composé d'une suite d'images monochromatiques correspondant aux différentes longueurs d'onde présentes dans la lumière incidente et pénétrant par la fente d'entrée. On peut ainsi obtenir une analyse spectrale de la lumière émise par une source et par exemple, pour une étoile, déterminer les éléments chimiques qui la composent.

Le monochromateur constitue le sous-ensemble principal des spectromètres. Cet instrument est conçu pour isoler une longueur d'onde particulière, ou une petite bande spectrale  $\Delta\lambda$  d'une lumière incidente au travers d'une fente de sortie.

Les monochromateurs sont par exemple inclus dans des spectrophotomètres spécialement conçus pour analyser la fluorescence d'échantillons définis. Ces instruments ont deux applications principales :

- En tant que filtre : le monochromateur, possédant une bande passante très étroite, permet de créer un filtrage en longueur d'onde.
- En tant qu'outil d'analyse de la distribution de lumière d'une source lumineuse ou de n'importe quel échantillon émetteur de lumière dans une gamme particulière de longueur d'onde.

Dans ce TP, nous proposons de construire un monochromateur basé sur la configuration de Czerny-Turner. Cette configuration a été élaborée par les physiciens du même nom.

Le monochromateur de Czerny-Turner est constitué d'un système optique comportant :

- Une fente d'entrée qui agit comme une « source ponctuelle » et dont l'ouverture a une influence sur la luminosité et la résolution du système
- Un miroir de collimation
- Un réseau de diffraction en réflexion
- Un miroir de focalisation
- Une fente de sortie est positionnée au foyer image du miroir de sortie. Son ouverture permet également d'améliorer la résolution du système, mais limite aussi la luminosité en sortie



*Le faisceau lumineux polychromatique issu de la source traverse la fente d'entrée (F1). Celle-ci est dans le plan focal du miroir concave de collimation (M1). Tous les rayons réfléchis par le miroir sont donc parallèles lorsqu'ils arrivent sur le réseau.*

## II. Préparer

### 1) Liste du matériel à disposition

Table et cavaliers	<ul style="list-style-type: none"><li>• 1 table optique NewMax 600 x 450 mm</li><li>• 1 cavalier large</li><li>• 7 cavaliers simples</li><li>• 1 cavalier transversal</li><li>• 1 cavalier à rotation</li><li>• 1 cavalier porte-écran</li><li>• 1 pied demi-lune</li><li>• 9 brides de maintien</li></ul>
Sources	<ul style="list-style-type: none"><li>• 1 lampe LED sur tige</li><li>• 1 alimentation spectrale avec 1 carter</li><li>• 1 ampoule à vapeur de Hg</li></ul>
Ecrans	<ul style="list-style-type: none"><li>• 1 écran sur tige Ø 10 mm</li><li>• 1 écran blanc simple</li></ul>
Montures et supports	<ul style="list-style-type: none"><li>• 4 montures porte-composants Ø 40 mm</li><li>• 1 porte lame sur tige Ø 10 mm</li><li>• 1 noix d'optique</li></ul>
Composants	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2 miroirs concaves Ø 40 mm f+100 mm</li><li>• 2 miroirs concaves Ø 40 mm f+200 mm</li><li>• 2 fentes symétriques sur tige Ø 10 mm</li><li>• 2 lentilles convergentes Ø 40 mm f+50 mm</li><li>• 1 réseau holographique 600 traits/mm</li><li>• 1 réseau holographique 1200 traits/mm</li><li>• 1 diaphragme à iris larges bords</li></ul>
Utilitaire GEOGEBRA®	<ul style="list-style-type: none"><li>• A télécharger sur installweb</li></ul>

### **Précautions à prendre :**

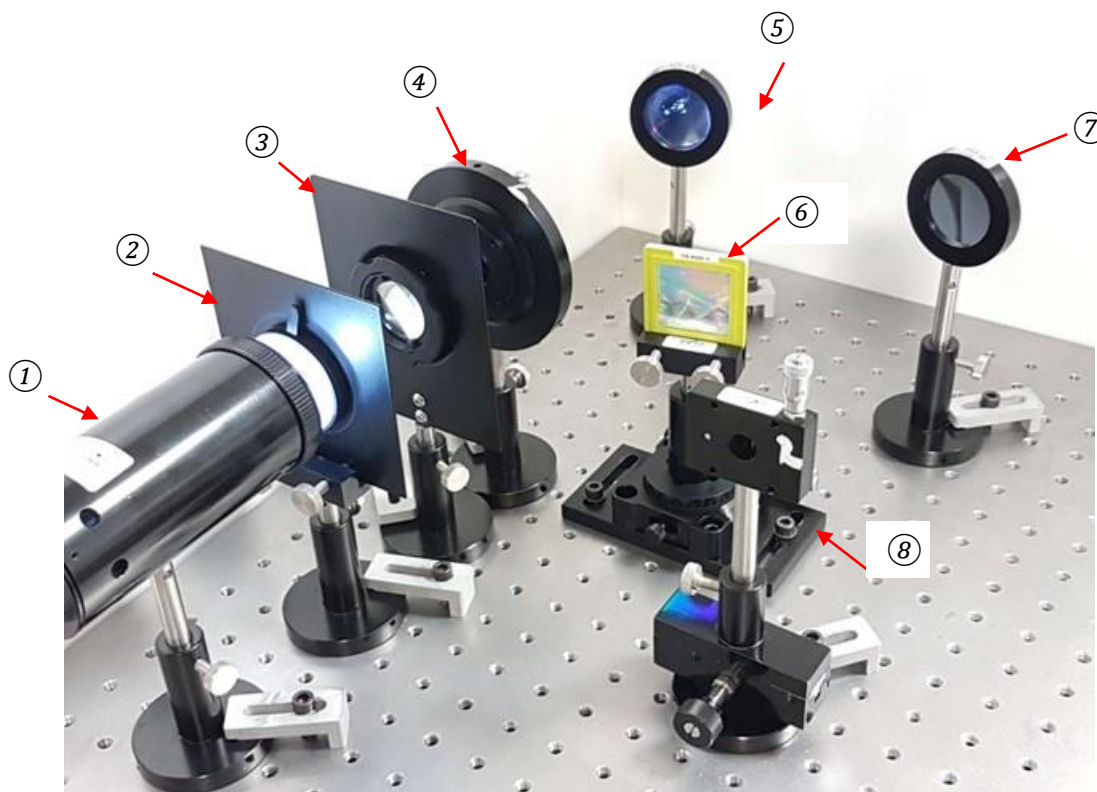
#### **Manipulation des optiques :**

Tout élément d'optique étant fragile il est nécessaire de manipuler les lentilles, les filtres, les réseaux et le prisme avec une grande précaution ! Il faut également éviter de mettre ses doigts sur les différents éléments sous peine de les rendre inutilisables.

#### **Alimentation des sources lumineuses :**

Une lampe spectrale doit préchauffer au moins 2 minutes avant une mesure. Il faut les éteindre une fois la mesure effectuée.

## 2) Assemblage des sous-ensembles



① *Lanterne LED :*

S'utiliser avec le pied large qu'il faudra brider à la table pour assurer sa stabilité une fois sa position déterminée.

② *Diaphragme à iris sur tige :*

A utiliser avec un pied simple à brider.

③ *Lentille d'entrée :*

- A mettre dans une monture porte composant
- A utiliser avec un pied simple à brider

④ *La fente d'entrée :*

A utiliser avec un pied simple à brider

⑤ et ⑦ : *Les miroirs d'entrée et sortie :*

- A mettre dans une monture porte composant
- A utiliser avec un pied simple à brider

⑥ *Le réseau de diffraction :*

- S'utilise avec le pied à réglage angulaire et une tige Ø 12 mm.
- Le pied à réglage angulaire est à fixer à l'aide d'une ou deux brides de maintien (ou éventuellement par des vis directement dans la table)

L'orientation du réseau permet de sélectionner une plage de longueurs d'onde choisie en sortie.



⑧ *La fente de sortie :*

S'utilise avec le pied à réglage latéral qu'il faudra brider à la table. Cela permet de déplacer la fente latéralement le long du spectre pour sélectionner également une plage de longueurs d'onde en sortie



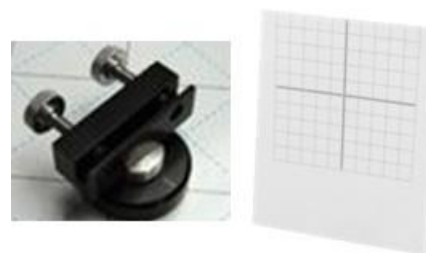
Un Vernier permet de lire avec précision l'ouverture de la fente ; celle-ci est ajustable de 0,05 à 5mm. En faisant varier leur ouverture, on peut étudier leur influence sur la résolution du système. Dans le cas de la lampe spectrale du Mercure, vous pourrez isoler une raie particulière.

⑨ *Lentille de sortie :*

- A mettre dans une monture porte composant
- A utiliser avec un pied simple à brider

⑩ *Ecran d'observation sur tige :*

Il est à utiliser avec un pied simple.



⑪ *Ecran de réglage :*

Il sert aussi à limiter la lumière parasite si besoin.

A utiliser avec le pied porte écran

*Remarque :* la source de Mercure doit être approchée le plus près possible de la fente d'entrée. Le pied demi-lune sert à maintenir cette source à hauteur de la fente (en dehors de la table optique).

### 3) Mesure de la distance focale des miroirs concaves

Pour que le montage du monochromateur soit plus facile il est recommandé de déterminer expérimentalement la distance focale des miroirs fournis. Plusieurs méthodes existent, nous vous proposons la mesure par auto-collimation, la plus simple, mais nécessitant du matériel supplémentaire, non fourni dans le TP.

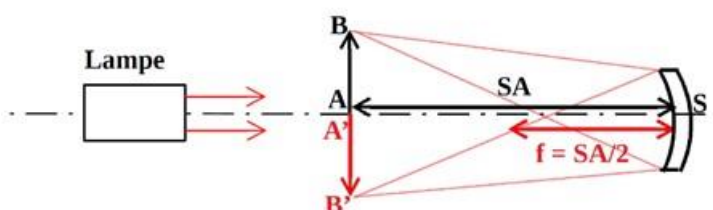


*Ecran d'auto-collimation avec l'objet éclairé (AB).*

Placer respectivement sur un banc d'optique gradué :

- Une lampe
- Un écran d'auto-collimation, ex : réf. 202 705
- Le miroir en monture à tester.

Lorsque l'image réfléchiée par le miroir est nette sur l'écran, relever la distance entre les deux. La distance focale du miroir est égale à la moitié de cette distance.





### III. *Expérimenter : réglage pas à pas*

#### 1) Vérifier avant de commencer

- Les différents sous-ensembles sont préparés : la visserie et les clés Allen sont à disposition des élèves
- L'utilitaire GéoGebra® est fonctionnel et à disposition des groupes de TP
- La distance focale des miroirs de collimation a été mesurée expérimentalement (par la méthode de votre choix)

#### 2) Mise en œuvre

1. Fixer la source de lumière blanche dans le coin supérieur gauche de la table.

Laisser une marge d'environ 10 cm à gauche.

Aligner son axe optique avec les trous de la table.  
Les autres composants seront centrés par rapport au faisceau incident.



2. Placer le diaphragme juste derrière la lampe.

Pour le moment, réduire son ouverture à environ 3 mm de diamètre pour pouvoir bien aligner le reste des composants.



3. Placer L1 après le diaphragme de façon à focaliser le faisceau à environ 6 à 8 cm derrière L1.



4. Fixer la fente F1 au point de focalisation du faisceau par L1.



5. Positionner grossièrement M1 tel que la fente soit au point focal objet de M1 (distance focale déterminée précédemment).

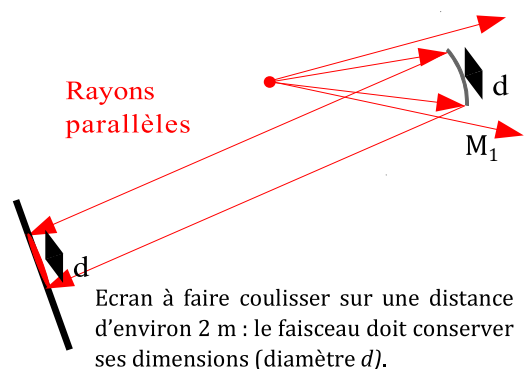
Orienter M1 d'environ  $+20^\circ$  (maximum) pour que le faisceau émergent soit replié avec un angle de  $40^\circ$  maximum par rapport au faisceau incident, puis régler l'ouverture de F1 pour que tout le faisceau soit réfléchi par M1.

Ajuster la position de M1 pour que le faisceau émergent soit collimaté :



Observer le faisceau réfléchi par ce miroir sur l'écran de réglage à faire coulisser sur une distance d'environ 2 m : il doit conserver globalement les dimensions entre la surface du miroir à une distance de 2 m

*NB : La manière la plus exacte pour vérifier la collimation du faisceau après  $M_1$  est d'utiliser une lunette de visée auto-collimatrice qui permet, en plus de bien d'autres applications, de contrôler la position d'un objet à l'infini.*





6. Placer le réseau 600 traits/mm sur le parcours du faisceau.

Sa distance par rapport à M1 n'a pas d'importance si les rayons sont bien collimatés. Pour l'encombrement, l'idéal est de l'espacer d'environ 20 cm de M1.



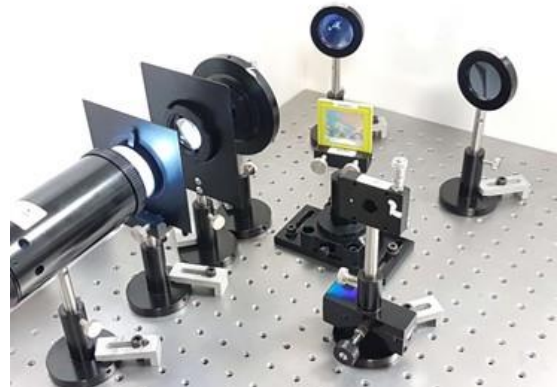
7. Placer M2 sur le parcours du faisceau diffracté d'ordre 1 et l'orienter autour de son axe de rotation d'environ  $20^\circ$  maximum afin que le faisceau émergent reparte parallèlement à l'axe de la lampe.

Juger de sa distance par rapport au réseau : Il doit être à la distance idéale pour que les couleurs du spectre soient bien séparées, et que les ordres de diffraction 0, 1 et 2 ne se chevauchent pas. De plus, il est préférable que l'ensemble du spectre soit réfléchi par M2.



8. Positionner grossièrement F2 à la distance focale de M2, puis ajuster sa position pour que le spectre soit le plus contrasté possible sur F2.

Réduire l'ouverture de la fente au minimum possible tout en conservant la luminosité adéquate, pour sélectionner la plage la plus fine possible de longueur d'onde.



9. Placer l'écran à environ 20 cm de F2, puis interposer L2 entre la fente et l'écran et la positionner pour que la raie soit nette, lumineuse et contrastée sur l'écran.

Si l'on ne parvient pas à trouver une position de la lentille pour que la raie soit bien nette, reculer un peu l'écran et recommencer.

Si la luminosité est faible, ouvrir très légèrement la fente F2.



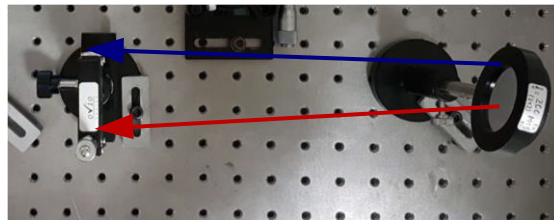
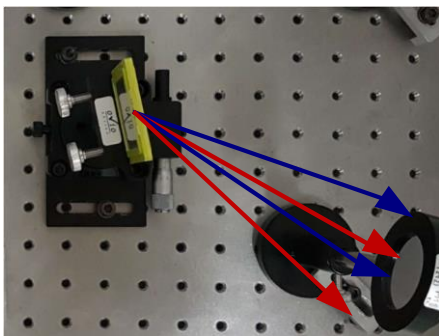
Une fois que tous ces composants sont bien positionnés, ouvrir le diaphragme, faire varier l'inclinaison du réseau (ou la position latérale de F2) et observer la figure obtenue sur l'écran :

Une raie de lumière sera visible, le monochromateur est réglé.

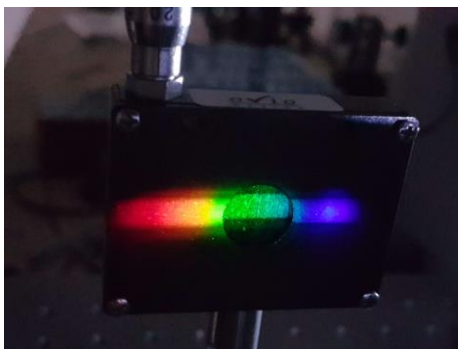
### 3) Sélection d'une bande de longueurs d'onde

Pour sélectionner une zone particulière de longueurs d'onde en sortie du monochromateur, nous vous conseillons de tourner le réseau de diffraction d'un angle  $\theta$  avec la vis micrométrique une fois le réglage fini.

Puis d'ajuster la sélection en déplaçant latéralement la fente de sortie F2 à l'aide de la translation du cavalier.



#### *Spectre de la LED et sélection d'une bande spectrale*



*Spectre de la LED observé au niveau de la fente de sortie*



*Raie sélectionnée et focalisée sur l'écran d'observation.*

## IV. *Dispersion de la lumière par un réseau*

Les réseaux sont couramment utilisés dans les spectromètres par exemple. Ce sont des éléments couramment utilisés en enseignement pour l'étude de la diffraction.

Ici, nous utilisons un **réseau de diffraction par réflexion**.

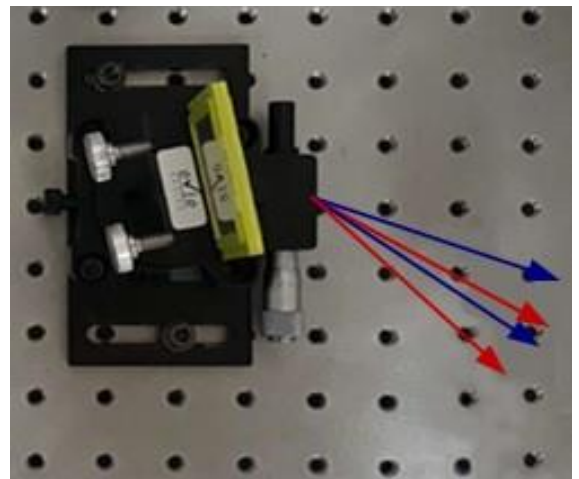
### 1) Vérifier avant de commencer

- Le monochromateur doit au moins être aligné jusqu'au positionnement du réseau.
- Le logiciel doit être à disposition des étudiants.

### 2) Mise en œuvre

Si le monochromateur est entièrement réglé, positionner l'écran de réglage entre le réseau et le miroir M2 de sortie

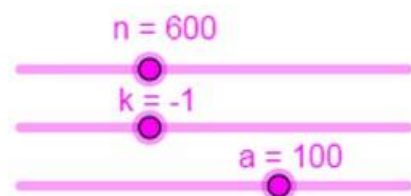
- Utiliser le réseau 600 traits/mm et observer le comportement en sortie
- Remplacer le réseau 600 traits/mm par le réseau 1200 traits/mm



*Observation des rayons diffractés en sortie du réseau.*

En parallèle : à l'aide de GeoGebra®, jouer sur les curseurs « n », « k » et « a » pour en déduire le rôle du réseau notamment sur la résolution :

- « n » : représentant le nombre de traits /mm
- « k » : l'ordre observé
- « a » : angle de rotation du réseau



### 3) Résultats et questions

#### i. Calculs préliminaires (optionnel)

A l'aide de la formule des réseaux en réflexion, calculer les positions  $i'$  des premier et second ordres diffractés, pour les réseaux de 300 et 600 traits par millimètre éclairés sous une incidence  $i$  de  $15^\circ$  pour différentes sources monochromatiques ( $\lambda = 405, 577$  et  $644$  nm).

Réponse : avec la relation  $i' = \arcsin (k\lambda - \sin i)$

$\lambda$ (nm)	Réseau 1		Réseau 2	
	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 1	Ordre 2
405	$22,4^\circ$	$30,1^\circ$	$30,1^\circ$	$48,1^\circ$
577	$25,6^\circ$	$37,2^\circ$	$37,2^\circ$	$72^\circ$
644	$26,9^\circ$	$40,2^\circ$	$40,2^\circ$	NON

#### ii. Analyse du réseau 600 traits/mm en lumière blanche

Commentez la figure de dispersion obtenue par un réseau :

- combien d'ordres différents observez-vous ?
- que pouvez-vous dire sur : la luminosité, l'étalement de la figure... ?

Le réseau permet d'obtenir plusieurs ordres diffractés qui contiennent chacun l'ensemble des couleurs du spectre. On peut ainsi observer la présence d'un ordre 0 incluant toutes les longueurs d'onde : il n'y a pas de dispersion de la lumière.

De plus, la position des maxima dépend de la longueur d'onde. Ici, le bleu est moins dévié que le rouge. Cette dispersion angulaire augmente avec l'ordre considéré et s'étend géométriquement. De plus, certaines radiations d'ordres différents peuvent se superposer. Ainsi l'ordre 2 du rouge se confond à l'ordre 3 du violet.

Enfin, la luminosité des spectres diminue lorsque l'ordre augmente.

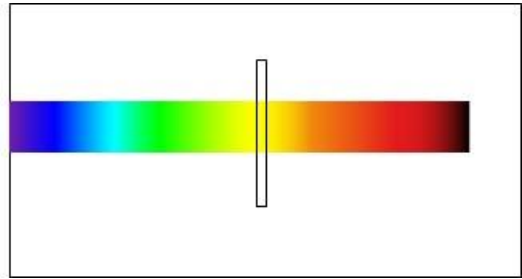
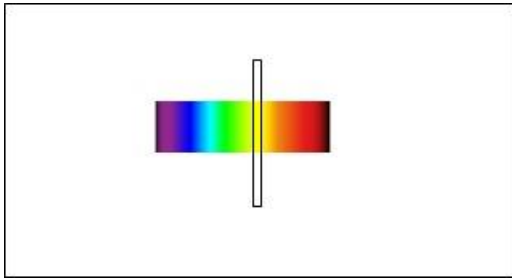
#### iii. Comparaison avec le réseau 1200 traits/mm

- Qu'observez-vous ? Quelle est l'influence entre nombre de traits et figure de diffraction ?
- Qu'en déduisez-vous sur la résolution possible en sortie de monochromateur ?
- Quelles sont les limitations de ce montage

Lorsque le nombre de traits par mm augmente, le pas du réseau diminue et l'effet de la diffraction est d'autant plus important.

Ainsi, la figure est plus étalée, l'espacement entre les ordres augmente et le nombre d'ordres observables diminue.

**Lorsque  $n$  augmente, la résolution augmente.** En effet, plus la dispersion des spectres est élevée, plus on peut sélectionner de façon précise une plage fine de longueur d'onde.



La limitation de cet effet est liée à la dimension physique des optiques.

En effet, le miroir de sortie a une taille limitée et ne pourra donc pas accepter sur sa surface toute la lumière produit en cas d'ordre élevé. De plus, la luminosité des ordres élevés étant plus faible, cela constitue une limitation sur la lumière exploitable en sortie du monochromateur.



## V. Paramètres influençant la résolution

### 1) Vérifier avant de commencer

- La lampe spectrale de Hg doit être positionnée dans le pied demi-lune,
- Les réseaux 600 traits / mm et 1200 traits/mm doivent être laissés à disposition des élèves,
- Le logiciel doit être à disposition des étudiants.

### 2) Mise en œuvre

#### **Expérimentalement :**

1 – Enlever la lanterne LED, le diaphragme et la lentille L1.

2 - Remplacer ces éléments par la lampe à vapeur de mercure.

- Pour optimiser la luminosité : la mettre la plus proche possible de la fente d'entrée. Il peut être nécessaire aussi de compacter un peu la manipe par rapport au cas avec la LED.
- S'aider de l'écran de réglage pour occulter au maximum la lumière parasite.

Attention : le carter de la lampe spectrale est chaud.

Les mesures qui suivent étant délicates, il est préférable de réaligner la position des différents éléments à partir du miroir d'entrée.

#### **Utilitaire GeoGebra® :**

Faites varier différents paramètres accessibles notamment l'inclinaison des miroirs (non réalisable sur la manipe réelle sans tout dérégler)

### 3) Résultats et questions

i. Calculs préliminaires (facultatif)

- Résolution théorique liée aux phénomènes de diffraction pour un éclairage du réseau sur une largeur  $L=20$  mm pour les deux réseaux

Réponse : avec la relation  $R = \lambda/d\lambda = kN = kpL$

	p (traits/mm)	N	R <sub>diff</sub> – ordre 1	R <sub>diff</sub> – ordre 2
Réseau 1	300	6000	6000	12000
Réseau 2	600	12000	12000	24000

Donc la résolution  $d\lambda$  théoriquement atteignable est :  $d\lambda = \lambda/R_{\text{diff}}$

	Réseau 1		Réseau 2	
$\lambda$ (nm)	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 1	Ordre 2
405	0,068 nm	0,034 nm	0,034 nm	0,017 nm
577	0,096 nm	0,048 nm	0,048 nm	0,024 nm

Remarque :  $kp = \text{constante pour une longueur d'onde fixée.}$

- Résolution liée à l'ouverture des fentes :  $d\lambda = \frac{W \cos i}{k p L_A}$

Calculer la résolution liée à l'ouverture des fentes pour des angles d'incidence de  $-5^\circ$  à  $-30^\circ$ , pour les deux réseaux aux ordres 1 et 2 en choisissant une ouverture de fente d'entrée  $W = 0,1$  mm et deux valeurs possibles de longueurs de bras d'entrée  $L_A = +100$  mm et  $+200$  mm. Que conclure sur la limitation du système ?

		Réseau 1				Réseau 2			
		$L_A = +100$ mm		$L_A = +200$ mm		$L_A = +100$ mm		$L_A = +200$ mm	
i (°)	cos i	k = 1	k = 2	k = 1	k = 2	k = 1	k = 2	k = 1	k = 2
-5	0,99	3,3	1,7	1,7	0,83	1,7	0,83	0,83	0,42
-10	0,98	3,26	1,63	1,63	0,82	1,63	0,82	0,82	0,41
-15	0,97	3,23	1,62	1,62	0,8	1,62	0,8	0,8	0,4
-20	0,94	3,13	1,57	1,57	0,78	1,57	0,78	0,78	0,39
-25	0,91	3	1,52	1,52	0,76	1,52	0,76	0,76	0,38
-30	0,87	2,9	1,45	1,45	0,72	1,45	0,72	0,72	0,36

On voit que les résolutions présentées ici sont bien supérieures à celles permises par la seule prise en compte de la diffraction. C'est donc ce facteur qui limite la bande passante du système.

- Dispersion pour de faibles angles ( $\cos i' \approx 1$ ) avec les 2 réseaux pour les ordres 1 et 2 pour  $L_B = +200$  mm

$$\frac{d\lambda}{dx} \approx \frac{10^6}{k p L_B}$$

	p (traits/mm)	kpL <sub>B</sub>		Dispersion (nm.mm <sup>-1</sup> )	
		Ordre 1	Ordre 2	Ordre 1	Ordre 2
Réseau 1	300	60000	120000	16,7	8,33
Réseau 2	600	120000	240000	8,33	4,17

## ii. Résolution du doublet du Mercure

Quelles conditions théoriques permettent de résoudre le doublet du Mercure, entre  $\lambda_1 = 576,9 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 579 \text{ nm}$  (ordres d'observation, réseau à préférer, quelle(s) largeur(s) de fente) ?

Pour résoudre le doublet du Mercure séparé spectralement de 2,1 nm, il est donc préférable de travailler avec l'ordre 2 du réseau 600 traits/mm.

**Néanmoins, vues les remarques des parties précédentes, c'est même l'ordre 1 du réseau 1200 traits / mm qui sera le plus adapté.**

## iii. Spectre de la lampe à vapeur de Hg

Observer les franges visibles à l'écran : Compter le nombre de raies, les comparer entre elles (contraste et intensité) et regarder si l'on peut dissocier le doublet du mercure

L'analyse spectrale montre que la lampe de mercure possède 3 raies principales dont le doublet jaune : à 430 nm (bleu), 550 nm (vert), et 572/575 nm (jaune).

Elle possède également des raies moins intenses à 400 nm (violet), 490 nm (vert foncé), 610 nm (orange) et 690 nm

Les raies rouges, vert foncé et violette du mercure ne sont visibles qu'en regardant directement dans le réseau.

*Réseau 600 traits/mm*

Sur l'écran : 3 raies sont seulement visibles : jaune, verte et bleue mais peu contrastées. Le doublet jaune n'est pas dissocié.

En revanche, lorsque l'on passe à l'ordre 2, on distingue les deux raies du doublet, mais la luminosité est très faible.

*Réseau 1200 traits/mm :*

Les raies sont plus nettes et lumineuses qu'avec le réseau 600 traits/mm. Le doublet est tout juste séparé.

## iv. Influence expérimentale des différents paramètres

### **Influence du pas du réseau :**

Réseau 300 traits/mm – ordre 1 : ne permet pas de dissocier le doublet

Réseau 600 traits/mm – ordre 2 : il semble être tout juste visible, mais peu lumineux

Réseau 1200 traits / mm – ordre 1 : doublet visible sur la fente de sortie.

**Influence de l'ordre observé :** Ainsi, en utilisant le réseau 600 traits/mm à l'ordre 2, le doublet est détectable mais la luminosité est trop faible pour l'exploiter.

**Influence de l'ouverture de la fente d'entrée :** Plus son ouverture est petite, plus les raies sont fines et contrastées et donc plus la résolution est élevée. Par contre, une trop petite ouverture fait chuter la luminosité.

**Influence de l'ouverture de la fente de sortie :** Plus son ouverture est petite, plus la sélection d'une raie est précise car la bande sélectionnée est plus étroite. Donc plus la résolution est élevée. Là encore, une ouverture trop petite fait chuter la luminosité.

**Influence de l'inclinaison des miroirs (GeoGebra®) :** dès lors que les miroirs sont trop inclinés, nous sortons des conditions de Gauss. Les points de focalisation ne sont plus aussi bien définis et l'influence chromatique se fait d'autant plus sentir. Il est donc préférable de travailler avec de petits angles d'inclinaison.

Finalement, le montage avec la meilleure résolution est constitué :

- Du réseau 1200 traits/mm utilisé à l'ordre 1
- De fentes d'entrée et sortie ouvertes au minimum (compromis de luminosité)
- Un miroir de sortie de rayon de courbure de 200 mm environ (211 mm mesurés)

## VI. *Calibration en longueur d'onde*

Il s'agit de calibrer la rotation du réseau en fonction de la longueur d'onde sélectionnée en sortie du monochromateur. Pour cela, et pour plus de précisions, nous avons décidé de :

- Calibrer le monochromateur à l'aide des nombreuses raies visibles du Néon dans le rouge
- Retrouver ensuite les valeurs des raies du Mercure qui sont tabulées

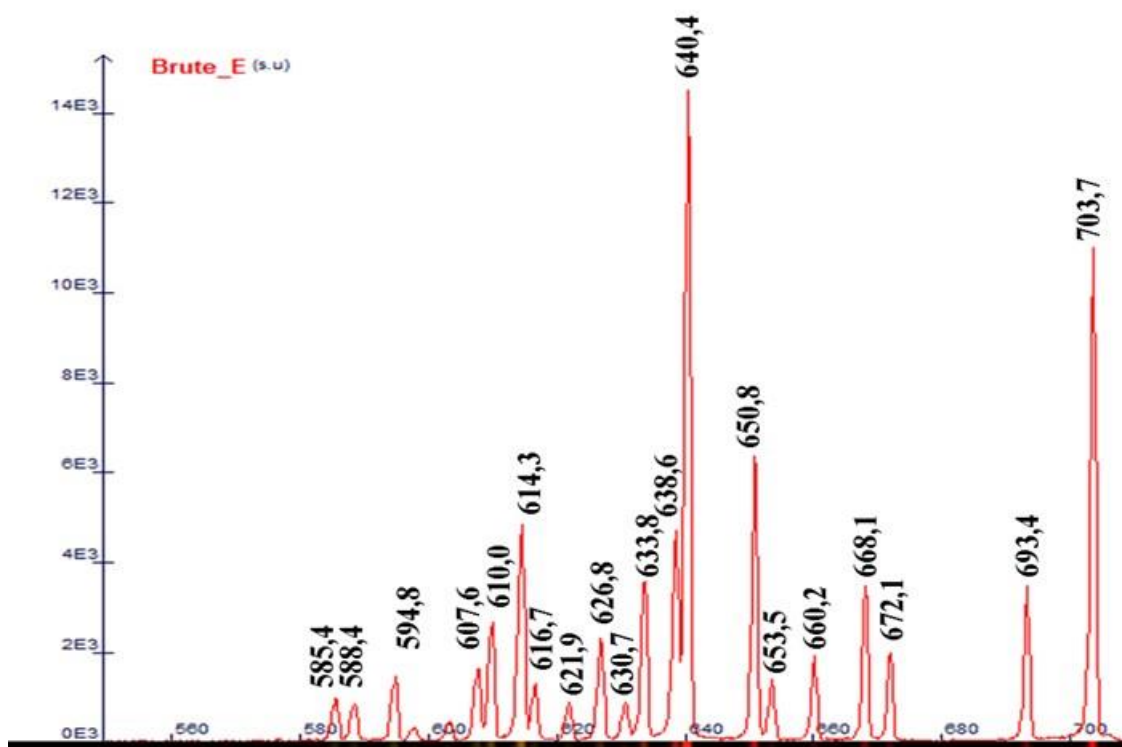
### 1) Vérifier avant de commencer

- Le monochromateur est pré-aligné avec la lampe à vapeur de Mercure avec le réseau 1200 traits/mm
- Une lampe à vapeur de Néon est disponible

### 2) Mise en œuvre

1 – **Sans dérégler la manipe :** remplacer l'ampoule de Mercure par une ampoule de Néon (attention le carter peut être chaud).

2 – Identifier les différentes raies visibles du Néon : jaunes et rouges.



*Raies du Néon préalablement identifiées.*



3 – Etalonner le monochromateur : tourner le réseau à l'aide du vernier de la plateforme de rotation :

- En ne touchant qu'à la rotation du réseau, faire passer une première raie jaune par la fente de sortie et relever l'angle indiqué par la plateforme de rotation
- Répéter l'opération sur toutes les raies précédemment identifiées.

Attention : pour que l'étalonnage soit correct il faut que toutes les raies soient bien identifiées. Il est alors possible d'utiliser un spectrophotomètre.

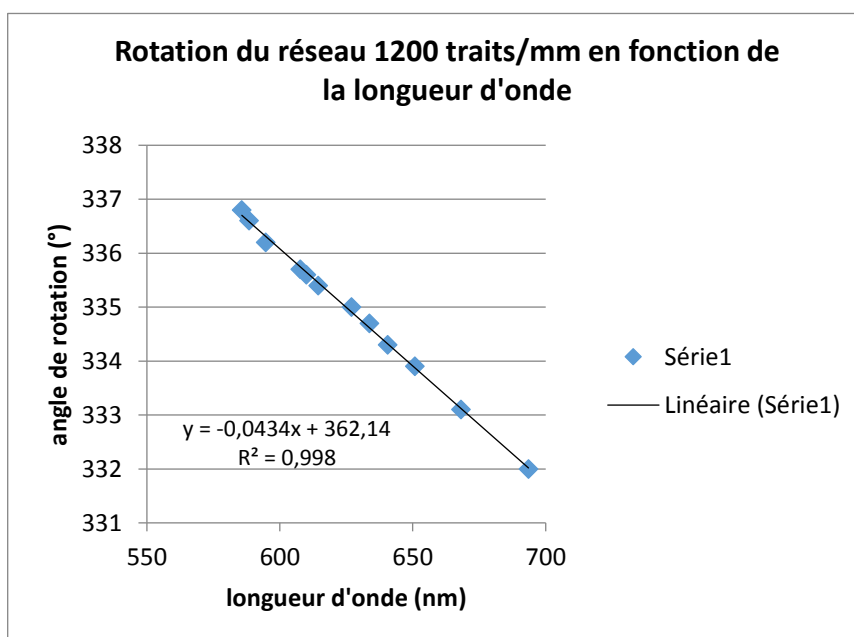
4 – Une fois la courbe réalisée, changer l'ampoule du Néon par celle du Mercure. Repérer les angles indiqués pour chacune des raies visibles (indigo, verte et doublet jaune).

### 3) Résultats

i. Régression linéaire des valeurs rotation ( $^{\circ}$ ) =  $f(\lambda)$

A partir des valeurs expérimentales relevées, tracer la courbe donnant l'angle de rotation en fonction de la longueur d'onde. L'allure étant linéaire, déduisez-en l'équation de la courbe.

lambda (nm)	rot ( $^{\circ}$ )
585,4	336,8
588,4	336,6
594,8	336,2
607,6	335,7
610	335,6
614,3	335,4
626,8	335
633,8	334,7
640,4	334,3
650,8	333,9
668,1	333,1
693,4	332



**Equation de la courbe :**

$$rot^{\circ} = -0,0434 \lambda + 362,14$$

$$\lambda = \frac{rot^{\circ} - 362,14}{-0,0434} \text{ (nm)}$$

## ii. Identification des raies du Mercure

Voici les valeurs relevées par la plateforme de rotation lorsqu'on isole chaque raie du mercure en sortie du monochromateur.

<b>Raie</b>	<b>Angle mesuré</b>	<b>Angle retenu</b>
Doublet jaune n°1	336°54'	336,9°
Doublet jaune n°2	337°00'	337,0°
Raie verte	338°24'	338,4°
Raie Indigo	343°00'	343,0°

D'après l'équation précédente nous obtenons des longueurs d'onde mesurées finalement assez proches de la réalité. L'incertitude est plus grande pour la raie bleue qui est aussi plus difficile à visualiser, et donc à isoler de manière correcte en sortie du monochromateur.

<b>Raie</b>	<b>Jaune 1</b>	<b>Jaune 2</b>	<b>Verte</b>	<b>Indigo</b>
<b><math>\lambda</math> mesurée (nm)</b>	581,6	579,3	547,0	441,0
<b><math>\lambda</math> réelle (nm)</b>	579,1	577,0	546,1	435,8
<b>Différence (nm)</b>	2,5	2,3	0,9	5,2

## VII. *Utilisation du logiciel GeoGebra®*

---

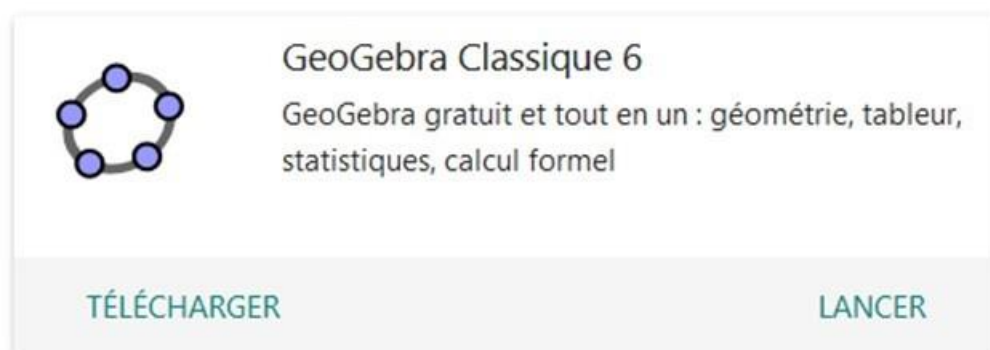
Cette simulation permet de voir comment les rayons lumineux se propagent au sein du monochromateur mais aussi comment la position et les caractéristiques de certains éléments (miroir, réseau) influencent cette propagation.

Cette simulation permet aussi de mettre en évidence comment les défauts angulaires sortent le système optique rapidement des conditions de l'optique paraxiale et des conditions de Gauss.

### *1) Installation du logiciel*

1 - Pour utiliser l'utilitaire « monochromateur.ggb », il faut au préalable installer une distribution GeoGebra® (disponible gratuitement) :

- <https://www.geogebra.org/download>
- Cliquer sur « télécharger » GeoGebra® Classique 6
- Installer GeoGebra® sur l'ordinateur

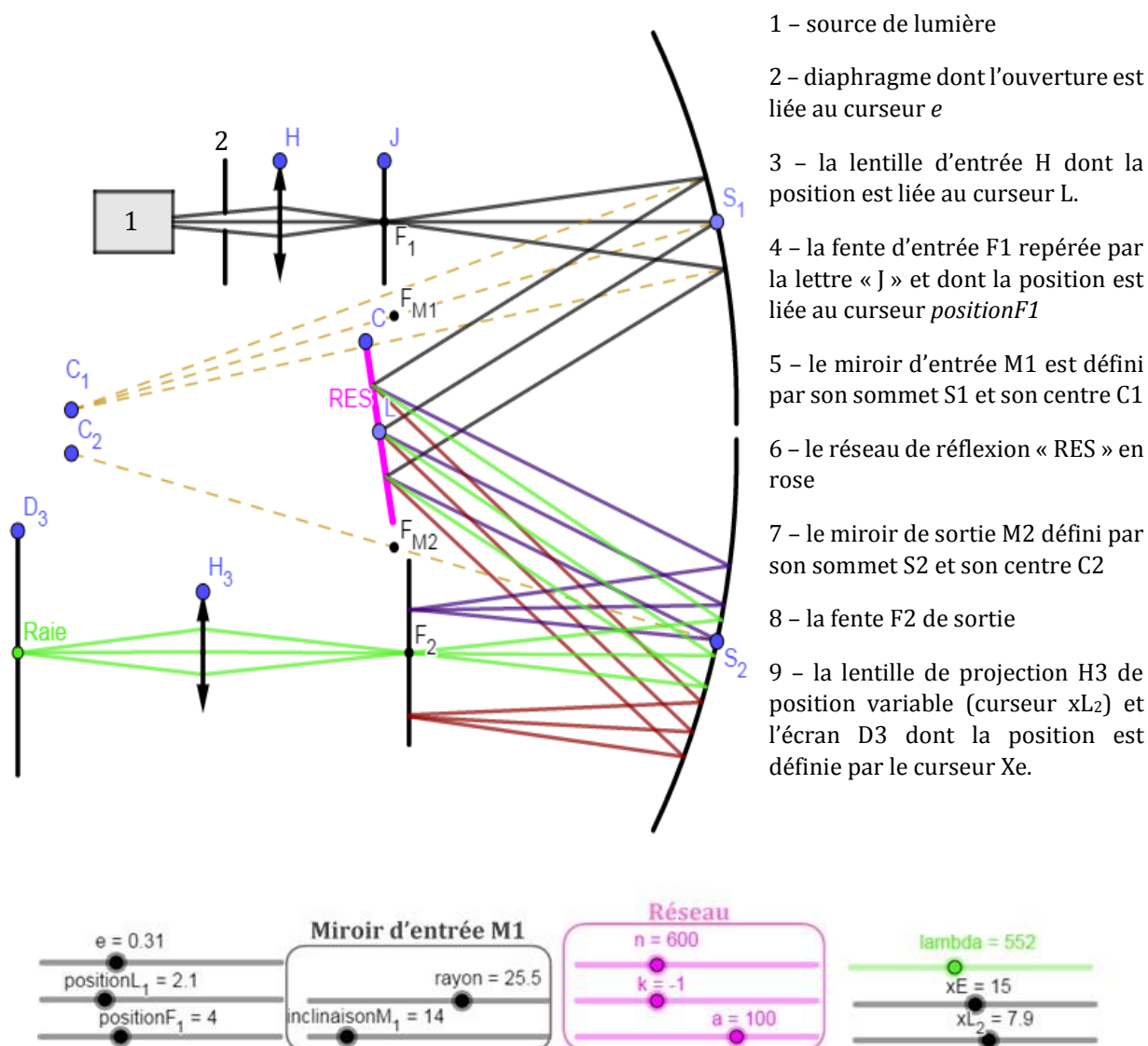


2 – Pour obtenir l'utilitaire « monochromateur », télécharger le logiciel sur installweb à l'aide de la clé logicielle que vous aurez reçue dans le colis.

3 – Pour lancer l'utilitaire monochromateur.ggb, double cliquez sur le fichier.

# 1) Vue générale

La simulation est composée du système « monochromateur » avec ses différents éléments et de curseurs modifiables par l'utilisateur pour jouer sur différents paramètres.



## Précisions sur le tracé des rayons :

- Les traits en pointillés représentent les rayons de courbure des miroirs.
- Les rayons lumineux sont représentés en gris avant d'atteindre le réseau, puis en couleurs pour représenter l'effet de la diffraction. Trois longueurs d'ondes sont représentées :
  - Les deux aux extrémités (en violet et rouge) définissent les bornes du spectre visible et valent 400 et 750 nm.
  - La troisième est une longueur d'onde intermédiaire, et pourra être sélectionnée par l'utilisateur.

- La couleur du rayon intermédiaire n'est pas directement celle de la réalité (ex : pour 680 nm, le rayon a plutôt une couleur orange que rouge.)
- Les rayons réfléchis par le réseau ont été définis suivant la loi fondamentale des réseaux en réflexion, avec  $\lambda = 400$  nm pour le faisceau en bleu et  $\lambda = 750$  nm pour celui en rouge.
- Les rayons réfléchis par les miroirs sont les symétriques des rayons incidents par rapport aux rayons de courbure correspondants (segments en pointillés).
- Quels que soient les paramètres, les deux miroirs demeurent symétriques par rapport à l'axe horizontal passant par le milieu L du réseau.
- Enfin, la distance focale des lentilles est inconnue et varie en fonction des paramètres pour que le faisceau converge toujours au bon endroit.

#### Précautions à l'ouverture du fichier :

Lorsque vous ouvrez la simulation, vous devez remarquer que le faisceau lumineux semble s'arrêter à la première lentille et l'ensemble fente de sortie/écran n'est pas visible. Ceci est un bug récurrent. Pour les faire réapparaître, :

- Vous devez amener le curseur « e » à 0,02
- Puis lentement le curseur « inclinaison  $M_1$  » à 90 (maximum)
- Remettez-les ensuite à leurs valeurs initiales.

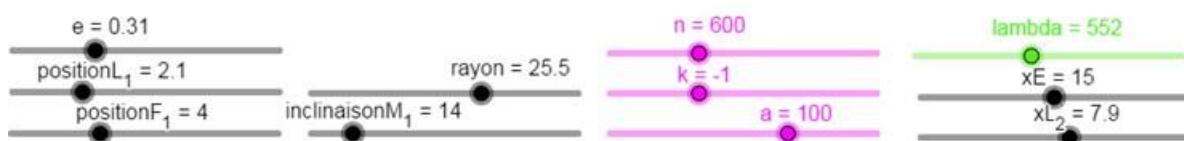
Il se peut que ces éléments disparaissent à nouveau lorsque vous modifierez des paramètres. Recommencez cette manipulation dans ce cas.

## 2) Détail des curseurs

Vous pouvez modifier des paramètres grâce aux curseurs situés en bas de la page. Pour se faire, cliquez simplement sur l'un des boutons et déplacez-le à gauche ou à droite.

Les curseurs noirs n'ont pas d'unité spécifique : le nombre correspondant est à titre indicatif.

Les **curseurs roses** et le **curseur lambda** (vert ici) ont des unités appropriées aux paramètres physiques.





i. Ouverture « e » du diaphragme

Le curseur « **e** » modifie l'ouverture du diaphragme, et donc la largeur du faisceau incident.  
 $e \in [0 ; 1]$ , en unités arbitraires.

ii. Position de la lentille  $L_1$

Le curseur « **position  $L_1$**  » fait varier la position de la lentille 1 sur l'axe optique.  
*Déplacer ce composant repositionne également tous les composants situés après celui-ci.*

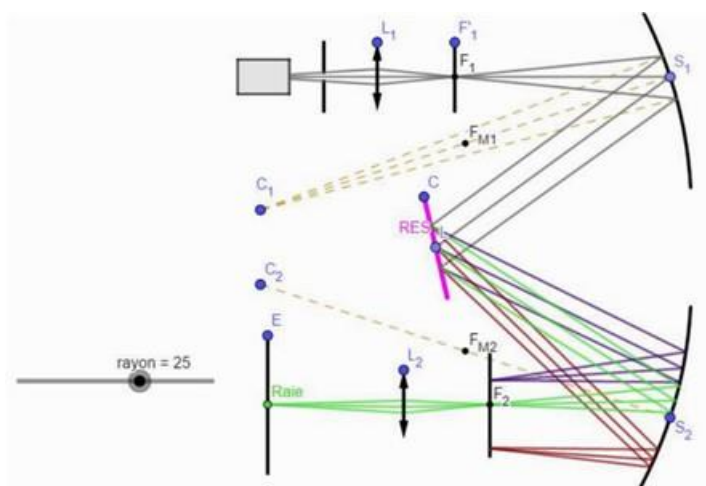
iii. Position de la fente d'entrée  $F_1$

De la même façon, le curseur « **position  $F_1$**  » fait varier la position de la fente d'entrée sur l'axe optique, indépendamment de la lentille.  
*En pratique, il faudra fixer  $L_1$  et positionner  $F_1$  à la distance focale de  $L_1$ .*

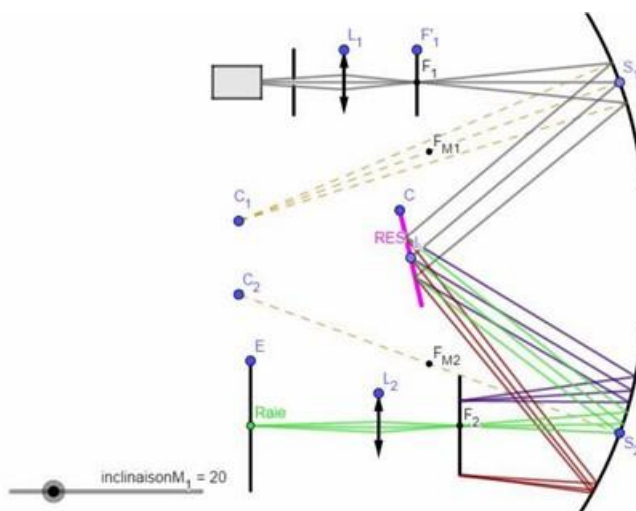
iv. Miroir d'entrée  $M_1$

Les curseurs « **rayon** » et « **inclinaison  $M_1$**  » font respectivement varier le rayon de courbure et l'inclinaison du miroir  $M_1$ .

- Le curseur **rayon** modifie le rayon de courbure du miroir, qui est automatiquement repositionné pour que la fente d'entrée soit constamment à sa distance focale.



- Le curseur **inclinaison  $M_1$**  fait varier l'inclinaison des miroirs par rapport à l'axe optique :



### NB : Miroir de sortie M2

Le miroir M<sub>2</sub> a été conçu pour être symétrique à M<sub>1</sub> par rapport à l'axe de la lampe au point L si bien que les rayons issus du réseau peuvent tomber en dehors du miroir.

Dans ce cas les rayons ne sont pas représentés. Jouez sur l'inclinaison du réseau pour l'observer ou pour le corriger.

### v. Réseau de traits

Le réseau se positionne toujours au milieu du faisceau incident.

La direction des rayons émergents a été déterminée avec la relation fondamentale des réseaux en réflexion :

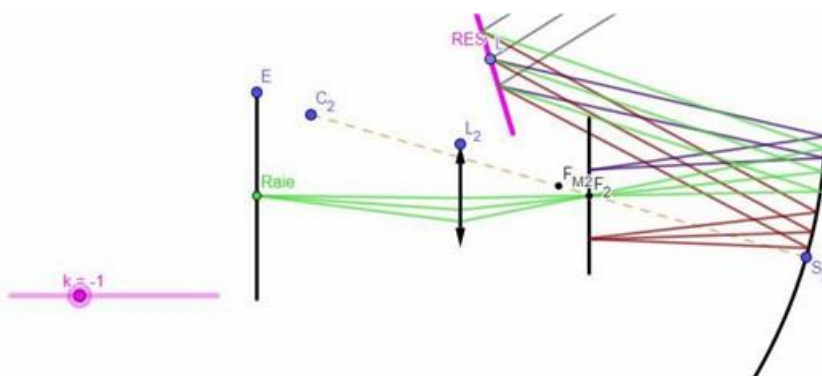
$$i' = \arcsin(kn\lambda - \sin i)$$

Avec :  $i'$  angle diffracté,  $i$  angle incident, à l'ordre  $k$ , à la longueur d'onde  $\lambda$

> Le curseur «  $n$  » fait varier le nombre de traits par millimètre du réseau. Ce paramètre agit sur la diffraction.

> Le curseur «  $k$  » représente l'ordre de diffraction du réseau qui nous intéresse et fait apparaître les rayons émergents correspondant à cet ordre.

Par exemple : si  $k = -1$ , seuls les rayons émergents de l'ordre -1 sont représentés.



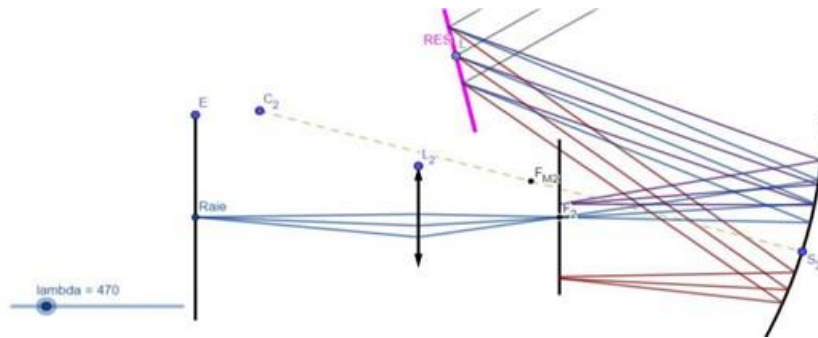
> le curseur «  $a$  » modifie l'angle de rotation du réseau. Il s'exprime en degrés. Un angle de 90° correspond à un réseau vertical

De plus, vous pouvez aussi modifier la distance (miroir-réseau) en agissant sur le point L.

### vi. Longueur d'onde

Le curseur «  $\lambda$  » modifie la longueur d'onde de la raie sélectionnée.

Il s'exprime en nanomètres et varie de 400 à 750 nm. La fente de sortie vient se positionner au point de focalisation de cette longueur d'onde.



#### vii. Position de la lentille de focalisation et de l'écran

Enfin, les curseurs «  $x_E$  » et «  $x_{L2}$  » varient respectivement les positions de l'écran et de la lentille  $L_2$  par rapport à l'axe de la fente de sortie.

De même, la distance focale de  $L_2$  est adaptée pour focaliser le faisceau sur l'écran. Ces deux paramètres permettent uniquement de représenter la focalisation en sortie que nous réalisons sur la manipe réelle.

## VIII. Ressources pédagogiques

Nous vous proposons de retrouver dans cette dernière partie différents éléments théoriques sur le sujet présenté.

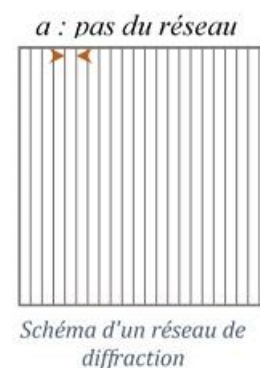
### 1) Dispersion à l'aide d'un réseau

Un réseau de diffraction est une structure périodique qui impose une variation d'amplitude ou de phase à une onde plane incidente. Ils sont généralement constitués d'un grand nombre de traits parallèles et équidistants. La qualité d'un réseau est directement liée à la précision du tracé de la structure.

Dans son principe général de fonctionnement, un réseau diffracte l'onde incidente. Lorsqu'un réseau de diffraction est exposé à une lumière blanche, celle-ci est dispersée en ses différents éléments la constituant dans différentes directions. Cela revient à considérer un phénomène d'interférences à ondes multiples par chacun des motifs élémentaires du réseau.

Un réseau de diffraction est ainsi modélisé par  $N$  traits (fentes si c'est un réseau en transmission ou traits réfléchissants pour un réseau en réflexion) très fins, parallèles et équidistants appelés *traits* du réseau.

- La distance entre 2 traits consécutifs est appelée pas  $a$  du réseau ou période spatiale du réseau.
- L'inverse du pas,  $p = 1/a$ , représente le nombre de traits par unité de longueur.



### i. Relation des réseaux en réflexion

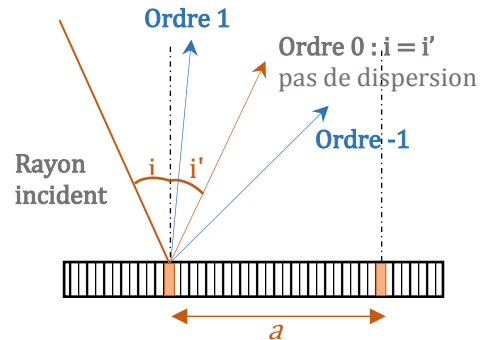
$$\sin i' + \sin i = kp\lambda \quad \text{pour } n = 1 \quad (1)$$

- Où
- $i'$  correspond à l'angle de réflexion pour une longueur d'onde  $\lambda$  considérée,
  - $i$  représente l'angle d'incidence de la lumière sur le réseau,
  - $p$  est la densité de traits par unité de longueur,
  - $k$  représente l'ordre de diffraction considéré.

Il faut noter qu'il existe un nombre fini d'ordres de diffractions qui dépend notamment du pas  $a$  du réseau considéré.

Excepté dans l'ordre  $k = 0$ , les directions  $i'$  dépendent de la longueur d'onde. Le réseau est donc bien dispersif sauf pour la lumière directement réfléchie ( $k=0$ ). Pour cet ordre, le réseau se comporte comme un miroir puisqu'on retrouve les lois de l'optique géométrique de Descartes ( $i' = i$ ).

De plus, chaque longueur d'onde est diffractée dans plusieurs directions.



Réflexion d'un rayon par le réseau : seuls 3 ordres sont ici représentés pour une longueur d'onde donnée (bleue).

### ii. Dispersion angulaire

On peut connaître la dispersion angulaire  $di'/d\lambda$  de la figure de dispersion à un angle d'incidence  $i$  fixé et pour un ordre donné en différenciant la relation (1) :

$$\frac{di'}{d\lambda} \text{ (rad.nm}^{-1}\text{)} = \frac{kp}{\cos i'} \quad (2)$$

Ainsi, le pouvoir de dispersion augmente lorsque l'ordre augmente et se trouve d'autant plus grand que le pas  $a$  du réseau est faible.

### iii. Pouvoir de résolution

Cette notion, dérivée du critère de Rayleigh, représente la capacité du réseau à disperser de manière distincte deux longueurs d'ondes très proches  $\lambda$  et  $\lambda + \delta\lambda$ . Le pouvoir de résolution  $R$  d'un réseau est alors :

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda_{\min}} = kN \quad (3)$$

- Où :
- $\delta\lambda_{\min}$  correspond au plus petit écart de longueur d'onde (à partir d'une longueur d'onde donnée) pouvant être mis en évidence
  - $k$  représente l'ordre de diffraction considéré
  - $N = l \times p$  le nombre de traits  $p$ /unité de longueur du réseau éclairés sur une longueur  $l$ .

## 2) Remarques sur le monochromateur

D'une manière générale, les monochromateurs forment une image de la fente d'entrée sur le plan de sortie des différentes longueurs d'onde présentes dans la source. Nous présentons ici quelques généralités sur des grandeurs caractéristiques d'un monochromateur dans la configuration de Czerny-Turner.

#### i. Dispersion du monochromateur

La dispersion considérée ici est une dispersion linéaire exprimant la largeur en longueur d'onde disponible en sortie par rapport à l'unité d'ouverture des fentes (exprimée en nm.mm<sup>-1</sup>) :

$$\frac{d\lambda}{dx} \text{ (nm.mm}^{-1}\text{)} = \frac{\cos i'}{k p L_B} \times 10^{-6} \quad (4)$$

On remarque que cette dispersion dépend du cosinus de l'angle de réflexion  $i'$  de l'ordre  $k$  considéré, de l'inverse du pas caractéristique du réseau utilisé  $p$  et de la longueur de sortie entre le miroir de focalisation et la fente de sortie,  $L_B$ .

Dans notre montage,  $L_B = f_z$ , la distance focale du miroir  $M_2$ .

Ainsi, la dispersion pour une longueur  $L_B$  fixée et pour une certaine longueur d'onde  $\lambda$  implique que  $k p = \text{constante}$ . Cela signifie que si le nombre de traits/mm  $p$  est divisé par deux, alors le nombre d'ordres  $k$  est doublé.

#### ii. Notions de résolution et de bande passante

On peut penser que lorsqu'une source de lumière monochromatique  $\lambda$  est utilisée pour éclairer le système, celui-ci devrait présenter une image en sortie absolument identique au signal d'entrée ; soit une ligne fine à  $\lambda$ . En réalité, les instruments ne sont jamais parfaits et le signal issu de ce système possède une certaine largeur correspondant au minimum à la réponse de l'appareil.

Différents paramètres vont ainsi influencer la forme de cette réponse d'appareil : la taille des fentes d'entrée et sortie, la diffraction, les aberrations chromatiques et sphériques, l'alignement optique et la qualité des différents éléments constituant le système.

La bande passante est définie comme la largeur à mi-hauteur du signal (FWHM : Full Width at Half-Maximum) mesuré suite à un éclairage purement monochromatique. On considère que ce signal élargi enregistré est la convolution du spectre réel de la source par la réponse instrumentale.

##### ▪ Limitation par l'ouverture des fentes

On comprend assez intuitivement que la résolution du système dépend de l'ouverture de la fente en sortie  $F_2$  puisque si l'on l'agrandit, on augmente aussi la plage de longueur d'onde sélectionnée ; ce qui a pour effet de diminuer la résolution.

De manière moins directe, la largeur  $W$  de la fente d'entrée joue également un rôle dans la résolution obtenue. En effet, si son ouverture est augmentée, la quantité de lumière au niveau de la fente de sortie sera plus importante. Ceci augmente le rapport signal sur bruit, mais augmente aussi la quantité de lumière diffractée par le réseau et donc diminue la résolution. En effet, davantage de longueurs d'onde voisines de celle choisie seront aussi présentes à la sortie du monochromateur.

D'une manière générale, pour que deux raies spectrales soient résolues en sortie du monochromateur, il faut que l'écart en position  $dx$  entre ces deux radiations soit supérieur à la taille de l'image de la fente source  $W'$ , c'est-à-dire que  $dx > W'$ .

- a). Au travers de ce système, la largeur  $W$  de la fente d'entrée au niveau de la largeur de la fente de sortie devient  $W'$  :

$$W' = W \frac{\cos i \times L_B}{\cos i' \times L_A} \quad (5)$$

Où  $i$  et  $i'$  sont les angles d'incidence et de diffraction,  $L_A$  et  $L_B$  la longueur des bras d'entrée et de sortie respectivement. Dans notre configuration,  $L_A = f_1$  et  $L_B = f_2$ , les distances focales des miroirs concaves  $M_1$  et  $M_2$ . On voit que ce grandissement horizontal dépend de la longueur d'onde via les angles d'incidence et de diffraction  $i$  et  $i'$ .

- b). D'après la relation (4) de la dispersion linéaire permise par le système,

$$dx = \frac{k p L_B}{\cos i'} \times 10^6 d\lambda$$

- c). On peut alors exprimer l'inégalité  $dx > W'$  par :

$$\frac{k p L_B}{\cos i'} \times 10^6 d\lambda > W \frac{\cos i \times L_B}{\cos i' \times L_A}$$

Soit : 
$$d\lambda > W \frac{\cos i}{k p L_A} \times 10^{-6} \quad (6)$$

Dans notre montage,  $L_A = f_1$ , la distance focale du miroir  $M_1$ .

Cette expression permet de mettre en évidence l'influence de la largeur de la fente d'entrée sur la résolution mais aussi de la distance focale du collimateur utilisé ( $L_A$ ). En effet, plus grande est la distance focale, meilleure sera la résolution. En revanche, plus cette distance focale est grande, moins le miroir collimateur recueille d'intensité lumineuse après la fente d'entrée, et donc plus l'intensité en sortie est faible.

La résolution du système liée à l'ouverture des fentes montre donc qu'il faut faire un compromis entre l'intensité du faisceau (fentes très ouvertes, longueur focale petite) et largeur de bande faible (fentes très peu ouvertes et grande distance focale).

#### ▪ Limitation par la diffraction

Néanmoins, même en rendant les ouvertures des fentes les plus petites possibles, la résolution du système restera toujours limitée par la diffraction et les différentes aberrations pouvant avoir lieu. Pour que deux longueurs d'onde séparées de  $d\lambda$  soient résolues, il faut que cette distance soit supérieure à la demi-largeur de la tâche de diffraction :

$$d\lambda_{diff} > \frac{\lambda}{kN}$$

#### ▪ Pouvoir de résolution du système

Pour savoir si le système est plutôt limité par les phénomènes de diffraction,  $R_{diff}$ , ou par la largeur d'ouverture des fentes  $R_{fentes}$ , il faut comparer leurs valeurs respectives :

$$R_{diff} = kN \quad \text{et} \quad R_{fentes} = \frac{W \cos i}{p k L_A}$$

Ainsi, la diffraction limitera le système si  $W < \frac{\lambda p L_A}{N}$  en prenant  $\cos i = 1$ .

Remarque : si la résolution est essentiellement limitée par la largeur des fentes, on peut alors approximer la bande passante  $BP$  par la relation (6) :

$$BP = \frac{W \cos i}{k p L_A}$$

### 3) Longueurs d'onde caractéristiques du Mercure \*

Longueurs d'onde	Couleur associée à la raie spectrale
576.960	Doublet jaune
579.066	Doublet jaune
546.074	Vert
435.833	Indigo
404.656	Violet

\*Handbook of Chemistry and Physics – 76th edition – CRC Press, mesures prises dans l'air



## Des services au quotidien

### Obtenir des conseils, un devis, une demande de démo



#### > Service technico-commercial

Pour la Métropole

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

E-mail : [optique@ovio-instruments.com](mailto:optique@ovio-instruments.com)

Web : [www.ovio-optics.com](http://www.ovio-optics.com)

Pour l'International

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

E-mail : [export@ovio-instruments.com](mailto:export@ovio-instruments.com)

### Commander, suivre une commande

#### > Administration des ventes

Passer une commande

Fax : +33 (0)1 30 44 25 40

E-mail : [optique@ovio-instruments.com](mailto:optique@ovio-instruments.com)

Courrier : OVIO Instruments - Service Clients

468, rue Jacques-Monod

CS 21900, 27019 Evreux CEDEX France

Suivre une commande

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

E-mail : [optique@ovio-instruments.com](mailto:optique@ovio-instruments.com)



### Obtenir des conseils, un devis, une demande de démo



#### > Support technique, SAV

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

E-mail : [SAV@ovio-instruments.com](mailto:SAV@ovio-instruments.com)

Web : [www.ovio-optics.com](http://www.ovio-optics.com)

Pour l'International

Tél : +33 (0)1 71 49 10 70

*Attention : pour tout retour de matériel en SAV, merci de nous appeler au préalable.*