

Exemples de dispositifs interférentiels par division du front d'onde

Extrait du programme de TSI2

Dans la partie 3.2 « Superposition d'ondes lumineuses », la formule de Fresnel, admise en classe de première année, est démontrée. L'étude de la superposition de N ondes cohérentes ne doit pas donner lieu à des développements calculatoires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
3.2. Superposition d'ondes lumineuses	
Superposition de N ondes cohérentes, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique. Réseau par transmission.	Établir l'expression de la différence de marche entre deux motifs consécutifs. Établir la relation fondamentale des réseaux liant la condition d'interférences constructives à la valeur de la différence de marche entre deux motifs consécutifs. Mettre en œuvre un spectroscopie à réseau.

Dans la partie 3.3 « Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young », les trous d'Young permettent de confronter théorie et expérience. Les fentes d'Young peuvent être abordées mais de manière exclusivement expérimentale. Aucune connaissance sur un autre diviseur du front d'onde n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
3.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young	
Trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source à distance finie et observation à grande distance finie. Ordre d'interférences.	Exprimer et utiliser l'ordre d'interférences. Mettre en œuvre une expérience d'interférences : trous d'Young ou fentes d'Young.
Variations de l'ordre d'interférences avec la position du point d'observation ; franges d'interférences. Interfrange.	Justifier la forme des franges observées.

Formation expérimentale

Nature et méthodes	Capacités exigibles
3. Optique	
Analyse d'une lumière.	Mesurer une longueur d'onde à l'aide d'un goniomètre équipé d'un réseau.
Analyse d'une figure d'interférence.	Mettre en œuvre un photodétecteur en sortie d'un interféromètre.

Sommaire

EXTRAIT DU PROGRAMME DE TSI2	1
FORMATION EXPERIMENTALE	1
SOMMAIRE	2
1 EXEMPLE DE DISPOSITIF INTERFERENTIEL PAR DIVISION DU FRONT D'ONDE : TROUS D'YOUNG	3
1.1 DESCRIPTION DU DISPOSITIF.....	3
1.2 SOURCE A DISTANCE FINIE ET OBSERVATION A GRANDE DISTANCE FINIE.....	3
1.3 TP1.....	4
2 EXEMPLE DE DISPOSITIF POUR LA SUPERPOSITION DE N ONDES COHERENTES : RESEAU PAR TRANSMISSION	6
2.1 RESEAU PAR TRANSMISSION.....	6
2.2 FORMULE DES RESEAUX PAR TRANSMISSION.....	6
2.3 DISPERSION D'UN RESEAU	7
2.4 TP2.....	8
3 QUESTIONS DE COURS	12
4 EXERCICES TYPE ORAL	13
4.1 SOURCE A DISTANCE FINIE ET OBSERVATION A L'INFINI	13
4.2 DEPLACEMENT DE LA SOURCE ET SOURCE CONSTITUEE DE DEUX POINTS	13
4.3 RESEAU PAR TRANSMISSION.....	14
4.4 RECOUVREMENT DES ORDRES	14
5 DM21 POUR LE 01/04/2023	15
5.1 SPECTROPHOTOMETRIE UV-VISIBLE.....	15

1 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Afin de réaliser des interférences lumineuses, il faut faire appel à un dispositif qui permette de créer deux ou plusieurs ondes cohérentes entre elles : l'interféromètre. Dans le cas d'un dispositif à division du front d'onde, les deux ondes qui interfèrent sont issues d'une division géométrique de l'onde incidente issue de la source.

Exemple : les fentes d'Young.

1.1 Description du dispositif

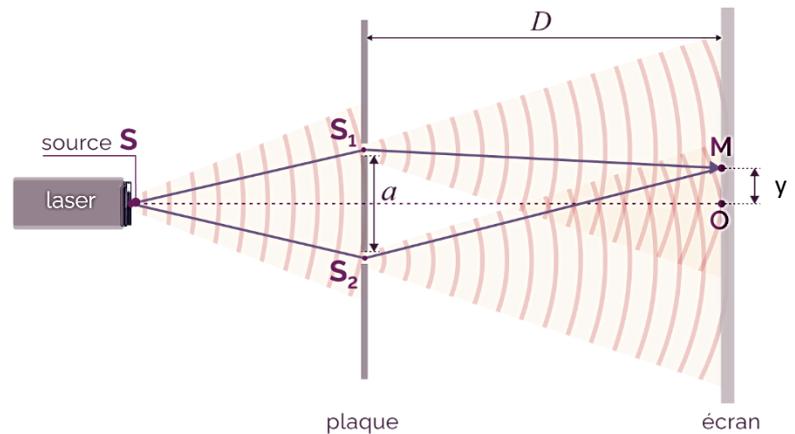
Deux trous S_1 et S_2 identiques et de très petite dimension (rayon de l'ordre du dixième de millimètre, ou moins), sont percés dans un écran opaque et distants de a (de l'ordre de quelques millimètres).

Une source ponctuelle S monochromatique de longueur d'onde λ_0 est placée à la même distance de chacun des deux trous. Eclairés par S , ils se comportent donc comme deux sources secondaires cohérentes.

La lumière incidente est diffractée par chacun des deux trous et les ondes réémises se superposent dans toute une partie de l'espace.

L'observation se fait sur un écran parallèle à S_1S_2 placé à une distance D .

On suppose que le milieu est non dispersif.



- 1) Quel phénomène est à l'origine de la superposition des ondes réémises par chacune des sources secondaires S_1 et S_2 ? Où peut-on alors observer un phénomène d'interférence ?
- 2) La source étant centrée sur les trous, on peut supposer que l'intensité lumineuse réémise par chacune des sources secondaires S_1 et S_2 est la même. On la notera : I_0 . Comment peut-on écrire la formule de l'intensité lumineuse, $I_{tot}(M)$, en un point M de l'écran où les ondes se superposent ? On l'exprimera en fonction de I_0 et $\varphi(M)$, déphasage entre les deux ondes au point M .
- 3) Rappeler alors l'expression du déphasage $\varphi(M)$ en fonction de la différence de marche, $\delta(M)$.

1.2 Source à distance finie et observation à grande distance finie

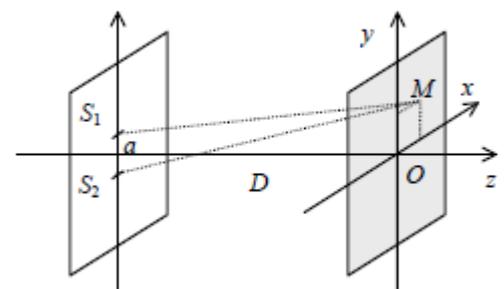
On se trouve dans un milieu d'indice n .

Soit a la distance séparant les deux trous, D la distance à l'écran et λ_0 la longueur d'onde de la source ponctuelle. On pose :

$$D \gg a, |x|, |y| \gg \lambda_0$$

- 4) En s'appuyant sur le schéma ci-contre, montrer que la différence de marche $\delta(M)$ entre les deux rayons arrivant au point M s'écrit sous la forme :

$$\delta(M) \approx n \frac{ay}{D}$$



- 5) Donner l'expression de l'ordre d'interférence $p(M)$ en fonction de $\delta(M)$, puis en fonction de n , a , y , D et λ_0 .
- 6) Réécrire alors l'expression de l'intensité lumineuse, $I_{tot}(M)$, au point M en fonction des données précédentes.
- 7) Justifier alors la forme des franges observées sur l'écran ?
- 8) A quel ordre correspond la frange centrale ? Trouver alors la position y_1 de la frange d'ordre 1.
- 9) On remarque que la répartition d'intensité lumineuse sur le plan d'observation est périodique. La période de la fonction est appelée l'interfrange et notée i . Donner son expression. Réécrire l'expression de $I_{tot}(M)$ en fonction de i .

1.3 TP1

1.3.1 Matériel à disposition

Par paillasse élève :

- Banc d'optique
- LASER He-Ne ($\lambda = 632 \text{ nm}$)
- Fentes d'Young alignement vertical (écartements : 200, 300, 500 μm , largeur 70 μm)
- Ecran
- Caméra CCD
- Ordinateur portable

Sur la paillasse prof :

- Lampe à vapeur de Sodium
- Lampe à filament
- Condenseur
- Fente rectangulaire ajustable
- Oculaire
- Caméra CCD
- Fente d'Young (200 x 70 μm)
- Lentilles convergentes

1.3.2 Interférences par des fentes d'Young

1.3.3 Interférences par des fentes d'Young : source monochromatique

Votre compte-rendu doit s'appuyer sur cette partie (Q1 à 5).

A l'aide du LASER mis à votre disposition, observer les interférences lumineuses réalisées à l'aide des fentes d'Young.

- 1) Faire un schéma du dispositif.
- 2) Décrire précisément le phénomène observé.
- 3) Dans le cours, les interférences ne sont pas réalisées grâce à des fentes mais des trous. Voyez-vous des différences notables entre les 2 dispositifs ?

Une caméra CCD est mise à votre disposition (notice en partie 3.3.3).

- 4) Par différentes mesures, montrer de quelles grandeurs peut dépendre l'interfrange.
- 5) Montrer, s'il y a lieu, la proportionnalité entre l'interfrange et ces grandeurs.

1.3.4 Interférences par des fentes d'Young : sources polychromatiques

1.3.4.1 Source constituée d'un doublet

Sur la paillasse prof, on remplace le LASER par une lampe à vapeur de sodium.

- 6) Représenter et expliquer le schéma du montage.
- 7) Quel impact cela a-t-il sur la figure d'interférences ?

1.3.4.2 Source en lumière blanche

On remplace la lampe à vapeur de sodium par une lumière blanche.

- 8) Quel impact cela a-t-il sur la figure d'interférences ?

1.3.4.3 Source étendue spatialement

La fente source est élargie.

- 9) Quel impact cela a-t-il sur la figure d'interférences ?

1.3.5 Notice d'utilisation : Caméra CCD et logiciel Caliens

1.3.5.1 Présentation

La camera Caliens est un capteur CCD (2048 pixels, 14 μm de large, zone sensible de 30 mm environ) de temps d'intégration réglable permettant de pouvoir réaliser des mesures de distances très précisément. Elle est fournie avec un câble USB, le logiciel Caliens et un jeu de filtres.



1.3.5.2 Installation de la caméra sur le banc

Pour faire des mesures les plus précises possibles, essayer de respecter les consignes suivantes.

◆ Collinéarité Image - détecteur



Axe de la figure d'interférences
Axe d'analyse de la barrette CCD

Pour restaurer la collinéarité, incliner les fentes de façon à obtenir les harmoniques symétriques et les plus visibles possible.

◆ Alignement Image – détecteur



Axe de la figure d'interférences
Axe d'analyse de la barrette CCD

Pour restaurer l'alignement, traduire la tête optique verticalement jusqu'à obtenir une réponse maximum. Un nouvel ajustement au niveau du polariseur est souvent nécessaire.

La figure d'interférences n'est pas à la bonne hauteur par rapport à la ligne photosensible. La figure est instable et présente de fortes irrégularités

1.3.5.3 Logiciel Caliens

Lorsque vous lancez le logiciel Caliens, la fenêtre suivante apparaît à l'écran.

Pour lancer une acquisition continue, appuyer sur



(utilise pour voir la figure d'interférences se déformer en direct).

Pour lancer une acquisition simple, appuyer sur  (utilise pour figer la figure d'interférences et faire des mesures précises).

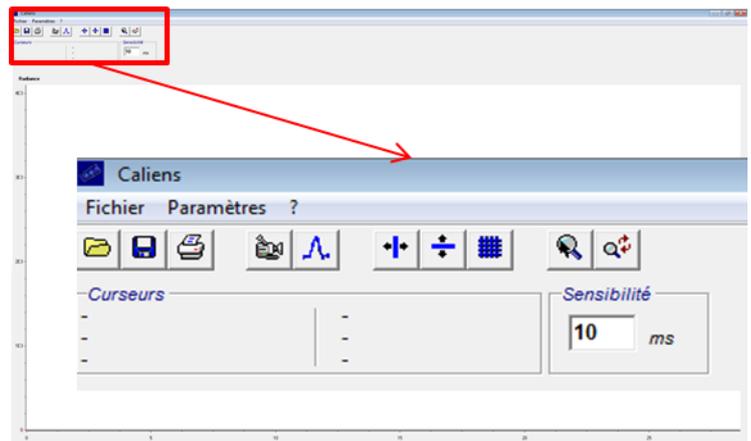
En fonction des filtres se trouvant sur la caméra, vous aurez besoin de changer la sensibilité du capteur. Pour cela, faites varier la sensibilité entre 2 et 30 ms (cela correspond au temps d'intégration du capteur).

Pour faire vos mesures, vous pouvez ensuite utiliser les fonctions suivantes :

- Curseurs et grille : 

- Zooms : 

Enfin, le logiciel propose un simulateur (Paramètres /Simulation) qui peut vous permettre de comparer vos résultats à la théorie.



2 Exemple de dispositif pour la superposition de N ondes cohérentes : réseau par transmission

2.1 Réseau par transmission

2.1.1 Définition

Un **réseau** est constitué par la répétition périodique d'un motif diffractant, comme par exemple une fente. La période spatiale est appelée **pas du réseau**.

2.1.2 Réseaux par transmission

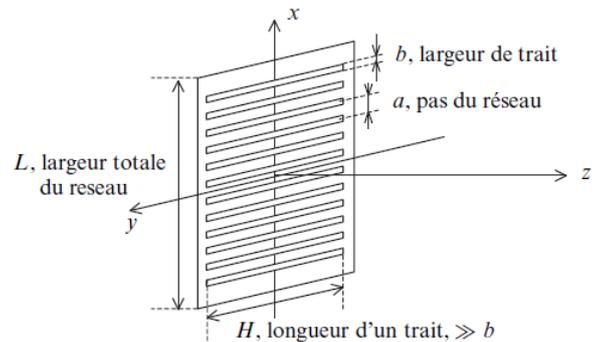
On observe la lumière transmise à travers le réseau.

Le réseau par transmission le plus simple est un plan opaque percé de N fentes fines et longues, appelées **traits du réseau**, parallèles entre elles et équidistantes de a , le pas du réseau.

Le pas du réseau est souvent donné en nombre de traits par millimètre :

$$n = 1/a$$

Ex : $n = 100 \text{ traits/mm}$; on a alors $a = 10 \mu\text{m}$



Remarque :

Il existe des réseaux par réflexion (traits tracés sur une plaque réfléchissante). Ex : CD, DVD, etc...

2.2 Formule des réseaux par transmission

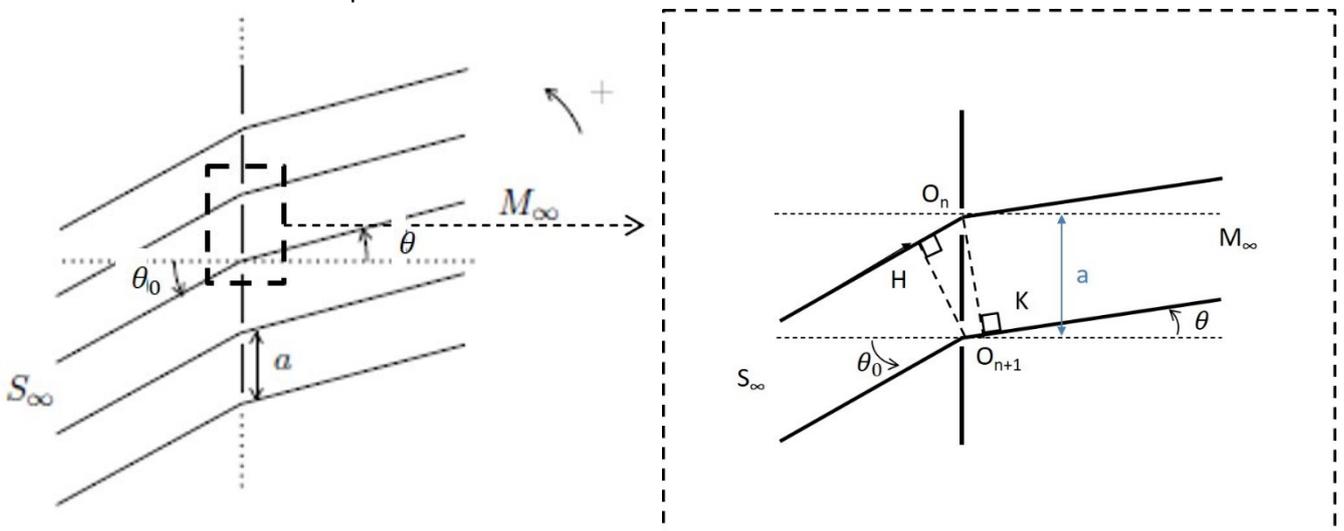
On suppose le réseau éclairé par une source monochromatique ponctuelle à l'infini, de longueur d'onde λ_0 . Les rayons qui éclairent le réseau sont issus d'une même source et sont donc cohérents entre eux. Chaque trait du réseau de largeur très fine va donc générer une figure de diffraction et la superposition de toutes ces figures de diffraction sera à l'origine d'un phénomène d'interférences.

Les N traits sont donc vus comme N sources ponctuelles lumineuses cohérentes entre elles notées O_1 à O_N qui émettent des ondes planes monochromatiques même amplitude, de même pulsation ω et dont les phases suivent une progression arithmétique.

On retrouve alors des interférences constructives en un point M quand toutes les ondes sont en phase en M . On réduit le calcul à deux traits consécutifs, il faut donc :

$$\varphi(M) = \varphi_{n+1}(M) - \varphi_n(M) = 2p\pi \quad p \in \mathbb{Z}$$

On note θ_0 l'angle d'incidence qui repère la direction de la source. On observe à l'infini, on repère par θ la direction du point d'observation M . On se place dans un milieu d'indice n .



- 1) Calculer la différence de marche, $\delta(M)$, entre deux rayons successifs.
- 2) Exprimer alors l'ordre d'interférences, $p(M)$, entre deux rayons successifs. A quelle condition a-t-on des interférences constructives ?
- 3) On note θ_p la valeur particulière de θ qui donne la direction d'une frange brillante. Réécrire la formule précédente en fonction de θ_p .

Formule des réseaux :

Valeur de l'angle d'émergence, θ_p , du réseau pour une frange brillante en fonction de l'angle d'incidence, θ_0 , et de l'ordre d'interférence p entier :

$$na (\sin(\theta_p) - \sin(\theta_0)) = p\lambda_0 \quad p \in \mathbb{Z}$$

2.3 Dispersion d'un réseau

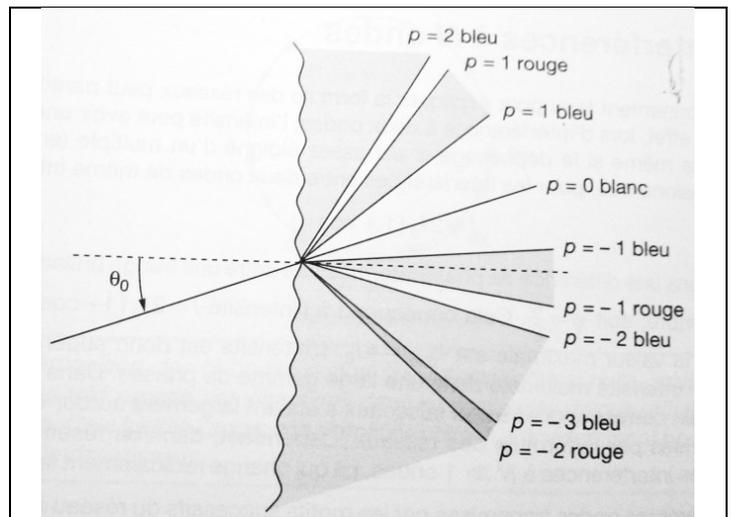
2.3.1 Ordre 0

- 4) Quelle est la direction (angle $\theta_{p=0}$) correspondant à un ordre d'interférence nul ? Peut-on y distinguer les différentes longueurs d'onde composant notre source ?

2.3.2 Ordre p

Les autres solutions dépendent de la longueur d'onde. Le réseau est dit « dispersif ».

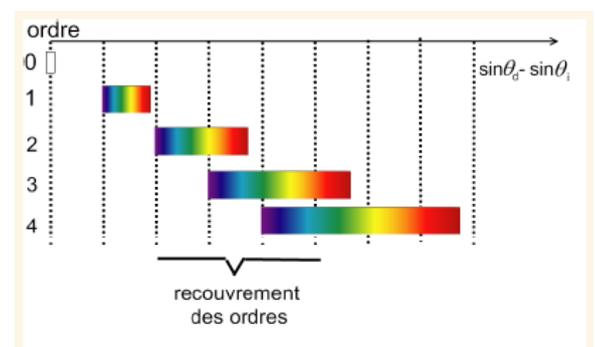
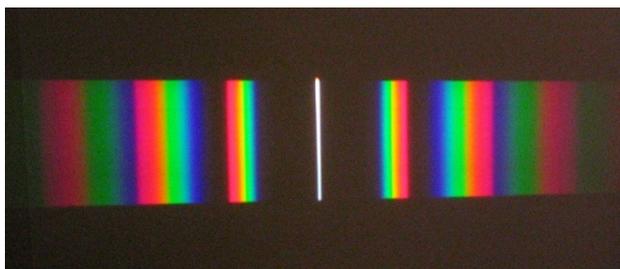
- 5) Donner la relation entre $\theta_{p=1}$ et λ_0 . Si la source comporte plusieurs longueurs d'ondes, est-ce que θ_1 sera le même pour toutes les longueurs d'onde ? Pour quelles longueurs d'ondes, est-ce que θ_1 sera plus ?



On va ainsi parler de « la raie d'ordre p » afin de distinguer les différentes raies observées correspondant aux différentes valeurs de p .

2.3.3 Cas de la lumière blanche

Pour l'ordre 0, on obtiendra une raie blanche, puis à partir de l'ordre 1, la lumière blanche sera dispersée avec dans l'ordre du bleu (longueur d'onde plus faible) au rouge (longueur d'onde plus élevée). Il peut arriver que les différents ordres se recouvrent, c'est-à-dire qu'un ordre commence alors que le précédent n'est pas achevé.



2.4 TP2

2.4.1 Contexte

Le but de ce TP est de mettre en évidence le caractère dispersif du réseau par transmission pour réaliser un spectroscope et faire une mesure de longueur d'onde.

2.4.2 Matériel à disposition

Par paillasse élève :

- Lampe spectrale à vapeur de mercure ou sodium
- Réseaux
- Ordinateur
- Goniomètre
- Lampe à filament
- Laser
- Miroir

2.4.3 Premières observations

A l'aide d'un laser, éclairer un réseau sous une incidence quasi-normale. Observer, et décrire, la figure de diffraction obtenue à l'infini (loin du réseau). Déduire de vos observations la direction des traits du réseau. Prendre un réseau de pas différent et recommencer l'expérience. Interpréter qualitativement la différence entre les deux observations.

2.4.4 Réglage du goniomètre

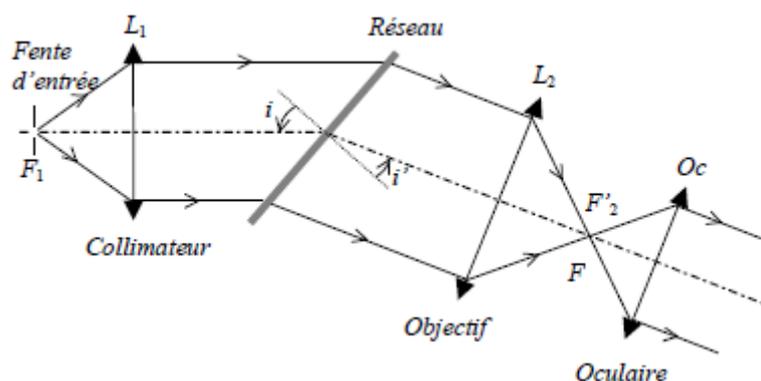
2.4.4.1 Description

Un goniomètre est un appareil qui sert à mesurer des angles avec une précision de une minute d'angle (cf 2.4.7).

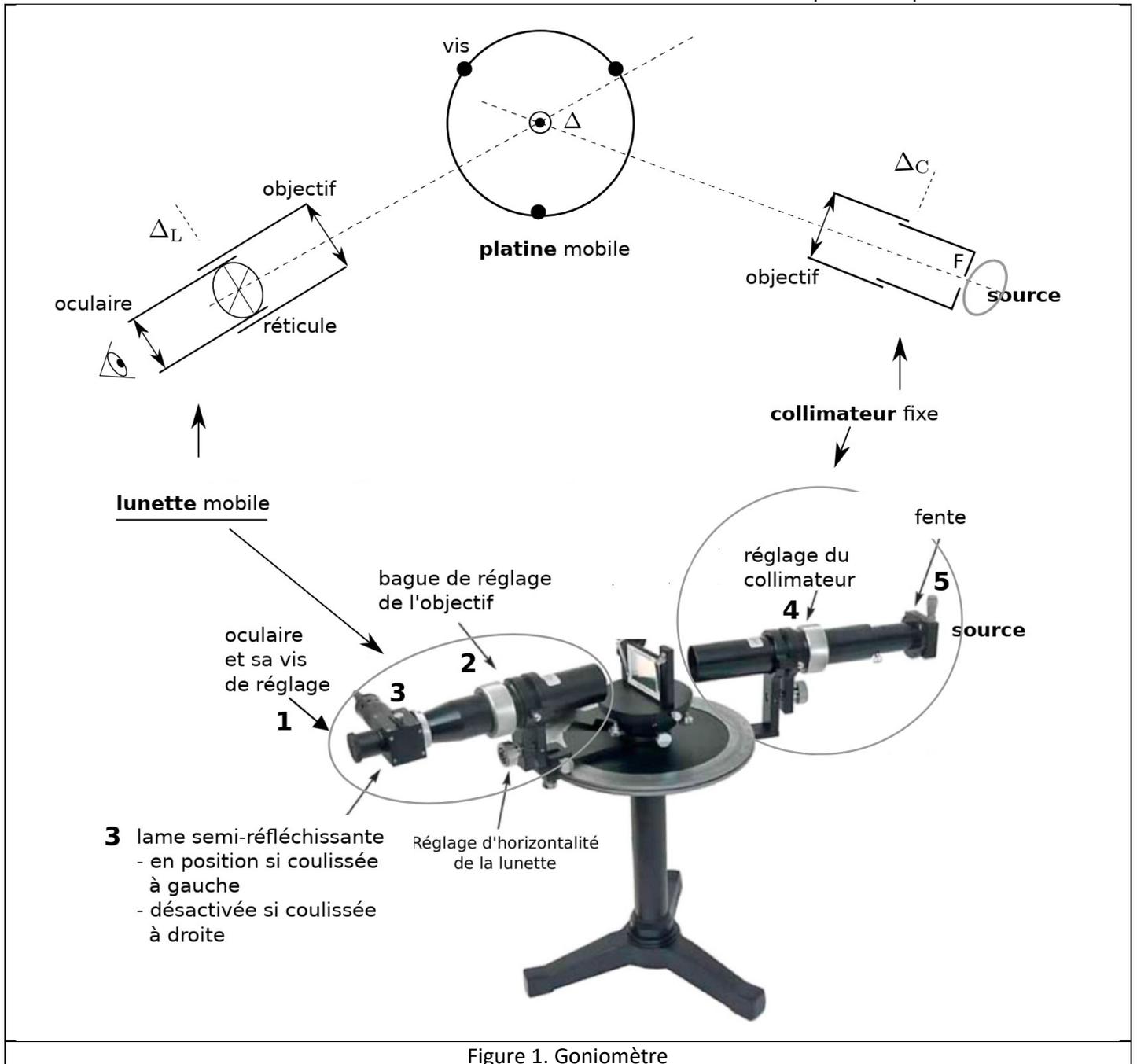
Il comporte :

- Un collimateur réglable créant un objet lumineux à l'infini à l'aide d'une fente éclairée avec une lampe spectrale et d'un objectif de focale 160 mm ;
- Une lunette autocollimatrice montée sur un support mobile autour d'un axe central. Cette lunette de visée est constituée d'un objectif de focale 130 mm et d'un oculaire autocollimateur et permet de repérer un rayon émergent du prisme ;
- Un plateau, lui aussi mobile autour de l'axe central, monté sur un socle métallique fixe, le tout pouvant être rendu horizontal à l'aide de trois vis de réglage

Utilisé avec un réseau, il permet de mesurer avec précision des longueurs d'onde. C'est l'**objectif de ce TP**.



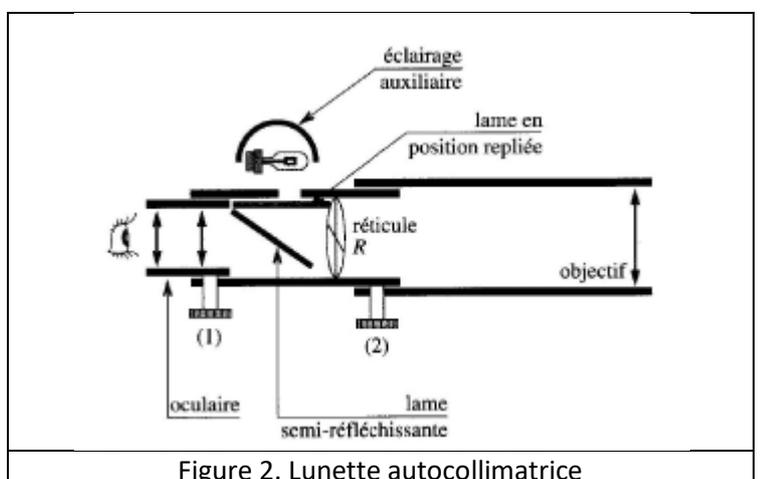
Toutes les vis correspondant au réglage de l'horizontalité ont déjà été réglées et ne doivent en aucun cas être touchées. Prévenir si cela arrive par inadvertance.



2.4.4.2 Réglage de la lunette autocollimatrice

Cette lunette doit être réglée de façon à donner d'un objet à l'infini une image à l'infini pour éviter toute fatigue de l'oeil : système afocal.

La lunette autocollimatrice est une lunette à laquelle on a ajouté, entre l'oculaire (1) et le réticule une lame à la fois transparente et réfléchissante (3) (semi-réfléchissante), inclinée à 45° sur l'axe. Une ouverture latérale pratiquée dans le tube qui porte le réticule, permet d'éclairer ce dernier par réflexion sur la lame à l'aide d'une petite ampoule (Figure 2).



2.4.4.2.1 Réglage de l'oculaire

- A) Eclairer le réticule en allumant la petite lampe latérale et en mettant en service la lame semi-réfléchissante (3).
 - B) Orienter les fils du réticule afin que l'un d'eux soit vertical et l'autre horizontal.
 - C) Régler l'oculaire (1) en tournant la bague à cet effet, de façon à voir le réticule net sans accommodation, c'est-à-dire sans fatigue de l'oeil : le réticule est alors placé au foyer objet de l'oculaire.
- Ne plus toucher au réglage de l'oculaire (1) qui est fait « pour votre vue ».**

2.4.4.2.2 Mise au point de la lunette à l'infini

Pour placer le réticule au foyer image de l'objectif, nous allons utiliser la méthode d'autocollimation en utilisant le miroir que vous placerez sur le plateau en face de l'objectif.

- D) En tournant le plateau, orienter la lunette de manière à ce que la lumière retrace l'objectif (on voit une tache lumineuse très claire). En tournant la bague de réglage de l'objectif (2), régler l'objectif de façon à voir l'image du réticule nette.
 - E) Quand l'image du réticule est confondue avec le réticule lui-même, c'est que ce dernier est au foyer de l'objectif. Amener les deux fils verticaux (objet et image) très près l'un de l'autre de manière à parfaire le réglage.
 - F) Eteindre la lampe latérale et basculer la lame semi-réfléchissante (3).
- Ne plus toucher par la suite à la bague de réglage de l'objectif (2).**

2.4.4.3 Réglage du tirage du collimateur

Le collimateur doit donner de la fente source (5) une image à l'infini.

- G) Aligner la lunette et le collimateur. Ouvrir la fente (5) de 1/2 mm environ et l'éclairer par la source qui sera utilisée dans la manipulation suivante (ici, lampe à vapeur de sodium ou de mercure).
 - H) Observer l'image de la fente donnée par le collimateur à travers la lunette. En tournant la bague de réglage du collimateur (4), régler le collimateur de façon à voir l'image de la fente nette.
 - I) Refermer ensuite presque complètement la fente, l'œil restant derrière l'oculaire, de manière à observer un trait lumineux de largeur pratiquement nulle. Amener l'image du trait sur le trait vertical du réticule.
- Ne plus toucher par la suite à la bague de réglage du collimateur (4).**

2.4.5 Utilisation de diverses sources

2.4.5.1 Spectre d'une lampe à vapeur de sodium ou de mercure

- A) Eclairer la fente du collimateur par la lampe spectrale. Positionner un des réseaux sur la plateforme du goniomètre et régler son orientation pour que le réseau soit éclairé sous incidence quasi-normale.
- B) Repérer l'image d'ordre 0 (ordre où toutes les longueurs d'onde sont superposées). Régler la largeur de la fente du collimateur pour que son image soit assez fine.
- C) Observer la décomposition du spectre de la lampe en décalant la lunette d'un côté et de l'autre.
- D) Changer de réseau et observer de nouveau.
- E) Pour la lampe à vapeur de sodium, observer la séparation des 2 raies jaunes avec le réseau 600 traits/mm.

2.4.5.2 Spectre d'une source de lumière blanche

- F) Eclairer la fente par une source de lumière blanche.
- G) Observer l'ordre des couleurs rencontrées dans le spectre d'ordre 1.
- H) Observer les spectres suivants et noter à partir de quel ordre il y a éventuellement chevauchement.

2.4.6 Mesure de longueurs d'ondes

Votre compte-rendu doit s'appuyer sur cette partie.

Placer le réseau 100 traits/mm (pas : $a = 10\mu\text{m}$) sur la plateforme.

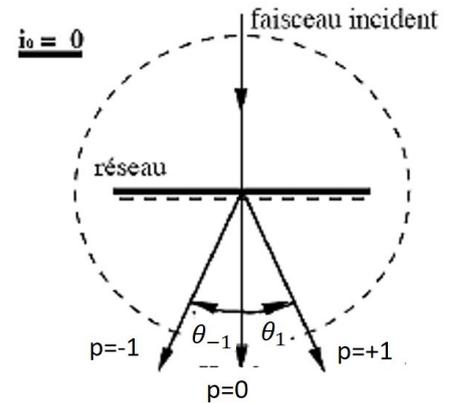
1) Viser l'ordre 0. Noter la position α_0 lue sur le vernier angulaire de la lunette qui, dans la suite, sera l'origine des angles.

2) Relever, pour la raie verte de la lampe de mercure ou la raie jaune de la lampe de sodium, les positions α de la lunette pour lesquelles on retrouve ces raies. La première raie rencontrée pour les angles positifs est appelée raie d'ordre $p = +1$, la seconde $p = +2$ et pour les angles négatifs $p = -1$ et $p = -2$.

p	0	+1	+2	-1	-2
α_p					
θ_p	0				

On peut alors calculer : $\theta_p = \alpha_p - \alpha_0$

3) Tracer la courbe $\sin\theta_p = f(p)$.



La formule des réseaux dans le cas de l'incidence normale peut se simplifier en :

$$a \sin(\theta_p) = p \lambda_0 \quad p \in \mathbb{Z}$$

4) En déduire la longueur d'onde de la raie mesurée connaissant le pas du réseau. Donner l'incertitude sur la mesure. Comparer à la valeur donnée en référence.

Valeur de référence :

Longueur d'onde de la raie verte du mercure : $\lambda_v = 546,1 \text{ nm}$

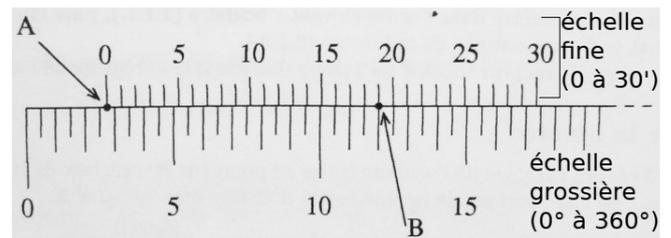
Longueur d'onde la première raie jaune du sodium : $\lambda_j = 589,0 \text{ nm}$

5) Conclure en précisant ce que l'on appelle spectroscope à réseau.

2.4.7 Mesure d'angle avec le vernier

Le vernier comporte deux échelles : une graduée au demi degré près, qui va de 0° à 360° , c'est l'échelle grossière ; une seconde graduée de 0 minute à 30 minutes, c'est l'échelle fine.

Mesure grossière : on repère la position A sur le vernier (cf figure) : la graduation précédente, prise sur l'échelle grossière, donne la valeur grossière au demi-degré près. Ci-contre on lit $2,5^\circ$.



Mesure plus fine : on repère ensuite le point B comme celui où les graduations des deux échelles coïncident, et on lit la valeur sur l'échelle fine. Ci-contre on lit $19'$ (19 minutes).

La valeur finale est la somme des deux : ci-contre on a $2,5^\circ + 19' = 2,5 + 19/60 = 2,82^\circ$

Remarque : Garder deux chiffres après la virgule pour vos mesures d'angles.

Remarque : un degré = 60 minutes, c'est-à-dire $1^\circ = 60'$! on passe des minutes aux degrés en divisant par 60)

3 Questions de cours

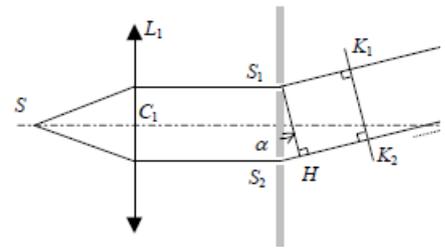
- 1) Faire un schéma expliquant l'interféromètre des trous d'Young. Quelles observations pouvez-vous faire ?
- 2) Démontrer l'expression de la différence de marche entre deux rayons passant par chacune des sources secondaires et se recouvrant en un point M de l'écran. On pose : $D \gg a$, $|x|$, $|y| \gg \lambda$
En supposant que les deux ondes interférant ont la même intensité lumineuse I_0 , en déduire l'expression de l'intensité lumineuse au point M.
- 3) Donner l'expression de l'ordre d'interférence $p(M)$ en fonction de $\delta(M)$, puis en fonction de n , a , y , D et λ_0 . A quel ordre correspond la frange centrale ? Trouver alors la position y_1 de la frange d'ordre 1.
- 4) Qu'appelle-t-on interfrange ? Retrouver son expression. Réécrire l'expression de $I_{tot}(M)$ en fonction de i .
- 5) Dans le cas d'un réseau de diffraction, établir l'expression de la différence de marche entre deux motifs consécutifs. En déduire la relation fondamentale des réseaux liant la condition d'interférences constructives à la valeur de la différence de marche entre deux motifs consécutifs.

4 Exercices type oral

4.1 Source à distance finie et observation à l'infini

On ajoute une lentille convergente L_1 au dispositif des trous d'Young étudié dans le cours telle que la source S se trouve en son foyer objet. Alors les trous sont éclairés en lumière parallèle et les rayons émergent des trous sont aussi parallèles. On parle d'observation à l'infini.

Pour pouvoir se ramener à une distance finie, on place une seconde lentille convergente L_2 telle que l'écran se trouve en son plan focal image.



- 1) Faire un schéma et prolonger les rayons jusqu'à un point M se trouvant sur l'écran.
- 2) Exprimer la différence de marche δ entre les deux rayons.
- 3) Donner l'expression de l'ordre d'interférence p .
- 4) En supposant que les deux ondes interférant ont la même intensité lumineuse I_0 , en déduire l'expression de l'intensité lumineuse au point M .
- 5) Comparer à l'expression obtenue dans le cours à distance finie.
- 6) Donner l'expression de l'interfrange.

4.2 Déplacement de la source et source constituée de deux points

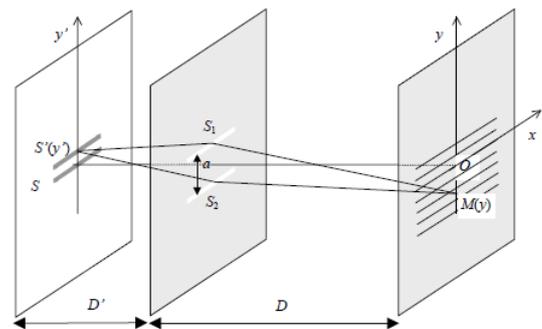
A) Déplacement de la source

On suppose que la source S , placée à une distance D' des fentes, se déplace en S' avec $y' = SS'$, comme sur le schéma ci-contre.

On pose : $D' \gg a$, $|x'|, |y'| \gg \lambda$

- 1) Comment est modifiée la différence de marche ?
- 2) En déduire l'expression de l'intensité lumineuse.
- 3) Après avoir déterminé la position de la frange d'ordre 0, expliquer ce qu'il se passe sur l'écran ?

<http://anim.institutoptique.fr/Young/>



B) Source constituée des deux points

On considère une source monochromatique de longueur d'onde λ_0 constituée de deux points P_1 et P_2 , séparés d'une distance h et qui éclaire deux trous d'Young. On suppose que l'on se place dans l'air d'indice optique : $n = 1$.

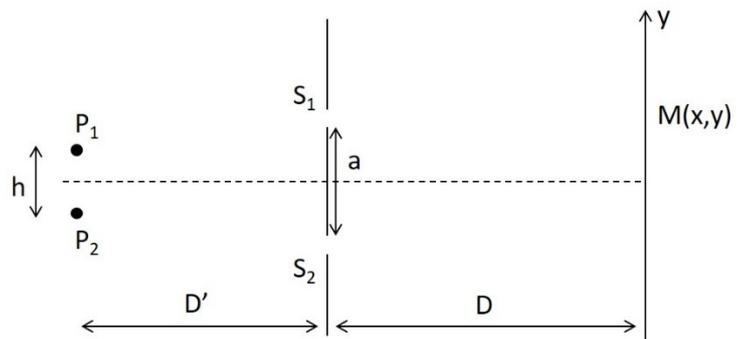
Les deux points sources P_1 et P_2 sont incohérents, mais de même intensité I_0 .

4) Comment obtenir l'intensité lumineuse totale $I_{tot}(M)$ au point M ?

5) Donner son expression sous la forme :

$$I_{tot}(M) = 4I_0(1 + \cos \alpha \cos \beta)$$

On précisera la valeur de α et β .



6) L'un des deux cosinus précédents ne dépend pas de la position du point M . On appelle ce terme contraste de la figure d'interférence. Expliquer pourquoi.

7) Lorsque le contraste de la figure est nul, on dit qu'il y a anti-coïncidence. Pourquoi ?

8) Lorsque le contraste de la figure est maximal, on dit qu'il y a coïncidence. Pourquoi ?

9) A partir de cet exemple, expliquer pourquoi dans le cas d'une simple fente source, celle-ci doit être suffisamment fine pour obtenir une figure d'interférence contrastée. On dit que la source doit être plus fine que la longueur de cohérence spatiale.

Rappel : $\cos(a) + \cos(b) = 2\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$

4.3 Réseau par transmission

Considérons un réseau plan constitué de N fentes identiques, fines et parallèles. On pose p le pas de ce réseau utilisé par transmission, $n = 1$.

1) Le réseau est éclairé par un faisceau parallèle, monochromatique, de longueur d'onde λ , sous une incidence i . Le faisceau est diffracté à l'infini dans la direction θ . Les angles i et θ mentionnées sont positifs.

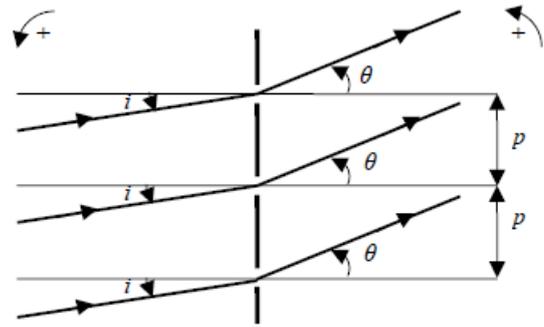
a) Exprimer la différence de marche δ entre deux rayons homologues séparés d'une distance p dans le plan du réseau.

b) Déterminer les directions θ_k des maximums principaux d'ordre k .

2) On suppose que le spectre de raies des radiations du mercure est limité par les radiations violette ($\lambda_v = 400nm$) et rouge ($\lambda_r = 700nm$).

a) Déterminer les ordres observables, sous une incidence de 30° , pour ces deux radiations et avec un réseau de pas $p = 2\mu m$.

b) A partir de quel ordre se produit le recouvrement des spectres ? Justifier votre réponse.



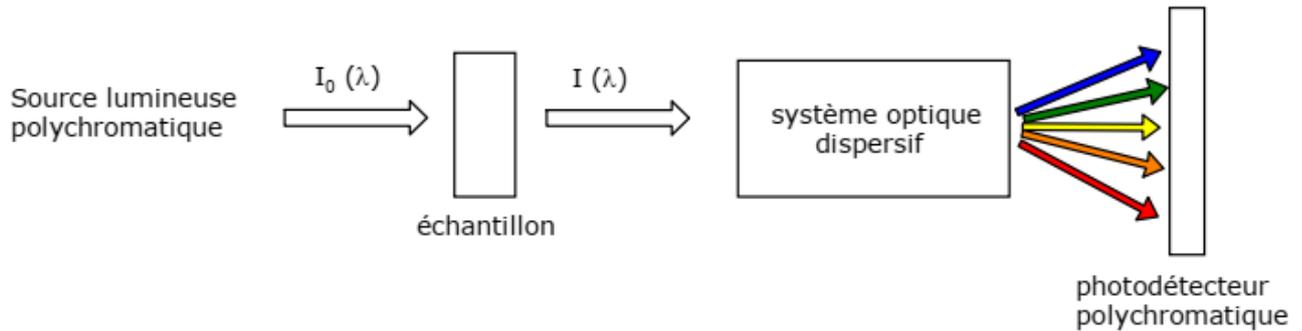
4.4 Recouvrement des ordres

Un réseau comportant $n_0 = 800$ motifs par millimètre est éclairé par une lampe à vapeur atomique en incidence normale. Les longueurs d'onde sont comprises entre $\lambda_{min} = 450nm$ et $\lambda_{max} = 600nm$. Les spectres se recouvrent-ils et, si oui, à partir de quel ordre ? On supposera que l'indice optique du milieu égal à 1.

5 DM21 pour le 01/04/2023

5.1 Spectrophotométrie UV-Visible

L'absorption des radiations lumineuses par la matière dans le domaine s'étendant du proche ultraviolet au très proche infrarouge a beaucoup d'applications en analyse chimique quantitative. Le calcul des concentrations des différentes espèces en solution, par application de la loi de Beer et Lambert, constitue la base de la colorimétrie. Les mesures d'absorbance des solutions sont effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre. Globalement, un spectrophotomètre est constitué de la réunion de trois parties distinctes : la source lumineuse, le système dispersif et le détecteur.



Document 1. Spectrophotométrie

5.1.1 Fonctionnement d'un spectrophotomètre

On cherche dans cette partie à modéliser la propagation de la lumière depuis la source lumineuse jusqu'au détecteur.

5.1.1.1 Avant l'échantillon

On considère une source ponctuelle, située au point O , émettant une onde monochromatique se propageant à la célérité c , dans l'air, assimilé à un milieu homogène d'indice $n_0 = 1$. On note s_0 l'amplitude, φ_0 la phase à l'origine et ω_0 la pulsation de l'onde lumineuse.

- 1) Qu'appelle-t-on approximation scalaire de la lumière ?
- 2) Donner l'expression de l'amplitude lumineuse $s(O, t)$ au point O en fonction de s_0 , φ_0 et ω_0 .
- 3) Donner l'expression de l'amplitude lumineuse $s(M, t)$ en un point M en fonction de $s_0(M)$, ω_0 et $\varphi(M)$ où $s_0(M)$ représente l'amplitude de $s(M, t)$ et $\varphi(M)$ le retard de phase.

L'échantillon doit être éclairé en incidence normale avec une onde quasi-plane.

- 4) Comment peut-on représenter les surfaces d'ondes émises par la source ponctuelle ? Quel système optique permet de convertir cette onde en onde quasi-plane ?
- 5) Représenter sur l'annexe 1 ce système optique ainsi que plusieurs rayons provenant de la source en O . Y faire figurer quelques surfaces d'onde. Justifier soigneusement.

Soient A et B deux points de la surface d'entrée de l'échantillon.

- 6) Définir la notion de chemin optique. Comment se simplifie-t-elle dans un milieu d'indice n constant ?
- 7) Que peut-on dire de la différence de chemin optique $(OA) - (OB)$?

5.1.1.2 Traversée de l'échantillon

L'échantillon, souvent un soluté en solution aqueuse, est placé dans une cuve en plastique (Figure 2). Cette cuve est transparente sur la gamme de longueur d'onde du spectrophotomètre.

- 8) Représenter sur l'annexe 1 quelques rayons traversant l'échantillon (prolongation des rayons en Q23).
- 9) Pourquoi est-il important que les rayons arrivent en incidence normale sur la cuve ?

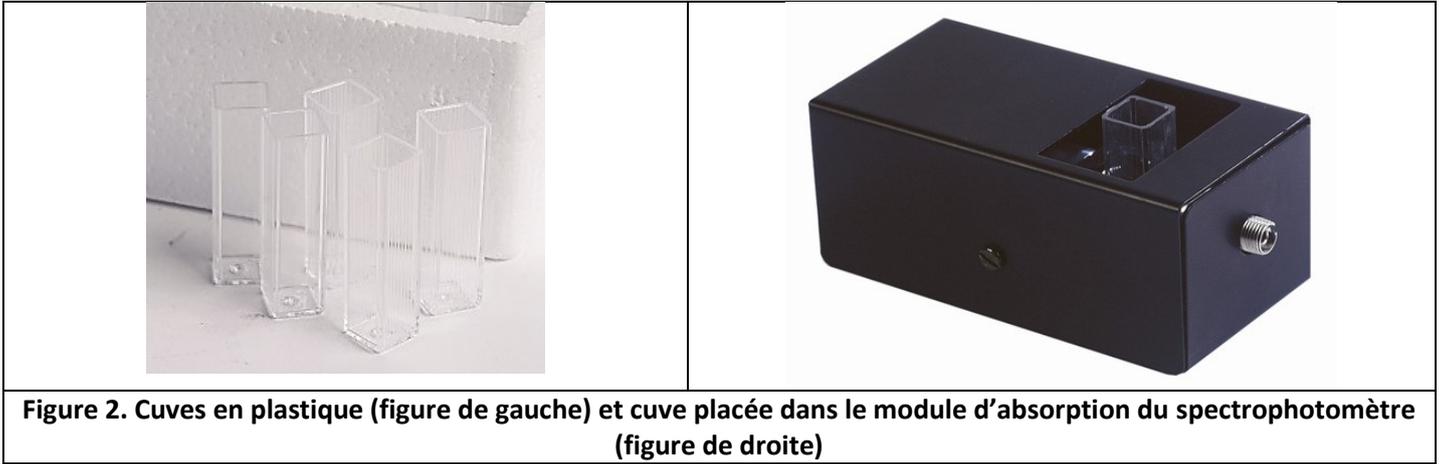


Figure 2. Cuves en plastique (figure de gauche) et cuve placée dans le module d'absorption du spectrophotomètre (figure de droite)

- 10) Définir la notion d'intensité lumineuse et exprimer l'intensité lumineuse $I_0(M)$ de l'onde provenant de la source juste avant la traversée de l'échantillon en fonction de $s_0(M)$.
- 11) D'après le document 2, que se passe-t-il lors que la traversée de la cuve ?
- 12) Pourquoi la source lumineuse choisie dans un spectrophotomètre (Document 1) n'est-elle pas monochromatique ?

L'absorbance mesure la capacité d'un milieu à absorber la lumière qui le traverse. L'absorbance diffère selon la nature de la substance étudiée, selon la longueur d'onde sous laquelle elle est analysée, et selon la concentration de cette substance dans le milieu traversé.

En spectrophotométrie, notamment dans le domaine des mesures de concentrations chimiques, l'absorbance A est le logarithme décimal du rapport entre l'intensité énergétique $I_0(\lambda)$ à une longueur d'onde donnée, avant traversée du milieu, et l'intensité énergétique transmise $I(\lambda)$:

$$A(\lambda) = \log \left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right)$$

La loi de Beer-Lambert établit une proportionnalité entre la concentration d'une entité chimique en solution, l'absorbance de celle-ci et la longueur du trajet parcouru par la lumière dans la solution :

$$A(\lambda) = \epsilon(\lambda)lC$$

Avec :

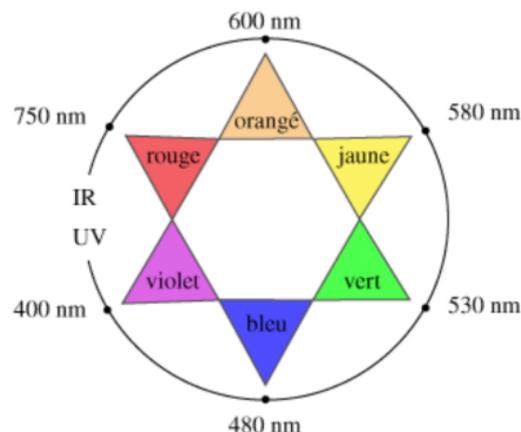
$\epsilon(\lambda)$: coefficient d'extinction molaire qui dépend de λ

l : largeur de la cuve

C : concentration de l'entité chimique en solution

La loi de Beer-Lambert n'est cependant valable que sous certaines conditions. La lumière doit être monochromatique, la concentration des solutions doit être faible (de l'ordre de $10^{-4} \text{ mol. L}^{-1}$), les solutions doivent être homogènes et le soluté ne doit pas réagir sous l'action de la lumière incidente.

Dans le cas du domaine visible, un examen se fait à l'aide de l'étoile des couleurs complémentaires. Le milieu étudié sera de la couleur opposée dans le cercle à celle absorbée.



Document 2. Absorbance

5.1.1.3 Système optique dispersif : fentes d'Young

5.1.1.3.1 Source monochromatique

On considère dans cette partie que la source ponctuelle située au point O éclaire directement le système optique de la Figure 3. Celui-ci est composé de deux fentes S_1 et S_2 très fines de largeur d selon Oy et espacées d'une distance a . On suppose que chacune des fentes reçoit la même intensité lumineuse I_0 . Derrière le système optique, se trouve une barrette CCD de largeur L à une distance D très grande devant L, d, a ou encore λ_0 .

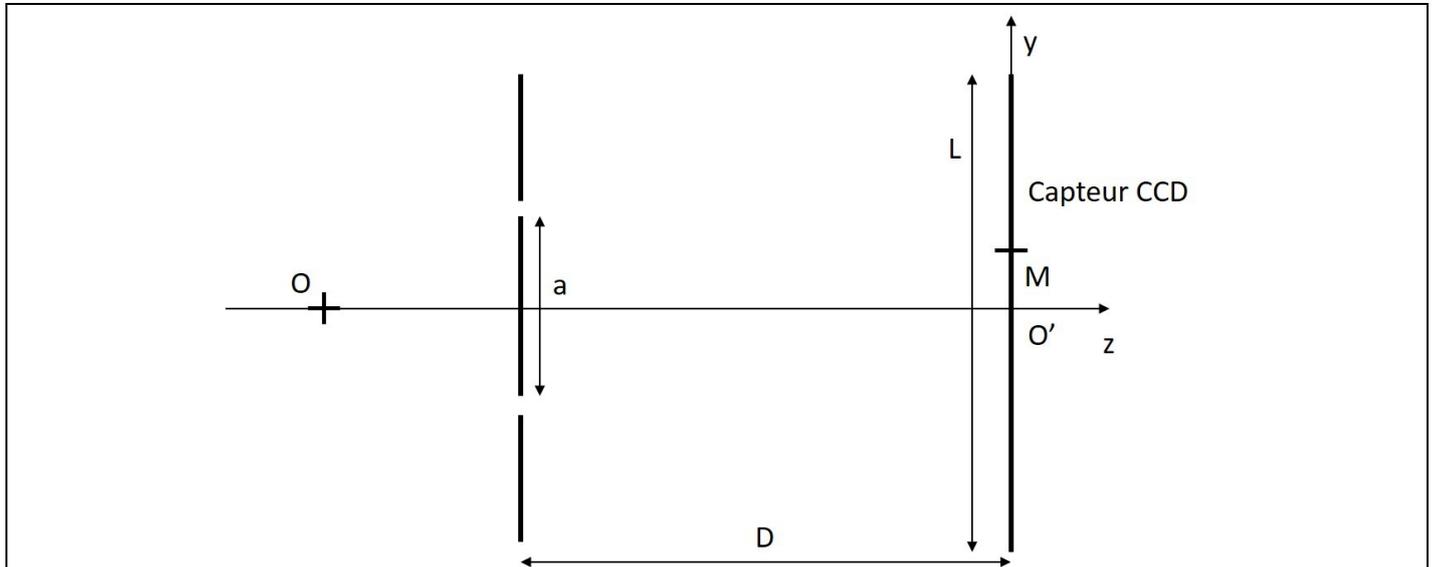


Figure 3. Fentes d'Young

- 13)** Qu'observe-t-on sur le capteur CCD ? Comment nomme-t-on ces phénomènes ? Quelles en sont les conditions d'obtention ?
- 14)** Montrer que l'intensité lumineuse $I_{tot}(M)$ résultant de la superposition des deux ondes, notées $s_1(M, t)$ et $s_2(M, t)$, après les deux fentes peut s'écrire sous la forme :
- $$I_{tot}(M) = 2I_0(1 + \cos(\varphi(M)))$$
- avec $\varphi(M)$, la différence de phase entre les deux ondes issues de S_1 et S_2 au point M .
- 15)** Déterminer la différence de marche $\delta(M)$ en un point de l'écran en fonction de y, a et D . On justifiera bien chaque ligne de calcul.
- 16)** En déduire l'ordre d'interférence $p(M)$. Que vaut-il au centre du capteur CCD ? Que peut-on en conclure ?
- 17)** Exprimer alors l'intensité lumineuse $I_{tot}(M)$ en fonction de y . Comment appelle-t-on sa période ? Déterminer son expression en fonction de λ_0, a et D .

5.1.1.3.2 Source polychromatique

Le Figure 4 nous montre le tracé de l'intensité obtenue sur le capteur dans le cas d'une source monochromatique, puis dans le cas d'une source de lumière blanche (4 longueurs d'onde composant son spectre sont représentées).

- 18)** Que se passe-t-il dès que l'ordre d'interférence augmente ?

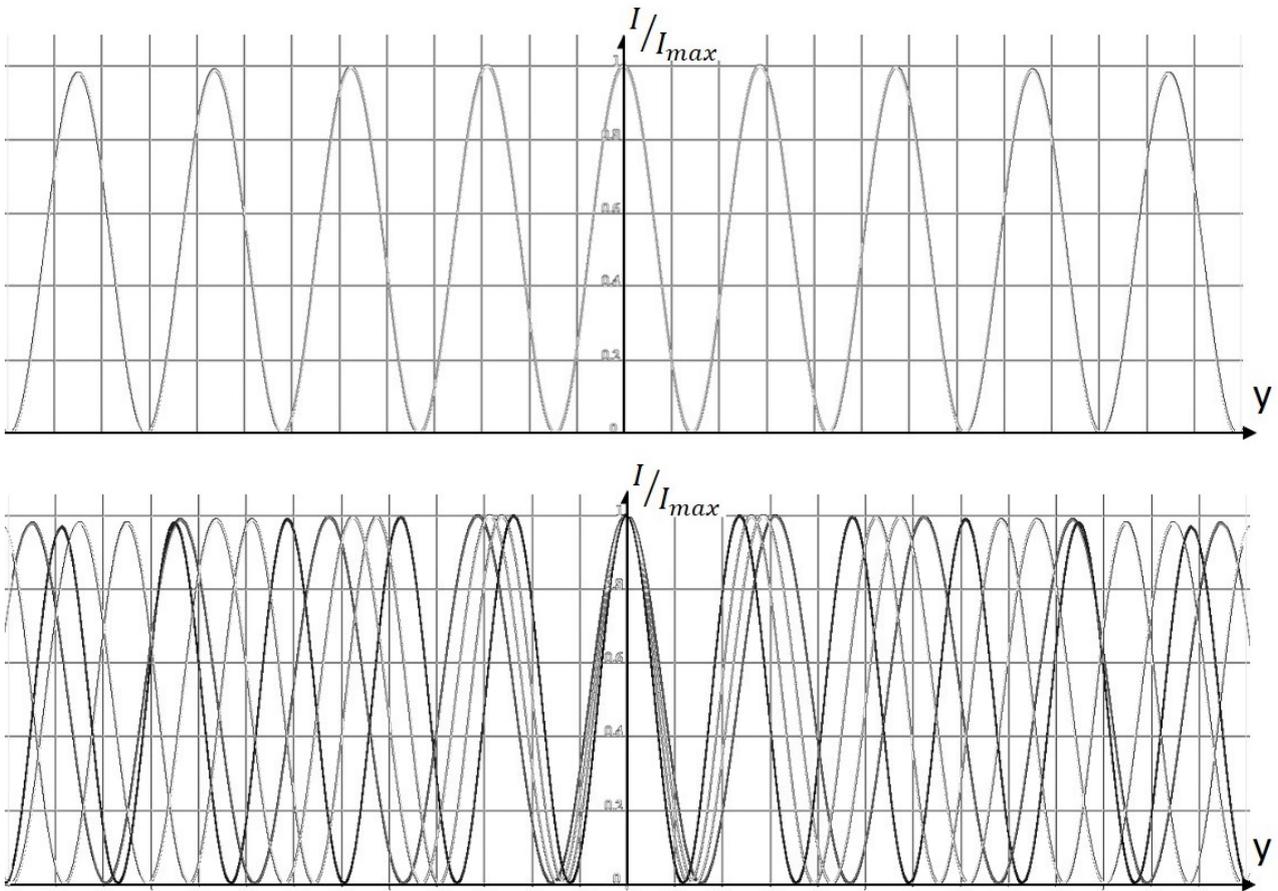


Figure 4. Tracé de l'intensité lumineuse reçue par le capteur CCD après traversée des fentes d'Young dans le cas d'une source monochromatique (figure du haut), puis d'une source de lumière blanche (figure du bas)

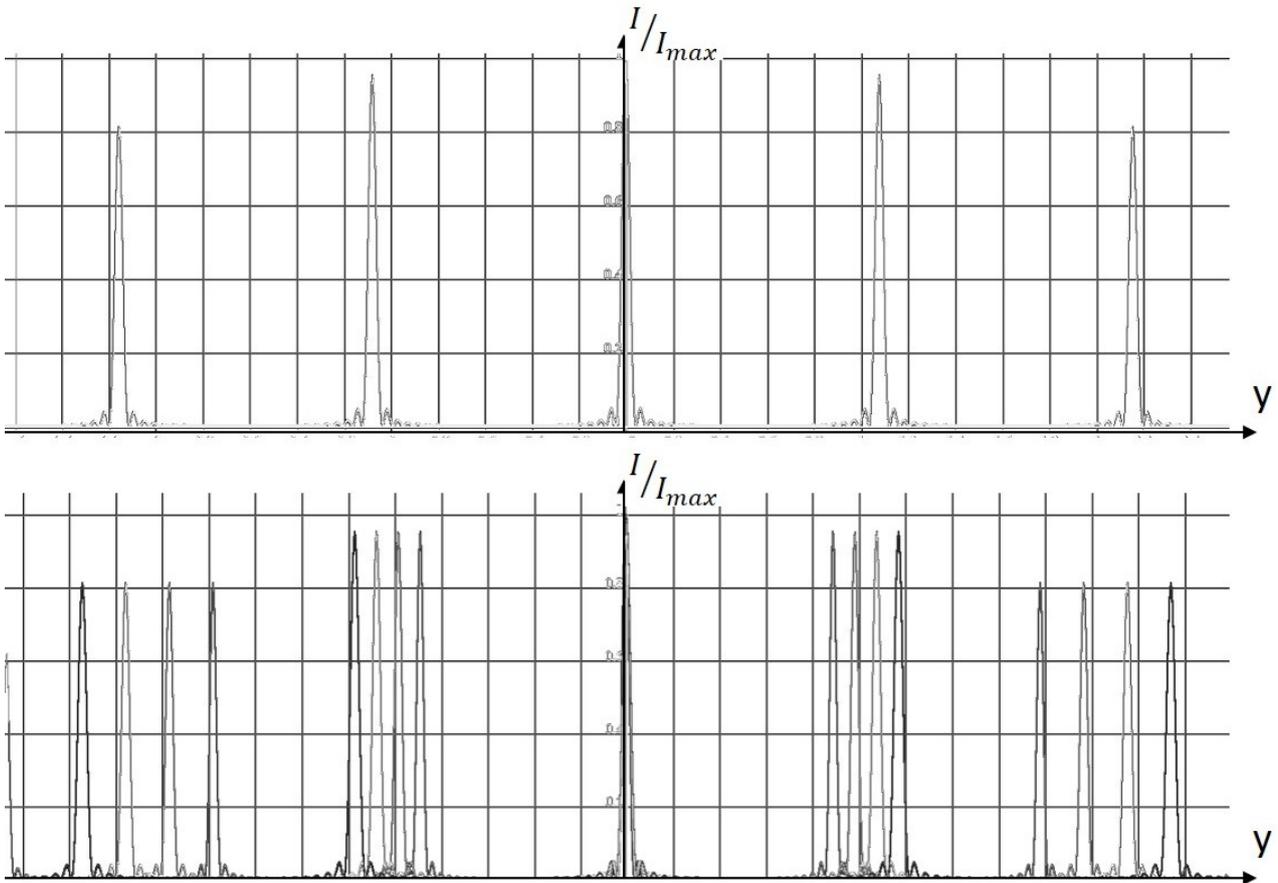


Figure 5. Tracé de l'intensité lumineuse reçue par le capteur CCD après traversée du réseau par transmission dans le cas d'une source monochromatique (figure du haut), puis d'une source de lumière blanche (figure du bas)

5.1.1.4 Système optique dispersif : réseau par transmission

En pratique, c'est un réseau par transmission qui est utilisé en tant que système optique dispersif.

19) Expliquer pourquoi en s'appuyant sur la Figure 5.

5.1.1.4.1 Source monochromatique

Le réseau étudié est un réseau plan par transmission, de nombre de traits n par unité de longueur. On considère un faisceau incident monochromatique de longueur d'onde λ_0 , frappant le réseau en incidence normale. Le faisceau est diffracté dans toutes les directions.

Il est reçu sur une lentille mince convergente de distance focale f .

20) Quel est le pas a du réseau (distance entre deux traits) ?

21) On considère que le système optique, centré autour d'un axe horizontal perpendiculaire au réseau, est éclairé dans les conditions de Gauss. Définir ces conditions et en donner les conséquences.

Sur l'Annexe 1, on a représenté les rayons émergents du réseau faisant un angle θ avec l'horizontale.

22) Compléter la figure de l'Annexe 1 en indiquant la marche des rayons après traversée de la lentille.

23) Les rayons émergents dans la direction θ convergent, après la lentille, en un point M . Déterminer sa position y_M sur l'axe $(F'y)$ en fonction de f et θ .

24) Déterminer la différence de marche $\delta(M)$ entre les rayons 1 et 2 après la traversée du réseau.

25) Pourquoi cette différence de marche est-elle conservée après le passage des rayons par la lentille ?

26) Que peut-on dire de la différence de marche entre deux rayons quelconques émergents dans la direction θ ?

27) A quelle condition sur $\delta(M)$ et λ_0 , puis sur θ , a et λ_0 , les rayons émergents dans la direction θ interfèrent-ils de manière constructive en M ? On fera intervenir l'ordre d'interférence k .

28) Déterminer les valeurs possibles de k dans les conditions suivantes : $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, $n = 500 \text{ traits. mm}^{-1}$.

5.1.1.4.2 Source polychromatique

Le réseau est éclairé en lumière polychromatique. On considère ici les interférences observées à l'ordre 1. Les notations précédentes sont conservées.

29) Calculer numériquement les angles θ_v et θ_r des rayons correspondant respectivement aux radiations violettes ($\lambda_v = 400 \text{ nm}$) et rouge ($\lambda_r = 800 \text{ nm}$) interférant de manière constructive à l'ordre 1.

30) Sur quelle distance le spectre visible d'ordre 1 s'étalera-t-il dans le plan focal image de la lentille ?