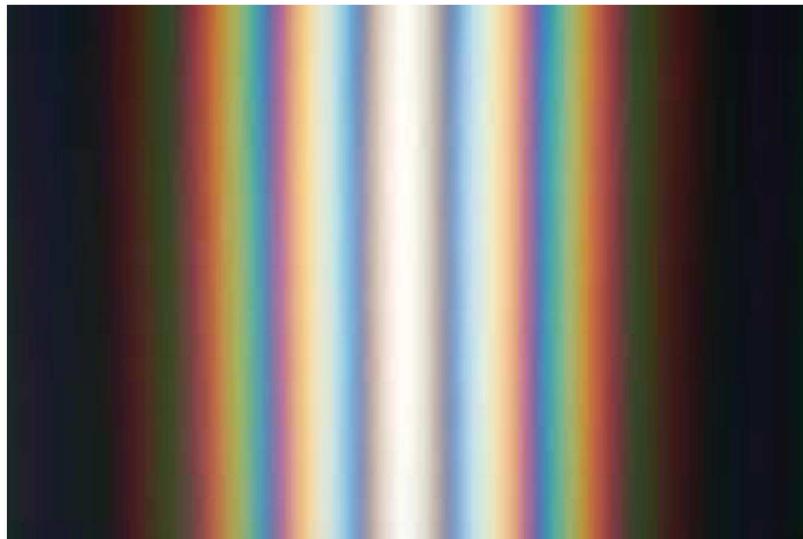


Travaux Pratiques

Optique Physique



Élément Optique II
Filières SMP S4
Année universitaire 2020-2021

Responsable :
Pr. Abdelkader DOUDOU

Recommandations

- **Les comptes rendus de travaux pratiques doivent être rédigés à la maison (But, Théorie, Manipulation). Il faut prévoir les emplacements pour les résultats et les commentaires,**
- **Les comptes rendus doivent être remis à la fin de chaque séance,**
- **Le port de blouse blanche, en salle de travaux pratiques, est obligatoire, sans la blouse l'étudiant ne sera pas accepté.**
- **Il faut apporter une photographie 45x45 mm à la première séance de travaux pratiques.**
- **Deux absences aux travaux pratiques, l'étudiant ne sera pas admis à l'examen écrit de l'élément de module.**
- **Pour toute information ou réclamation veuillez contacter le responsable.**

Précaution pour les Lasers :

Il y a danger à placer l'œil sur le trajet du faisceau laser. Par conséquence il faut respecter les consignes suivantes:

-
- Avoir le souci constant de localiser le laser ;
 - Observer dans le sens de propagation du faisceau et non pas vers le laser ;
 - Veiller à ce qu'aucune personne ne se trouve sur le trajet du faisceau ;
 - Se méfier des réflexions accidentelles ;
 - Manipuler dans une semi-obscurité.
-



PRÉAMBULE

Les travaux pratiques de physique destinés aux étudiants des filières SMP et SMC du premier semestre S3 ont un double objectif :

- Permettre aux étudiants de se familiariser avec des appareils et des instruments de mesure.
- Vérifier et utiliser les lois de la physique étudiées en cours magistral ou lors des séances de travaux dirigés.

Les travaux pratiques d'optique géométrique se déroulent sur trois séances de 2 heures chacune, qui seront suivis d'une séance d'évaluation.

Pour chaque séance, le polycopié propose :

- *Une présentation du but du travail et du matériel mis à disposition.*
- *Une analyse théorique de l'expérience permettant de modéliser le système étudié et d'en déduire des relations qui seront confrontées à l'expérience.*
- *Une partie expérimentale qui vous guide dans le choix des manipulations à effectuer.*

Il convient de préparer chaque séance à l'avance : réfléchir aux questions expérimentales qui vous sont posées et faire les analyses théoriques demandées. La réalisation des expériences et la rédaction du compte rendu occupent bien les deux heures de travaux pratiques. Il est recommandé que le compte rendu soit rendu sur une feuille double grand format genre « papier ministre » avec des courbes tracées sur papier millimétré.

Le compte rendu doit comporter cinq parties comme indiqué là-dessous, les parties a) et b) doivent être rédigés et préparées avant la séance de travaux pratiques, c.-à-d. à la maison, les parties c), d) et e) seront complétées au fur et à mesure pendant la manipulation.

a) BUT

Dans une première partie abrégée (une ou deux phrases) on précisera clairement le but de la manipulation choisie.

b) PRINCIPE

On décrira le principe de la manipulation en quelques lignes, c'est-à-dire :

- *le principe théorique (l'enchaînement mathématique pour formuler la méthode d'analyse des observations effectuées)*
- *le principe expérimental (indiquer l'appareillage utilisé et la méthode de mesure).*

Pour la rédaction des parties a) et b) on évitera de se référer systématiquement aux indications de ce polycopié.

c) EXPLOITATION

On commencera effectivement la manipulation en préparant un tableau de mesures dans lequel on reporterai au fur et à mesure les résultats obtenus (dans un premier temps on peut utiliser une feuille de brouillon).

d) INTERPRETATION

La quatrième partie sera consacrée à l'interprétation des résultats rassemblés proprement et accompagnés de leurs incertitudes absolues. Un résultat sans unité ni

incertitude n'a aucune valeur scientifique. Il faut savoir que plus les étudiants auront un regard critique face à leurs mesures, plus ils auront fait preuve d'esprit critique et de curiosité scientifique qui est une condition nécessaire, pour entamer correctement les études universitaires. Par exemple, l'étudiant doit s'étonner lorsqu'il trouve que l'incertitude correspondant à la mesure d'une grandeur physique est supérieure à la valeur de cette grandeur.

e) CONCLUSION

Dans cette dernière partie les étudiants seront en mesure de résumer leurs observations en sachant répondre à diverses questions posées et de discuter de l'adéquation entre le modèle théorique et les résultats expérimentaux. Il doit aussi donner son appréciation sur les problèmes rencontrés (résolus ou non) au cours de sa manipulation.

À la fin de chaque séance, chaque binôme ou trinôme devra rendre un compte rendu complet.

Soyez curieux et inventifs ; n'hésitez pas à poser des questions à votre enseignant(e).

Avant de commencer une manipulation, faites vérifier le montage par l'enseignant.

Consignes importantes à respecter :

Le port de blouse blanche en séance de travaux pratiques est obligatoire.

L'apport d'une photo format 4x4cm de chaque étudiant est aussi obligatoire.

Les absences doivent être justifiées dans les 24 heures.

Les étudiants sont responsables du matériel coûteux qui leur est confié, ainsi ils doivent le manipuler selon le mode opératoire décrit dans le polycopié et les indications fournies en salle de T.P. par l'enseignant.

Le matériel qui vous est confié servira aussi aux autres étudiants qui vont vous succéder et que le détériorer revient à priver les futurs étudiants d'une partie de leur formation pratique.

La fin de chaque séance de travaux pratiques il faut ranger le matériel utilisé en le remettant dans l'état que les étudiants l'ont trouvé lorsqu'ils sont rentrés dans la salle de travaux pratiques.

Les étudiants qui n'auront pas observé ces consignes seront sanctionnés dans leurs notes de TP.

*Bonne séance,
Responsable des travaux pratiques.*

Professeur Abdelkader DOUDOU

Introduction

A- Incertitude sur les grandeurs physiques

Une grandeur physique peut être :

- Soit mesurée directement à l'aide d'un instrument de mesure.
- Soit calculer à partir d'autres grandeurs mesurées directement. Le calcul se fait à l'aide d'une relation qui relie la grandeur calculée avec celles mesurées.

Exemple : la largeur et la longueur d'un rectangle sont deux grandeurs que l'on mesure directement à l'aide d'une règle, tandis que la surface du rectangle est une grandeur que l'on mesure à l'aide de la relation suivante :

$$\text{Surface} = \text{longueur} \times \text{largeur}$$

Lorsqu'on mesure une grandeur physique X (longueur, temps, masse, température, ...), quel que soit le soin apporté à la mesure, on n'obtient jamais la valeur exacte X_e mais une valeur approchée ou mesurée X_m . On appelle **erreur** la différence entre la valeur mesurée et la valeur exacte ($X_m - X_e$). Mais comme on ignore la valeur exacte, on ne peut pas connaître l'erreur commise. Le résultat est donc toujours incertain. On parle des incertitudes de mesure.

Toute mesure est entachée d'une erreur qu'il est important de connaître ou tout au moins d'estimer. Pour cela il faut examiner avec un esprit très critique la mesure : l'instrument utilisé, la façon de l'utiliser, la méthode de mesure,

A.1 Origine des incertitudes

Du point de vue de leurs causes, il faut distinguer deux types d'erreurs ou incertitudes : **les erreurs systématiques** et **les erreurs accidentelles**.

A.1.1 Erreurs systématiques ou directes

Elles sont dues au mode opératoire et à la construction des instruments de mesure. Ils se produisent régulièrement, dans le même sens et avec une valeur constante.

Exemples :

- Utilisation d'un appareil mal étalonné ;
- Utilisation d'un appareil de mesures dont le « zéro » ne correspond pas à la valeur nulle ;
- Erreur de parallaxe.

On les définit comme suit :

- Erreur de l'opérateur qui dépend de la manière dont ce dernier a fait la mesure et l'a relevée à l'aide d'un appareil de mesure. Elle est limitée par les capacités visuelles du manipulateur (erreur de parallaxe, mauvais étalonnage et le « zéro » ne correspond pas à la valeur nulle).
- Erreur instrumentale due à l'imperfection des instruments de mesure (manque de fidélité et de justesse)

L'évaluation de ces deux erreurs donne l'incertitude directe de mesure de la grandeur voulue.

Si X_m est la valeur de la grandeur physique mesurée, son incertitude absolue directe sera :

$$\Delta X_m^{direct} = \Delta X_m^{opérateur} + \Delta X_m^{instrument}$$

$\Delta X_m^{opérateur}$: ne peut être évalué que par celui qui a effectué la mesure.

$\Delta X_m^{instrument}$: est indiquée sur les appareils de mesure.

A.1.2 Erreurs accidentnelles ou fortuites

Elles sont dues à un grand nombre de causes, intervenant au hasard et introduisant des fluctuations de part et d'autre de la valeur mesurée.

L'incertitude accidentelle peut être évaluée en effectuant plusieurs fois la même mesure et en prenant la moyenne arithmétique des valeurs obtenues. La valeur de cette incertitude sera donc égale à la différence entre la moyenne et la mesure qui s'en écarte le plus.

Si $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ représentent les résultats obtenus lors de n mesures identiques, alors la valeur moyenne sera :

$$a_m = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n}$$

et l'erreur accidentelle sera :

$$\Delta a = Sup |a_n - a_i| \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Dans toute mesure X_m sérieuse en physique expérimentale, l'incertitude absolue ΔX_m est évaluée en ajoutant l'incertitude accidentelle aux incertitudes systématiques :

$$\Delta X_m = \Delta X_m^{opérateur} + \Delta X_m^{instrument} + \Delta X_m^{accidentelle}$$

Les trois termes doivent être pris en compte, sauf si l'un d'eux est négligeable devant d'autres.

A.2 Erreurs absolues et erreurs relatives

A.2.1 Erreur absolue :

C'est la limite supérieure de l'incertitude. Elle représente la différence maximale entre la valeur réelle d'une grandeur et sa valeur mesurée.

Soit par exemple la grandeur X dont la valeur mesurée est X_m , si on estime avoir une incertitude maximale sur cette valeur, on écrira :

$$X = (X_m \pm \Delta X_m) \quad unité$$

X_m et ΔX_m doivent avoir la même unité.

Soit par exemple une longueur que l'on désire mesurer à l'aide d'une règle graduée en millimètres. Le résultat sera estimé au millimètre près, on aura donc :

$$\Delta L = 1 \text{ mm}$$

Si L vaut 20 cm, le résultat sera présenté de la manière suivante :

$$L = (20,0 \pm 0,1) \text{ cm}$$

A.2.2 Erreur relative

C'est le rapport entre l'incertitude absolue et la valeur mesurée de la grandeur considérée. Si X_m est la valeur mesurée de la grandeur X et ΔX_m son incertitude absolue, alors le rapport $\frac{\Delta X_m}{X_m}$ représente l'incertitude relative commise sur la mesure X_m . Parfois, cette

incertitude s'exprime en % pour cela il suffit de multiplier $\frac{\Delta X_m}{X_m}$ pour 100 et l'incertitude relative devient :

$$\left(\frac{\Delta X_m}{X_m} \times 100 \right) \%$$

L'incertitude relative caractérise la précision de la mesure. Une méthode de mesure est d'autant plus précise que son incertitude relative est faible.

Attention : L'incertitude absolue possède une unité qu'il ne faut jamais oublier de préciser. Elle doit être la même que celle de la grandeur mesurée. Tandis que l'incertitude relative, qui est le rapport de deux valeurs ayant la même unité, représente un nombre sans unité.

A.3 Erreur sur les mesures indirectes

Une mesure indirecte est une valeur que l'on calcule à partir d'une ou plusieurs mesures faites directement.

Si X_c est la valeur calculée d'une grandeur X en fonction d'autres grandeurs mesurées directement, de sorte que : $X_c=f(a,b,c,\dots)$, alors ΔX_c sera aussi fonction de Δa , Δb , Δc ,

A.3.1 Cas d'une somme (addition ou soustraction)

$$\begin{aligned} X_c &= a + b \rightarrow \Delta X_c = \Delta a + \Delta b \\ X_c &= a - b \rightarrow \Delta X_c = \Delta a + \Delta b \\ X_c &= a - b - c \rightarrow \Delta X_c = \Delta a + \Delta b + \Delta c \end{aligned}$$

Comme on ne connaît pas à priori les signes de Δa , Δb , Δc on utilisera le principe dit des incertitudes maximales, c'est-à-dire qu'on prendra toujours Δa , Δb et Δc positives.

A.3.2 Cas d'un produit (multiplication ou division)

La dérivée d'une fonction $X_c=f(a)$ est :

$$dX_c = \frac{\partial f}{\partial a} da = f'(a) da$$

Ceci implique que $dX_c=f'(a)da$, dX_c et da étant les différentielles de X_c et de a.

L'incertitude ΔX_c est obtenue en majorant les différentielles

$$\Delta X_c = |f'(a)| \Delta a$$

Dans le cas d'une fonction de plusieurs variables $X_c=f(a,b,c,\dots)$, la différentielle de X_c est :

$$dX_c = \frac{\partial f}{\partial a} da + \frac{\partial f}{\partial b} db + \frac{\partial f}{\partial c} dc = f'_a da + f'_b db + f'_c dc$$

ΔX_c s'obtient en remplaçant les "d" par "D" et en remplaçant les dérivées partielles par les valeurs absolues :

$$\Delta X_c = |f'_a| \Delta a + |f'_b| \Delta b + |f'_c| \Delta c$$

Remarque importante : Dans le cas d'un produit et pour faciliter les calculs, on utilise la fonction logarithme népérien

Exemples :

1) $X_c = a \cdot b \cdot c$

On introduit tout d'abord la fonction logarithme népérien :

$$\ln(X_c) = \ln(a \cdot b \cdot c) = \ln(a) + \ln(b) + \ln(c)$$

On différencie des deux cotés :

$$\frac{dX_c}{X_c} = \frac{da}{a} + \frac{db}{b} + \frac{dc}{c}$$

$$\Delta X_c = X_c \left(\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c} \right)$$

2) $X_c = \frac{a \cdot b}{c}$

$$\ln(X_c) = \ln(a) + \ln(b) - \ln(c)$$

$$\frac{dX_c}{X_c} = \frac{da}{a} + \frac{db}{b} - \frac{dc}{c}$$

On obtient alors :

$$\Delta X_c = X_c \left(\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c} \right)$$

3) $X_c = \frac{a \cdot b}{a + b}$

$$\ln(X_c) = \ln(a) + \ln(b) - \ln(a + b)$$

On différencie :

$$\frac{dX_c}{X_c} = \frac{da}{a} + \frac{db}{b} - \frac{da + db}{a + b}$$

On regroupe les termes en da et en db:

$$\frac{dX_c}{X_c} = da \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+b} \right) + db \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a+b} \right)$$

On majore :

$$\Delta X_c = X_c \left(\Delta a \left| \frac{I}{a} - \frac{I}{a+b} \right| + \Delta b \left| \frac{I}{b} - \frac{I}{a+b} \right| \right)$$

Remarque importante : Il faut toujours regrouper les différents termes de la différentielle avant de passer à la majoration et Δ est toujours accompagné de signe +.

4) $X_c = \frac{a^n}{b^m}$ n et m sont des entiers positifs.

On introduit la fonction logarithme népérien :

$$\ln(X_c) = \ln(a^n) - \ln(b^m)$$

$$\ln X_c = n \ln a - m \ln b$$

On différencie :

$$\frac{dX_c}{X_c} = n \frac{da}{a} - m \frac{db}{b}$$

Ensuite on majore :

$$\frac{\Delta X_c}{X_c} = n \frac{\Delta a}{a} + m \frac{\Delta b}{b}$$

A.4 Chiffres significatifs – Représentation des résultats

On appelle chiffres significatifs, les chiffres qui interviennent dans le nombre qui exprime une mesure. L'incertitude sur ce nombre nous permet de définir le nombre de chiffres significatifs associés à la grandeur mesurée. Le procédé est de ne garder que la valeur entière la plus proche de la valeur de l'incertitude si cette dernière comporte des entiers. Si elle comporte seulement des chiffres décimaux, la valeur décimale retenue sera composée des zéros et du premier chiffre décimal de façon que cette dernière valeur soit la plus proche de la valeur réelle (pour bien comprendre ce procédé, voir les exemples ci-dessous).

Exemples :

a) $X=625,32$, $\Delta X=6,2532$
 $X=(625 \pm 6)$ unité

b) $X=25,73$, $\Delta X=0,47$
 $X=(25,7 \pm 0,5)$ unité

c) $X=23,00$, $\Delta X=0,02$
 $X=(23,00 \pm 0,02)$ unité

Remarque : La valeur finale de la grandeur mesurée doit comporter le même nombre de chiffres significatifs après la virgule que son incertitude absolue (voir exemple c).

B Exploitation des résultats et tracé des graphiques

B.1. Notions générales sur le tracé des graphiques

On suppose que les expériences fournissent un tableau de valeurs de la fonction Y en fonction de la variable X. Chaque couple de valeurs (X,Y) fournit un point expérimental.

La courbe sera tracée de manière qu'elle passe le plus près possible de tous les points expérimentaux. En pratique, une infinité de courbes peuvent passer très près des points expérimentaux, et le tracé est assez délicat.

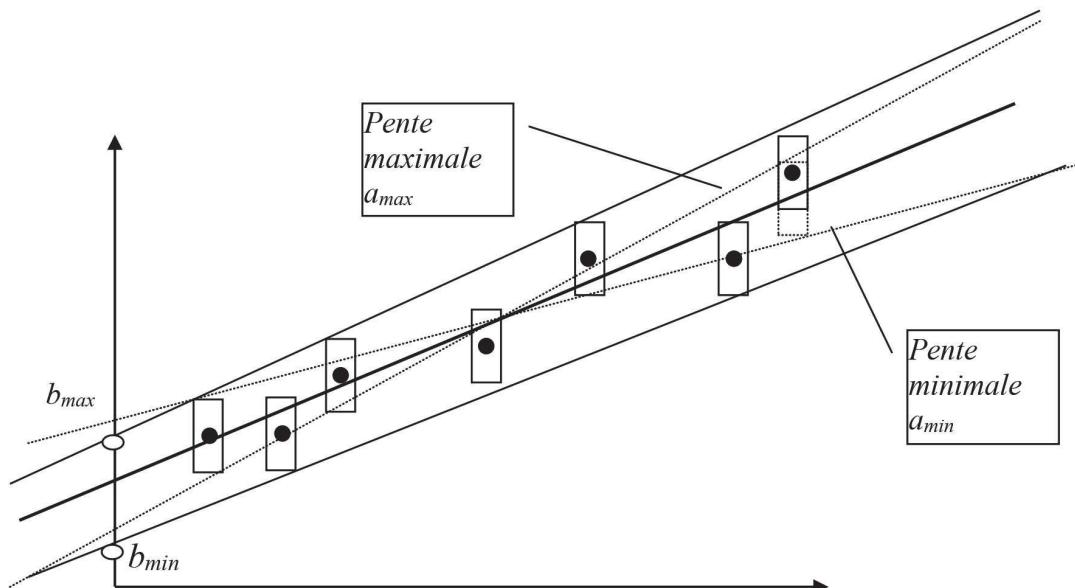
En T.P. vous vous trouvez en général en face de phénomènes sans surprise, la courbe aura une allure assez simple. Mais lorsque l'on étudie des phénomènes nouveaux, l'expérimentateur doit répéter plusieurs fois l'expérience pour assurer que telle ou telle particularité de la courbe n'est pas due à une erreur expérimentale.

Les points expérimentaux doivent être encadrés par des "rectangles d'incertitudes", centrés sur ces points expérimentaux, de côtés $2\Delta X$ et $2\Delta Y$ parallèles respectivement aux axes X et Y, ΔX et ΔY étant des incertitudes absolues sur X et Y.

Les points réels, que l'on obtiendrait s'il n'y avait aucune erreur de mesure, se trouvent à l'intérieur de ces "rectangle d'incertitudes" qui sont en fait des zones de probabilité. On fera alors passer la courbe par le maximum de "rectangle d'incertitudes".

Parfois on rencontre un point isolé, situé manifestement en dehors de la courbe : c'est un point **aberrant** qui provient d'une erreur expérimentale grossière et isolée, ou du dérèglement d'un appareil, on ne tiendra pas compte de ces points aberrants, mais on les signalera.

Les courbes seront tracées sur du papier millimétré. Sur les axes de coordonnées doivent être indiqués : le nom de la grandeur physique représentée ; l'unité et l'échelle choisie. Il est inutile de noter sur les axes de coordonnées les valeurs associées de façon que le graphique utilisé occupe la surface maximale du papier millimétré. Si les valeurs $X=0$ et $Y=0$ n'interviennent pas dans la courbe, on peut décaler l'origine des deux axes. On choisira les échelles de façon à faciliter la lecture des coordonnées d'un point quelconque de la courbe (par exemple on mettra des valeurs entières tous les cm ou tous les 5 cm ...).



Les points expérimentaux seront représentés par une petite croix ou par un point cerclé afin de les distinguer lorsque la courbe sera tracée.

B.2. Calcul de la pente et incertitude sur la pente

Dans le cas d'une droite $Y=aX+b$, les incertitudes associées à la pente a et à l'ordonnée à l'origine b peuvent être estimées.

Graphiquement :

On trace 2 droites "tunnel" encadrant les rectangles d'incertitudes. La "meilleure droite" (en gras ci-dessus) est celle située à mi-distance entre elles.

Les ordonnées à l'origine de ces droites donnent b_{min} et b_{max} . Finalement :

$$b = \frac{(b_{\max} + b_{\min})}{2}$$

$$\Delta b = \frac{|b_{\max} - b_{\min}|}{2}$$

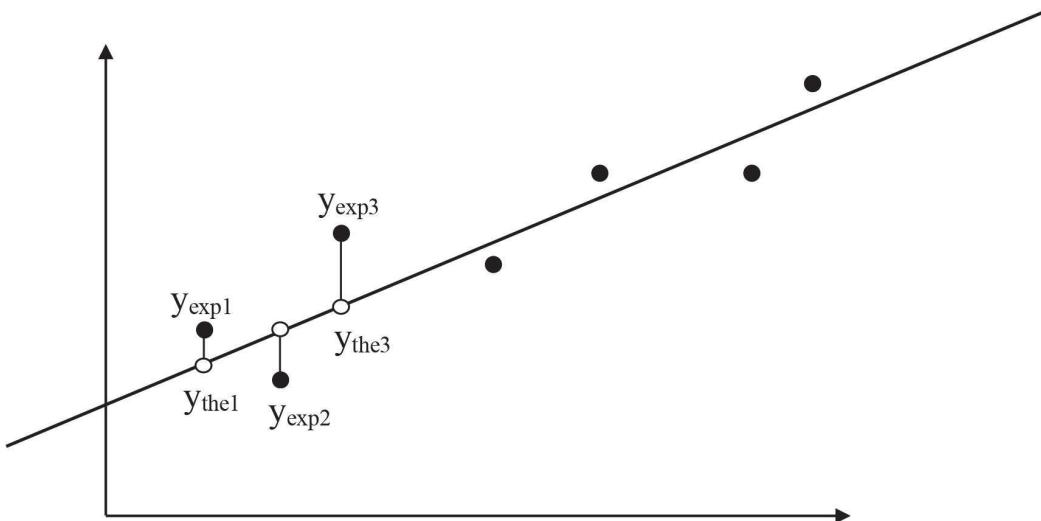
On trace 2 droites en "X" (en pointillés ci-dessus) déterminées par les rectangles d'incertitudes extrêmes et placés sur la meilleure droite (remarquer le rectangle pointillé correspondant au point de plus grande abscisse : il a été translaté sur la meilleure droite). Elles déterminent les pentes des droites en pointillés a_{\max} et a_{\min} . On estime alors :

$$a = \frac{(a_{\max} + a_{\min})}{2}$$

$$\Delta a = \frac{|a_{\max} - a_{\min}|}{2}$$

La méthode des moindres carrés.

C'est la méthode la plus fiable. Basée sur les statistiques, elle permet de faire des estimations ayant un sens mathématique précis. Nous limitons cependant la discussion aux droites pour lesquelles l'incertitude Δx négligeable devant Δy . Dans la pratique c'est souvent le cas.



Soit $y_{the}=ax_{exp}+b$ la "meilleure" droite, inconnue à priori. Elle est celle pour laquelle la somme des distances $\sqrt{(y_{exp} - y_{the})^2}$ est minimale. Il s'agit donc de la droite qui passe au plus près de l'ensemble des N points mesurés (x_{exp}, y_{exp}).

Soit $\delta y_i = y_{exp,i} - y_{the,i}$ chacune des N différences, on a $\delta y_i = y_{exp,i} - (ax_{exp,i} + b)$. Minimiser la somme des distances revient à minimiser leur carré, soit $\sum_i \{y_{exp,i} - (ax_{exp,i} + b)\}^2 = M = \text{minimum}$

On a donc simultanément :

$$\frac{\partial M}{\partial a} = 0 \text{ et } \frac{\partial M}{\partial b} = 0$$

La résolution de ce système d'équations donne :

$$a = \frac{N \sum (x_{exp,i} y_{exp,i}) - \sum x_{exp,i} \sum y_{exp,i}}{N \sum x_{exp,i}^2 - \sum (x_{exp,i})^2}$$

$$b = \frac{\sum x_{exp,i}^2 \sum y_{exp,i} - \sum x_{exp,i} \sum (x_{exp,i} y_{exp,i})}{N \sum x_{exp,i}^2 - \sum (x_{exp,i})^2}$$

Les incertitudes peuvent être estimées par les écarts types :

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (\delta y_i)^2}{N}}$$

sur les valeurs mesurées :

$$\sigma_a = \sigma_y \sqrt{\frac{N}{N \sum x_{exp,i}^2 - (\sum x_{exp,i})^2}} \approx \Delta a$$

On montre qu'alors

$$\sigma_b = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum x_{exp,i}^2}{N \sum x_{exp,i}^2 - (\sum x_{exp,i})^2}} \approx \Delta b$$

Cette méthode peut être utilisée lorsque l'on dispose d'un calculateur et que l'on désire une grande rigueur dans l'évaluation des incertitudes.

C- Utilisation d'instrument de mesure

Nous allons utiliser deux instruments de mesure :

- une règle
- un vernier

C.1. Principe d'une lecture avec vernier

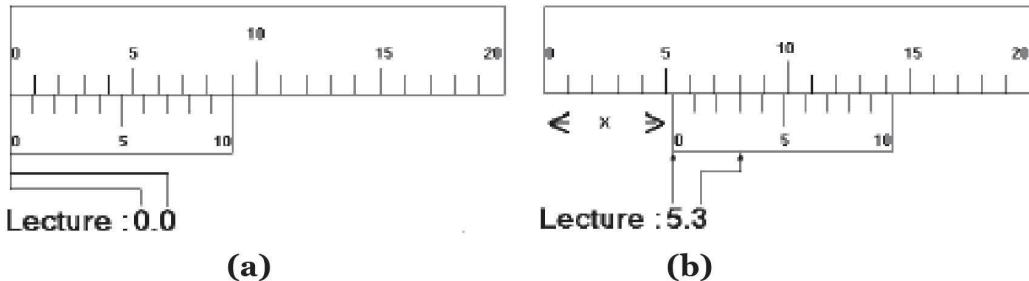
Un vernier est constitué d'une réglette mobile, r, qui se déplace le long d'une règle fixe, R. Un vernier est dit au n^{ième} si n graduations de r correspondent à n-1 graduations de R.

Soit l'exemple du vernier au 1/10 représenté sur le côté gauche de la figure ci-dessous (a), 10 graduations de r correspondent à 9 graduations de R et donc 1 graduation de r représente 9/10 division de R.

Mesure d'une longueur x : (côté droit de la figure ci-dessous (b))

On voit ici que la graduation 8 de R coïncide avec la graduation 3 de r donc :

$$8 = x + 3x9/10 \quad \text{soit } 8 = x + 2,7 \quad \text{d'où } x = 5,3 \text{ div. de R}$$



On constate que la lecture de x peut se faire **directement, sans calculs**, en repérant d'abord le 0 de r par rapport à R (ici entre les divisions 5 et 6 et plus près de 5 → $x = 5,..$ div.) puis en utilisant le vernier (ici au dixième) c'est à dire en repérant la graduation coïncidente de la règle r par rapport à R (ici la division 3 → soit $3 \cdot 1/10 = 0.3 \rightarrow x = 5,3$ div. de R).

Dans le cas d'une lecture d'angle repérer d'abord à quoi correspond une division de R : degré, demi-degré, minute, radian, puis le nombre de divisions du vernier R, ce qui permet de faire correspondre une division de R avec une unité d'angle. Ensuite repérer le zéro du vernier pour la lecture grossière de l'angle et affiner avec la précision fournie par le vernier.

Mesure d'angle :

La lecture d'un pointé angulaire " α " se fait en deux temps :

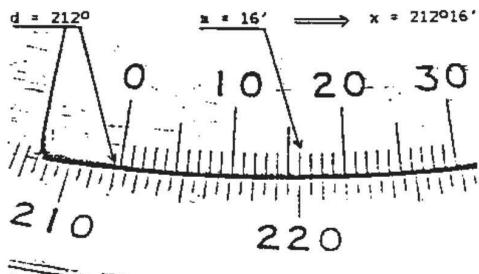
1^o) Lire sur le cercle gradué la valeur "d" (en degrés et demi-degrés) correspondant à la position du zéro du vernier.

2^o) Chercher ensuite la graduation "m" du vernier en coïncidence avec une graduation du cercle gradué (il n'y en a qu'une par construction). "m" représente les minutes puisqu'il y a 30 divisions pour un intervalle d'un demi-degré.

Le pointé angulaire vaut donc $\alpha = d + m$.

Exemple 1

Le zéro du vernier est entre les graduations 212° et $212,5^\circ$ donc $d = 212^\circ$; la coïncidence donne $m = 16'$ donc $\alpha = 212^\circ 16'$.



Exemple 1

D la Lumière

Comment verrions-nous le Monde si la couleur n'existe pas ?

- En noir en blanc ?
- En gris ?
- Ne verrions-nous que les arrêtes des formes ?
- Serions-nous dans le noir ?
- Le Monde serait-il invisible ?

Petite expérience...

Posons un cube parfaitement noir sur un fond parfaitement noir. Il y a fort à parier qu'il sera invisible. Même chose pour toute autre couleur que le noir (un cube bleu sur un fond du même bleu, etc.).

Théoriquement, bien sûr. Car vous pourriez répondre qu'un cube peint d'un seul et unique bleu ne nous paraît pas uniforme, ses faces reçoivent la lumière sous des angles différents : certaines d'entre-elles sont un peu dans l'ombre, d'autres à la lumière... La couleur d'une surface dépend donc de la façon dont elle est éclairée, et de notre position d'observateur.

Un monde sans couleurs ne serait pas un monde de gris, ni un monde où les objets seraient comme dessinés au stylo noir. Un monde sans couleurs serait parfaitement invisible. Il n'aurait d'existence que sous nos doigts, ou via nos autres sens. **La vision est la couleur.**

Mais commençons par le début...

Qu'est-ce que la couleur ?

Le Petit Larousse (en Noir et Blanc) dit – **Couleur** : impression produite sur l'œil par les diverses radiations constitutives de la lumière.

Cette courte phrase laconique indique néanmoins que pour pouvoir parler de couleur, il est nécessaire de comprendre ce qu'est la lumière et comment notre œil fonctionne.

D.1 La Lumière

La lumière, au sens commun du terme, n'est que l'infime partie visible d'un phénomène plus vaste : les ondes (ou rayonnements) électromagnétiques. Une onde électromagnétique peut se définir par sa *longueur d'onde*. C'est une grandeur qui s'exprime en unité de longueur, et qui peut varier du millionième de millionième de mètre au kilomètre. Certaines ondes sont visibles par l'œil humain, d'autres pas. Tout comme certains animaux voient un spectre différent du nôtre...

Parmi les ondes électromagnétiques qui nous sont invisibles, il y a notamment les rayons X, les ondes « radio », les ultraviolets (responsables du si beau hâle des gambettes féminines l'été), ou encore les infrarouges (que nous ne voyons pas, mais que nous pouvons ressentir sous forme de chaleur) (et ne vous y trompez pas : les appareils à infrarouges qui font de la lumière rouge...sont simplement munis d'une ampoule rouge !) : toutes ces ondes sont de même nature.

Mais alors... pourquoi ne voyons-nous pas les UV ou les ondes radio ? Parce que notre œil n'est sensible qu'aux rayonnements dont la longueur d'onde se situe grossièrement entre 0,38 et 0,75 millionièmes de mètre (0,38 à 0,75 micromètres, notés « μm »).

Selon la valeur de cette longueur d'onde, nous percevons le rayonnement comme une lumière d'une certaine couleur. Une correspondance approximative entre couleurs et longueurs d'onde est présentée dans le tableau ci-dessous.

0,400 µm	Violet
0,430 µm	Indigo
0,470 µm	Bleu
0,530 µm	Vert
0,580 µm	Jaune
0,600 µm	Orangé
0,650 µm	Rouge

Ainsi, si nous regardons une lampe qui émet une lumière de longueur d'onde $0,4\text{ }\mu\text{m}$, nous la verrons violette. Si elle émet une longueur d'onde plus petite, nous ne verrons rien : c'est en-deçà de la limite de la sensibilité de notre œil.

Lumière monochromatique, lumière composée

On appelle lumière monochromatique une lumière constituée d'une seule longueur d'onde. Par exemple, une lampe n'émettant qu'un rayonnement de longueur d'onde de $0,57\text{ }\mu\text{m}$ émet une lumière monochromatique. Elle sera perçue comme une lampe jaune. On parle de **couleur pure**.

Une lumière composée est une lumière constituée de plusieurs longueurs d'ondes. La lumière solaire, par exemple, est dite **composée** : elle est constituée d'un ensemble de rayonnements de différentes longueurs d'onde.

Une lampe émettant deux rayonnements de longueur d'onde $0,63\text{ }\mu\text{m}$ et $0,528\text{ }\mu\text{m}$ émet une lumière composée. Notre œil la percevra, là encore comme une lampe jaune !

Le mot ne vous est pas étranger, vous en avez certainement entendu parler :

Les couleurs primaires (A lire lentement...)

Les couleurs **primaires** sont la donnée d'au moins deux couleurs permettant, par leur mélange, l'obtention d'autres couleurs. On utilise généralement 3 couleurs primaires, la troisième étant choisie de telle manière qu'on ne puisse pas l'obtenir par le mélange des deux autres.

Mais, plusieurs possibilités existent pour fabriquer des couleurs :

La synthèse additive

Ce principe consiste à composer une couleur par *addition de lumière*.

Lorsque dans une pièce plongée dans le noir, on éclaire un mur blanc avec un spot rouge et un spot vert, à l'endroit où les deux faisceaux se coupent, la tache lumineuse sera jaune : c'est le résultat de la synthèse additive de la lumière rouge et de la lumière verte. La télévision, l'écran d'un ordinateur, les rayons lumineux, suivent ce principe.

Notons qu'en synthèse additive, le mélange de deux couleurs donne toujours une couleur plus lumineuse. La synthèse additive est propre aux objets émetteurs de lumière. (cas typique de votre écran d'ordinateur).

En synthèse additive, le choix couramment fait est celui de 3 couleurs primaires : le rouge, le vert et le bleu.

- 3 couleurs primaires : rouge, vert, bleu. (Noté le plus souvent **RVB**)
- L'addition des trois couleurs primaires donne du **blanc**.
- Le noir est une absence de couleur.

La synthèse soustractive

Il s'agit du principe consistant à composer une couleur par *soustraction de lumière*. Lorsque vous mélangez deux couleurs au pinceau, la couleur obtenue est le résultat d'une synthèse soustractive. L'aquarelle, les impressions sur papier (imprimantes couleurs) utilisent ce principe.

En synthèse soustractive, on nous apprend (à l'école) que les trois couleurs primaires sont le cyan (bleu clair), le magenta (rouge-rose) et le jaune.

- 3 couleurs primaires : cyan, magenta, jaune (noté le plus souvent **CMJ**)
- L'addition des trois couleurs primaires donne du **noir**.
- Le blanc est une absence de couleur.

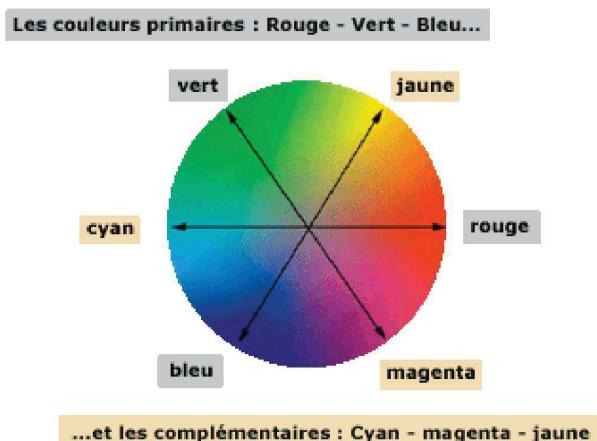
Couleur complémentaire

Une couleur est la complémentaire d'une autre si le mélange des deux donne du blanc en synthèse additive ou du noir en synthèse soustractive. **La complémentaire d'une couleur est la même dans les deux systèmes, additif ou soustractif.** La complémentaire d'une couleur primaire est une couleur secondaire.

Exemples :

- Complémentaire du jaune : bleu (bleu + jaune donne du blanc en synthèse additive, du noir en synthèse soustractive)
- Complémentaire du violet : vert citron
- Complémentaire du blanc : noir (dans ce cas particulier, n'oubliez pas qu'en synthèse soustractive, le blanc est une absence de couleur : c'est votre feuille blanche avant l'application de la gouache. L'obtention du noir se fait donc par ajout... de noir sur le fond blanc)

Roue chromatique



La roue chromatique est une disposition géométrique des couleurs primaires et secondaires sur le pourtour d'un cercle. Elle peut également contenir les couleurs tertiaires ainsi que d'autres couleurs intermédiaires ou variantes en intensité et saturation. L'ordre des couleurs permet de faire ressortir les points suivants :

- Les couleurs primaires sont disposées à 120° les unes des autres. ($3 \times 120^\circ = 360^\circ$, comme par magie.)
- Les couleurs secondaires sont entre deux couleurs primaires (le jaune à mi-distance du rouge et du vert, par exemple)

- Une couleur est toujours diamétralement opposée à sa complémentaire (le rouge au cyan, le bleu moyen à l'orange...)
- La roue chromatique est identique en synthèse additive et soustractive : ce sont les rôles des couleurs représentées qui changent (les couleurs primaires deviennent les couleurs secondaires et inversement).

D.2 Objet

Enfin nous y sommes ! Nous avons de la lumière et un œil (au moins). Il suffit maintenant de placer un objet dans notre champ de vision... Voyons comment les choses se passent...

Lumière émise, lumière diffusée

Ce que nous observons peut rentrer dans l'une des catégories suivantes :

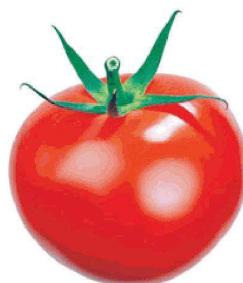
- L'objet est lui-même *émetteur* de lumière : c'est le cas d'une ampoule, de la flamme d'une bougie, du soleil, d'une surface phosphorescente...
- Il *réfléchit* tout ou partie de la lumière qu'il reçoit : la lumière arrivant sur l'objet est renvoyée par sa surface vers notre œil. La plupart des choses qui nous entourent se comportent ainsi : une table, un vêtement, un fruit, mais aussi la lune ou toute planète vue de la Terre.

L'objet peut avoir un autre comportement : il peut *transmettre* plus ou moins partiellement, plus ou moins fidèlement, la lumière reçue : celle-ci traverse la matière de l'objet, est filtrée, et continue sa route vers notre œil. Un filtre plastique coloré, une diapositive, les verres de lunettes (de vue, de soleil) en sont des exemples.

Et bien entendu, il existe des objets qui à la fois émettent et réfléchissent, ou réfléchissent et transmettent. La plupart du temps, tout objet a un comportement très complexe vis-à-vis de la lumière (l'aspect lisse, brillant ou rugueux de l'objet joue aussi un rôle important).

Mais nous allons ici nous contenter d'une jolie tomate, normale, rouge, que l'on va considérer comme simple « réflecteur ».

La tomate est rouge !

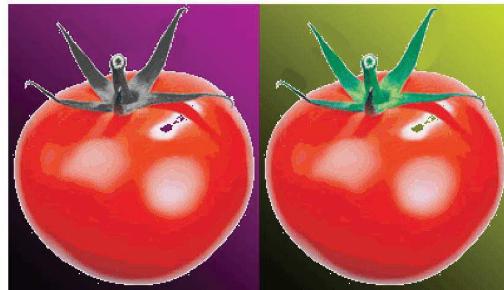


En plein jour, une tomate mûre nous paraît rouge parce que sa peau est telle qu'elle ne réfléchit que la composante rouge de la lumière qui l'éclaire.

Comme tout objet autour de nous, la tomate reçoit la lumière du soleil, plus ou moins filtrée par les nuages, plus ou moins forte, mais c'est une lumière plutôt blanche. Elle est composée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. La composition de la tomate est telle que de toute la lumière visible reçue, les parties du violet à l'orange sont absorbées, tandis qu'une partie de la composante rouge est réfléchie. C'est cette partie que notre œil voit. Pour que la tomate nous semble rouge, c'est qu'elle a absorbée les autres couleurs composant la lumière blanche.

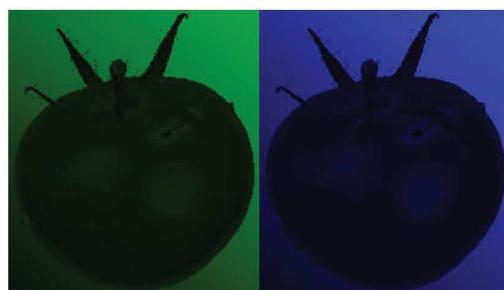
Si l'on plonge la tomate dans le noir, et qu'on l'éclaire avec un spot jaune ou magenta, le fruit nous semble toujours aussi rouge. En effet, la lumière jaune est formée de rouge et de

vert, la lumière magenta de rouge et de bleu. La tomate absorbe tout sauf le rouge : son apparence n'a donc pas changé.



Notons que la queue de la tomate – verte sous une lumière blanche – apparaît noire sous un éclairage magenta, éclairage qui ne contient pas de vert.

La tomate est noire



Éclairons maintenant cette belle tomate avec un spot vert ou bleu. Magique : la tomate paraît noire !

Pourquoi ? Parce que ni la lumière verte ni la lumière bleue ne contiennent de composante rouge. La tomate absorbe donc toute la lumière qu'elle reçoit, et ne réfléchit plus rien : elle paraît noire.

Pour la même raison, les voitures bleues dans les tunnels éclairés en jaune-orange nous paraîtront noires : ce n'est pas dû à la faible luminosité, mais bien au fait que la lumière jaune est entièrement absorbée par le capot bleu.

Il est donc compréhensible qu'un même objet présente des couleurs différentes suivant la constitution de la lumière qui l'éclaire.

Alors, quelle est la vraie couleur de cet objet ? La couleur n'est pas vraiment une caractéristique d'un objet, c'est uniquement le résultat de l'action de la lumière sur sa surface. Parler de la couleur intrinsèque d'un objet n'a aucun sens !

Hors la lumière, point de salut ?

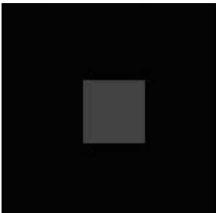
Souvenons-nous que ce qu'on appelle « lumière » n'est que la partie visible des ondes électromagnétiques. En effet, les objets peuvent aussi émettre ou réfléchir des ondes qui nous sont invisibles. En regardant des photos prises avec des pellicules infrarouges, sur lesquelles les feuilles des arbres sont blanches, on comprend que la feuille réfléchit non seulement le vert, mais aussi des infrarouges.

Perception des couleurs

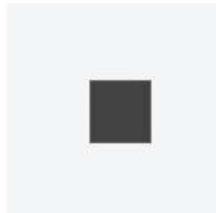
Contrairement à ce que l'on pourrait penser, notre œil ne voit pas la même couleur toujours de la même manière. L'environnement a une forte influence sur notre vision. Notre perception des couleurs est toujours faussée, parce que lorsque l'on regarde un objet, l'œil a tendance à « mesurer », à comprendre, à évaluer sa couleur en fonction de la scène qui l'entoure. Tout est affaire de **contrastes**. Pour montrer l'effet de l'environnement sur la perception d'une couleur, examinons les cas présentés ci-dessous.

Contraste de luminosité

Le contraste des luminosités est probablement l'élément le plus perturbant pour la « lecture » des couleurs. Notre œil s'adapte à l'intensité lumineuse moyenne d'une scène. Dans un environnement très clair, la pupille se ferme pour « réguler » le flux de lumière reçue. Dans l'obscurité, la pupille s'ouvre plus (Comme les chats, oui !). Conséquence immédiate: la même couleur sera perçue plus foncée sur un fond clair que sur un fond sombre.

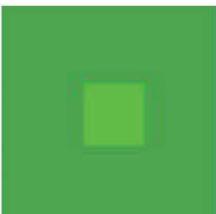


Le carré central semble d'un gris plus foncé à droite qu'à gauche

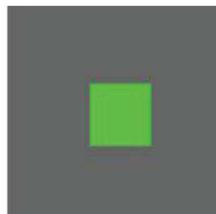


Contraste de saturation

C'est un autre facteur jouant sur notre perception des couleurs. Par une action d'opposition, nous évaluons la vivacité d'une couleur en fonction de la scène environnante. Une même couleur semble plus pâle si elle est entourée de couleurs soutenues que si elle est isolée dans un ensemble globalement fade, passé.



Le carré central de gauche paraît-être plus vif à droite qu'à gauche



Contraste de teinte

Toujours par action d'opposition, nous estimons la teinte d'une couleur en fonction des teintes environnantes. Un même jaune paraîtra froid s'il est entouré de couleurs chaudes, et vice-versa. Cet effet est d'autant plus sensible que la couleur est peu saturée.

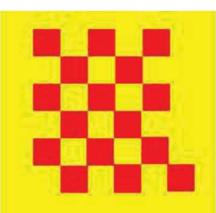


Le "V" de gauche semble bleu, car entouré de vert, celui de droite tire sur le vert, car entouré de bleu

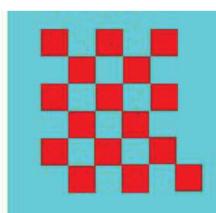


Contraste simultané

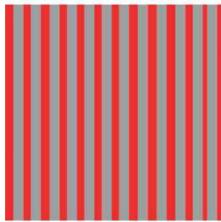
Jouant également sur notre perception des couleurs, ce phénomène fait intervenir les couleurs complémentaires. Si nous regardons une teinte, notre œil « exige simultanément » sa couleur complémentaire. De fait, deux couleurs complémentaires juxtaposées vont se renforcer l'une l'autre.



Le damier rouge ressort plus à droite sur le CYAN (qui est sa couleur complémentaire), qu'à gauche.

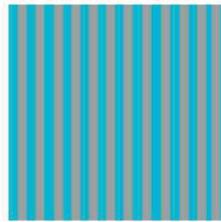


Le contraste simultané explique aussi qu'un gris, un blanc ou un noir nous semblent légèrement teintés de la couleur complémentaire à celle qui leur est voisine.



Les rayures grises de gauche semblent froides, bleuâtres, associées à des rayures chaudes (rouges).

A droite, les rayures grises semblent rosâtres, associées à des rayures froides (bleues)



L'environnement

Rappelons enfin que la couleur n'est pas une caractéristique *propre* d'un objet. Elle dépend de la qualité de la lumière qui l'éclaire. L'objet ne réagira pas de la même manière à la lumière du soleil et à celle diffusée par un néon. Un papier-peint soigneusement choisi dans un magasin pourra présenter une teinte différente une fois posé dans notre cuisine...

Interférences Lumineuses

Théorie

1) Introduction

Les phénomènes d'interférences résultent de la superposition de deux ou plusieurs ondes lumineuses. Ils ne peuvent se produire que lorsque les ondes lumineuses qui interfèrent sont parallèles et cohérentes spatialement et temporellement.

Pour avoir ces conditions vérifiées, nous partons en pratique d'une même source lumineuse, dont nous divisons l'onde à l'aide de dispositif optique convenable appelé séparateur de faisceau. Ces séparateurs de faisceau sont classés en deux catégories

a- Diviseurs de front d'onde

La division du faisceau par séparation du front d'onde consiste à sélectionner dans l'onde incidente deux (ou plusieurs) parties souvent à l'aide d'un écran percé de trous ou de fente. Les **trous de Young** en sont l'exemple le plus connu.

b- Diviseurs d'amplitude

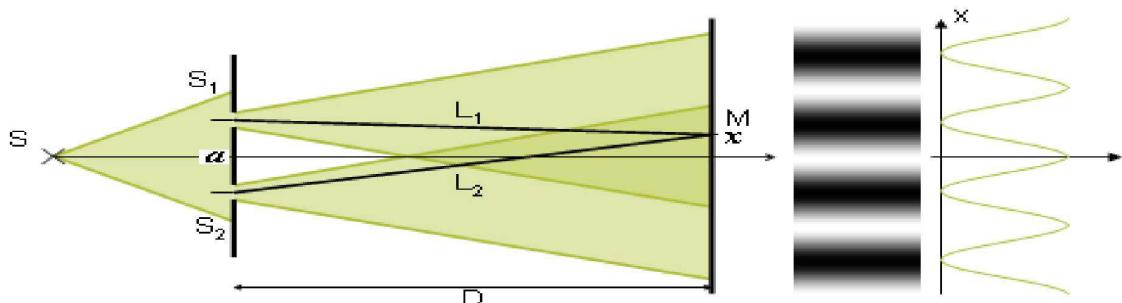
Dans cette deuxième catégorie, sont utilisées des substances capables de séparer l'onde incidente en deux (ou plusieurs) ondes émergentes. Le plus simple dispositif à diviseur d'amplitude est la **lame semi-transparente**, dite aussi **semi-réfléchissante**, constituée d'une couche mince métallique déposée sur un support transparent en verre ou en film plastique.

Le but de cette manipulation est d'étudier le phénomène d'interférence obtenu par deux dispositifs à division du front d'onde (Fentes de Young et Bi-prisme de Fresnel). Pour chacun de ces dispositifs l'effet de non-cohérence spatiale sur la luminosité est vérifié. La figure d'interférence est exploitée pour déterminer la longueur d'onde d'une source lumineuse monochromatique et pour mesurer l'angle d'un bi-prisme.

2) Dispositif des trous de Young

C'est au tout début du XIX^e siècle que Young a observé les interférences lumineuses pour la première fois en construisant un dispositif (interfémètre) qui divise, puis superpose la lumière issue d'une seule source.

Les deux fentes S_1 et S_2 perpendiculaires au plan de la figure, sont éclairées par une source monochromatique S , équidistante de S_1 et de S_2 .



Le dispositif des trous de Young fait interférer deux ondes ayant subi des trajets optiques différents :

$$L_1 = S_1 M = n \cdot d_1 \rightarrow \phi_1 = k \cdot L_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_1$$

$$L_2 = S_2 M = n \cdot d_2 \rightarrow \phi_2 = k \cdot L_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_2$$

$$\phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (d_1 - d_2)$$

L_1 et L_2 sont les chemins optiques entre S_1M et S_2M respectivement, comme on est dans l'air donc l'indice $n=1$, on a alors $L_1=d_1$ et $L_2=d_2$.

On exprime $S_2M - S_1M$ au point M , de coordonnées (x,y) situé au voisinage de O sur un écran placé à la distance D du plan des sources S_1 et S_2 .

- a) On note $a=S_1S_2$.
- b) On suppose $a \ll D, |x| \ll D$

On aura facilement :

$$S_2M - S_1M \approx \frac{a \cdot x}{D} \Rightarrow \delta = \frac{a \cdot x}{D}$$

On obtient donc des franges **quasi rectilignes**, perpendiculaires à l'axe S_1S_2 .

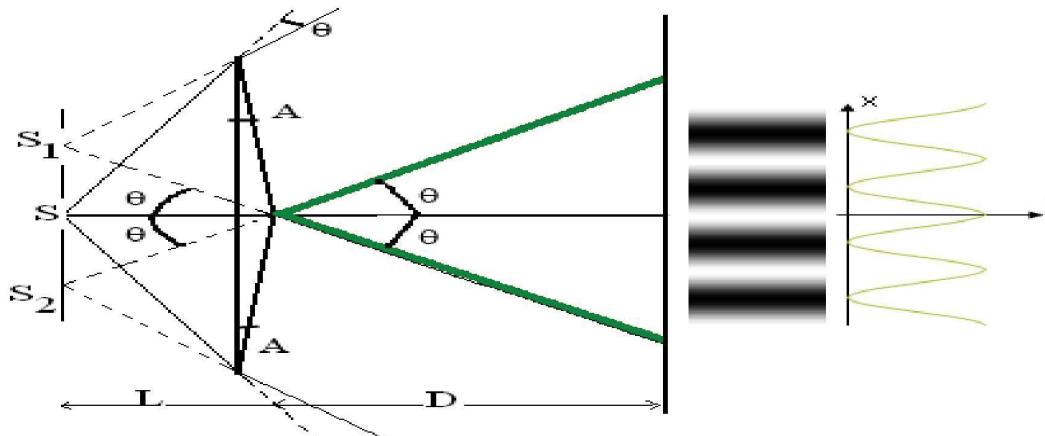
L'interfrange s'écrit :

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{a}$$

Où λ est la longueur d'onde dans le milieu considéré de la radiation étudiée. i étant constante, les **franges sont équidistantes**.

3) Bi-Prisme de Fresnel

Éclairé par une source lumineuse S , le dispositif fournit deux images virtuelles S_1 et S_2 .



L'étude du phénomène d'interférence se ramène très facilement à celle des **Trous de Young**. Il faut juste se rappeler que le passage de la lumière à travers un prisme d'angle A est caractérisé par la déviation $\theta=(n-1)A$.

L'écart entre les deux sources S_1 et S_2 est donné par : $a=2L \tan(\theta)=2L \tan((n-1)A)$ ou encore $a \approx 2L\theta = 2L(n-1)A$, A étant très petit, où L est distance entre la fente réglable et le biprisme et D est la distance entre le biprisme et l'écran d'observation.

D'où l'interfrange dans le cas du biprisme de Fresnel est :

$$i=\frac{\lambda(D+L)}{a}=\frac{\lambda(D+L)}{2L(n-1)A}$$

TP- interférences I

Bi-fente de Young

But

Le but de ce TP est l'observation et l'étude du phénomène d'interférence à l'aide des fentes de Young. L'exploitation des figures d'interférence permettra de déterminer l'écart entre les fentes de Young a et les longueurs d'ondes des lumières monochromatiques utilisées λ .

Manipulation

a) Aspect des franges en lumière blanche.

Réaliser le montage schématisé sur la figure 1, en prenant comme source de lumière la lampe de lumière blanche. Le système de la lampe contient une lentille convergente. Former premièrement l'image du filament de la lampe sur la double fente de Young soit en déplaçant le curseur du système de la lampe ou en déplaçant la bifente sur le banc optique. On placera en suite l'écran suffisamment loin (D de l'ordre de $1m$) des deux fentes diffractant afin d'être dans les conditions qui permettent de mesurer aisément l'interfrange.

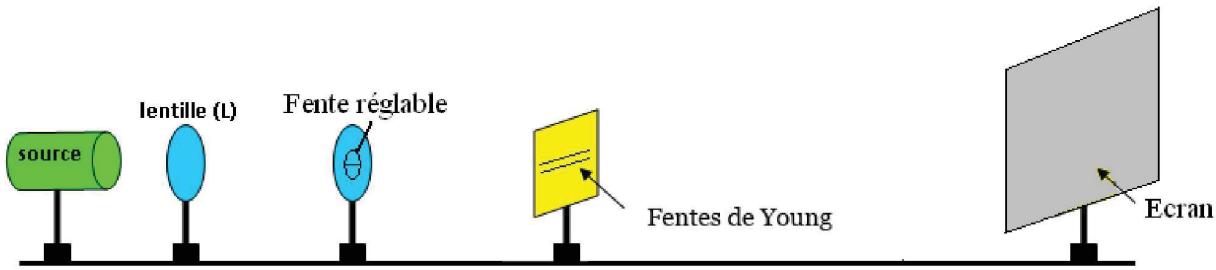


Figure 1 : Montage des interférences par une bifente de Young.

- 1.- Décrire la figure d'interférence et la représenter sur votre compte rendu ?
- 2.-Quelle est la nature de la frange centrale ?
- 3.-Pourquoi les franges d'interférence sont de plus en plus irisées lorsqu'on s'éloigne du centre
- 4.-Que se passe-t-il lorsqu'on élargit la fente réglable ? Interpréter ?
- 5.-En déplaçant l'écran, montrez que les interférences sont non localisées ?
- 6.-Réaliser une légère translation de la fente réglable, Comment évolue la figure d'interférence ?

b) Vérification de la relation $i=\lambda D/a$ (en utilisant un filtre)

Insérer le filtre rouge sur l'axe optique. Quelle différence observe-t-on par rapport à la figure d'interférence obtenue en lumière blanche. Pour 5 à 6 valeurs de D , mesurer l'interfrange i . Pour augmenter la précision de la mesure, mesurer l'écart entre plusieurs franges, sachant que la longueur d'onde de la lumière monochromatique rouge est de $0,650 \mu\text{m}$.

$D \text{ (cm)}$						
$i \text{ (mm)}$						

Remarque : Attention aux unités !

1.-Comment établit-on la relation $\mathbf{i}=\lambda\mathbf{D}/\mathbf{a}$, refaire la démonstration.

2.-Tracer : $\mathbf{i}=f(\mathbf{D})$

3.-Tracer avec une règle les 2 droites de pente extrême et déterminer leur pentes p_1 et p_2 .

4.-Déterminer la pente moyenne p et Δp . de la droite tracée.

5.-En déduire l'écart entre les fentes de la bifente \mathbf{a} et l'erreur $\Delta\mathbf{a}$.

Insérer maintenant le filtre vert sur l'axe optique. Pour 5 à 6 valeurs de D , mesurer l'interfrange i . Pour augmenter la précision de la mesure, mesurer l'écart entre plusieurs franges.

D (cm)						
i (mm)						

6.-Tracer : $\mathbf{i}=f(\mathbf{D})$

7.-Tracer avec une règle les 2 droites de pente extrême et déterminer leur pentes p_1 et p_2 .

8.-Déterminer la pente moyenne p et Δp . de la droite tracée.

9.-En déduire la longueur d'onde λ et l'erreur $\Delta\lambda$.

TP- interférences II

Bi-Prisme de Fresnel

But

Le but de ce TP est l'observation et l'étude du phénomène d'interférence à l'aide du bi-prisme. L'exploitation des figures d'interférence permettra de déterminer les grandeurs caractéristiques du bi-prisme comme l'indice de réfraction n et l'angle du biprisme A .

Manipulation

a) Aspect des franges en lumière blanche

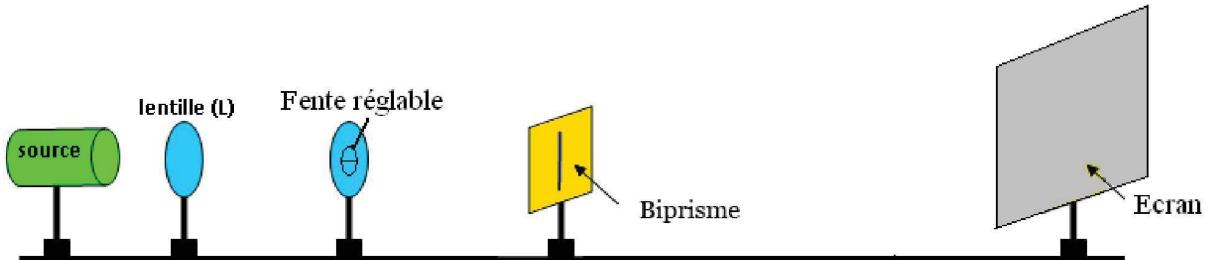


Figure 1 : Montage des interférences par un bi-prisme.

Reprendre le montage de l'interférence par la bifente de Young en remplaçant la bi-fente de Young par un bi-prisme de Fresnel (figure 1). L'arrête du bi-prisme doit être parfaitement parallèle à l'ouverture de la fente réglable. L'écran doit être placé suffisamment loin (D de l'ordre de $1,5m$) du dispositif du bi-prisme.

- 1.- Décrire la figure d'interférence et la représenter sur votre compte rendu ?
- 2.-Quelle est la nature de la frange centrale ?
- 3.-Pourquoi les franges d'interférence sont de plus en plus irisées lorsqu'on s'éloigne du centre ?
- 4.-Que se passe-t-il lorsqu'on élargit la fente réglable ? Interpréter ?
- 5.-En déplaçant l'écran montrez que les interférences sont non localisées ?
- 6.-Réaliser une légère translation de la fente réglable, Comment évolue la figure d'interférence ?

b) Mesure de l'indice de réfraction et de l'angle du bi-prisme

- 1.- Coller maintenant le filtre (vert ($\lambda_v=0,530 \mu m$)) ou rouge ($\lambda_r=0,650 \mu m$)) à la surface de la fente réglable. Comment évolue la figure d'interférence ?
- 2.-Mesurer, sur N franges brillantes, l'interfrange i (prendre N le plus grand possible). On obtient une distance $X=(N-1) i$, puis i . L'interfrange i est la distance entre deux franges successives brillantes ou sombres. En prenant $\Delta X=2 \text{ mm}$, déduire la valeur de l'erreur Δi .
- 3.-Mesurer D et L .
- 4.-Calculer n l'indice de réfraction du biprisme à partir de la formule de l'interfrange (l'angle du biprisme $A=45'$).
- 5.-Calculer Δn en négligeant ΔA et $\Delta \lambda$ et en prenant $\Delta D=\Delta L=2 \text{ mm}$.
- 6.-Calculer A l'angle du biprisme à partir de la formule de l'interfrange (l'indice du prisme $n=1,5$)

Phénomènes de Diffraction

Théorie

La diffraction est un phénomène responsable de la déviation de la lumière traversant une ouverture de taille assez faible (figure 1). Typiquement, si la taille de l'ouverture est a et la longueur d'onde de la lumière est λ , la diffraction produit une ouverture angulaire du faisceau lumineux de l'ordre de $\theta \approx \lambda/a$ (en radian), soit une tache de taille $\approx \lambda D/a$ à une distance D de l'ouverture diffractante. Ainsi l'angle de déviation de la lumière diffractée est proportionnel à λ et inversement proportionnel à a l'ouverture diffractante.

La forme et la taille exactes de la tache de diffraction dépendent de la forme et de la taille de l'ouverture diffractante (trou rectangulaire, fente fine, fente circulaire...), mais il est important de retenir cet ordre de grandeur, qui reste valable dans tous les cas (plus loin, on détaillera quelques exemples concrets).

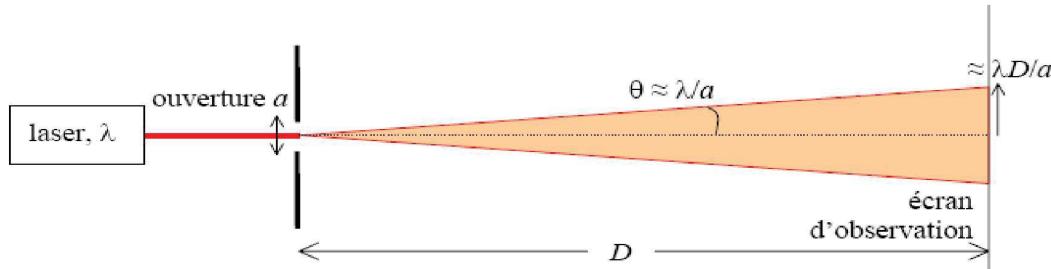


Figure 1

1) Influence de la taille de l'objet diffractant

L'angle de diffraction θ est inversement proportionnel à la taille caractéristique de l'objet diffractant. Plus l'objet diffractant est fin, plus l'angle de diffraction est grand, **mais il n'est pas nécessaire d'avoir une ouverture de taille de l'ordre de la longueur d'onde** pour que la diffraction soit observable. Elle peut l'être même si l'objet diffractant est nettement plus grand que la longueur d'onde de la lumière ($>>\lambda$). Par exemple, un objet de taille $50\mu\text{m}$ (environ 100 fois plus grand que la longueur d'onde), diffractera dans un angle de l'ordre de 0.01 rad, ce qui donnera une tache lumineuse de taille **1cm à 1m** de distance, tout à fait mesurable.

2) Influence de la longueur d'onde de la lumière

L'angle de diffraction est proportionnel à la longueur d'onde. Il sera donc différent pour différentes couleurs du spectre visible. Si on éclaire un objet diffractant avec de la lumière monochromatique (une seule longueur d'onde) de couleur rouge ($\lambda \approx 650\text{nm}$) puis bleue ($\lambda \approx 450\text{nm}$), on observera une tache plus grande pour le rouge que pour le bleu (environ 1.5 fois). Si on éclaire l'objet avec de la lumière blanche, contenant l'ensemble des longueurs d'onde du spectre visible, les couleurs seront séparées dans l'espace (dispersion). On observera donc un effet d'**irisation**, un peu comme avec un prisme de verre.

3) Quelques cas particuliers

h) Diffraction par une fente rectangulaire de largeur a et de hauteur b ($b >> \lambda$) (figure 2).

L'intensité diffractée sur l'écran est :

$$I(\theta) = I_0 \sin c^2 \left(\frac{\pi a \theta}{\lambda} \right)$$

Où la fonction **sinc**, appelée **sinus cardinal** est définie par $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$. La diffraction a lieu uniquement dans la direction perpendiculaire à la fente. La plus grande

partie de la lumière se trouve concentrée dans la tache centrale de diffraction, de largeur totale (dans l'approximation des petits angles) ($2\lambda D/a$).

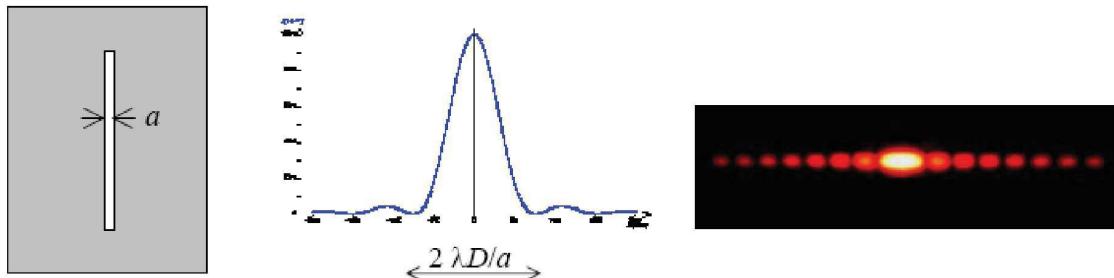


Figure 2

i) Diffraction par un trou circulaire de diamètre a (figure 3)

L'intensité diffractée sur l'écran est donnée par une fonction appelée fonction **d'Airy**, qui a une forme assez similaire au *sinc*. La diffraction a lieu dans toutes les directions, la tache centrale de diffraction a un rayon ($1,22\lambda D/a$).

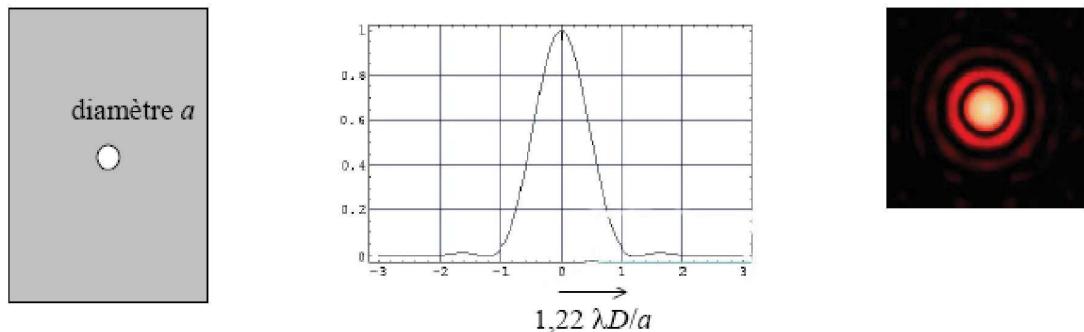


Figure 3

j) Diffraction par un réseau

On appelle un **réseau de diffraction**, un dispositif optique constitué d'une série de fentes parallèles (réseau en transmission) **figure 4a**, ou de rayures réfléchissantes (réseau en réflexion) **figure 4b**. Ces traits sont espacés de manière régulière, l'espacement est appelé le « pas » du réseau, noté a .

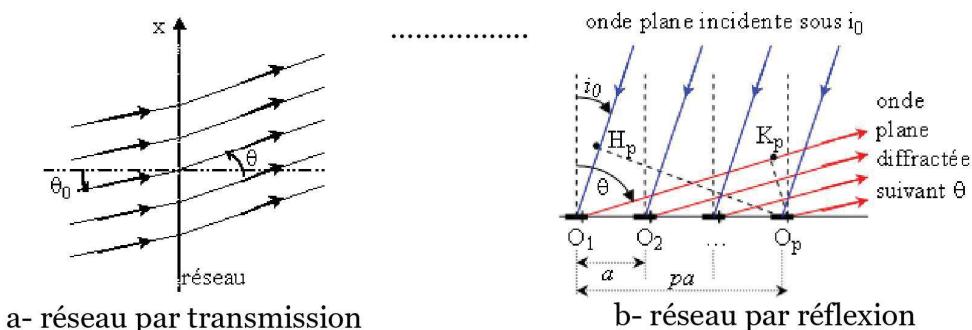


Figure 4

Si la distance entre les traits est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière ($a \approx \lambda$), le réseau permet d'obtenir des figures de diffraction :

- Si l'on envoie de la lumière blanche, le réseau décompose la lumière un peu à la manière d'un prisme ; c'est le phénomène qui se produit sur les disques compacts, la lumière est diffractée par les variations qui forment les bits et qui jouent le rôle des traits du réseau;
- Si l'on envoie une seule longueur d'onde (lumière monochromatique), le réseau réfléchit plusieurs taches ; la direction de réflexion des taches dépend de la distance entre les traits et de la longueur d'onde.

La différence de marche :

Lorsqu'un réseau est éclairé par une lumière incidente monochromatique sous un angle d'incidence i (**figure 5**), la lumière diffractée par les traits du réseau à une distance D présente des maxima d'intensité dans les directions θ .

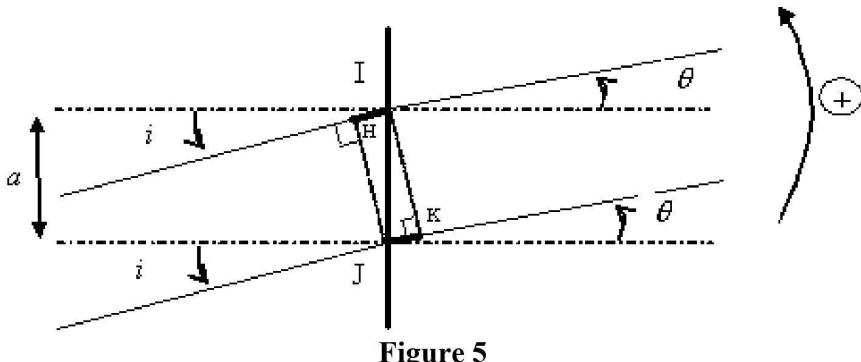


Figure 5

La différence de marche entre le trajet de l'onde qui passe par la $n^{\text{ième}}$ fente et la $(n+1)^{\text{ième}}$ fente vaut :

$$\delta = JK - HI = a \sin \theta - a \sin i$$

La direction de ces maxima principaux est donnée par :

$$k\lambda = a(\sin \theta_k - \sin i)$$

Nous obtenons la **relation des réseaux** qui indique comment le réseau disperse la lumière :

$$\sin \theta_k - \sin i = +\frac{k\lambda}{a} = +kn\lambda$$

En cas d'incidence normale ou quasi-normale ($i=0$) :

$$\sin \theta_k = +\frac{k\lambda}{a} = +kn\lambda$$

Dans le cas du réseau de diffraction, k s'appelle l'ordre de la diffraction et θ_k l'angle de la diffraction.

Pour les valeurs de k positives, θ_k sera en dessous de la normale.

Remarque :

- Les angles i et θ_k sont comptés positivement dans le sens trigonométrique (sens direct).
- Écrire $\sin i - \sin \theta_k = kn\lambda$ revient à changer le signe de l'ordre de la diffraction.

Ainsi, à chaque entier k correspond un ordre de diffraction caractérisé par l'angle θ_k :

$$\tan \theta_k = \frac{x_k}{D}$$
 (**figure 6**):

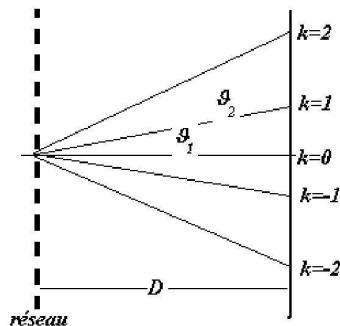


Figure 6

Étude des différents ordres

Pour $k = 0$:

Nous obtenons le prolongement du faisceau incident quelle que soit la longueur d'onde utilisée et quel que soit l'angle d'incidence. Il n'y a pas de dispersion de la lumière.

Pour $k \neq 0$:

La position des maxima dépend de la longueur d'onde : $\theta = f(\lambda)$

N réseau disperse la lumière

- ✓ $k = 1$: nous avons la raie à l'ordre 1.
- ✓ $k = 2$ et au-delà Il s'agit alors des raies d'ordre supérieur.

Remarque : La dispersion est proportionnelle à la longueur d'onde. Inversement à un prisme, **le bleu est ici moins dévié que le rouge**.

Exemple : Un réseau de 500 traits par millimètre est utilisé **sous incidence normale** ($i = 0$) avec une source de longueur d'onde 600 nm. Calculer les positions des maximums principaux.

Réponse : Pour $i = 0$; $\theta_1 = -17,5^\circ$; $\theta_2 = -36,9^\circ$; $\theta_3 = -64,2^\circ$; $\theta_4 = \text{impossible}$
Pour les ordres négatifs les angles sont positifs et ont même valeur absolue.

Commentaire : À longueur d'onde donnée, **le nombre d'ordre qui peut apparaître est limité par le pas du réseau**. Le nombre d'ordres visibles est d'autant plus faible que le pas du réseau est petit.

En lumière monochromatique, nous obtenons des raies très fines, parallèles aux fentes du réseau et correspondant aux différentes valeurs de l'ordre k .

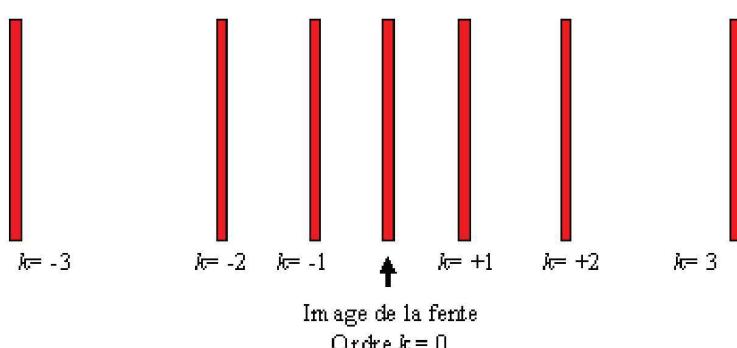


Figure 7 : Dispersion d'un réseau vue de face en lumière monochromatique.

Cas de la lumière blanche :

L'incidence étant normale, si au lieu d'une lumière monochromatique nous utilisons une lumière complexe (blanche par exemple), nous obtenons :

- ➊ Une tache centrale non décomposée ($k = 0 \Leftrightarrow \theta = i$)
- ➋ Une double série de spectres dits du premier ordre ($k = 1$) du second ordre ($k = 2$) etc. à moins que les spectres d'ordre supérieur soient impossibles à visualiser.

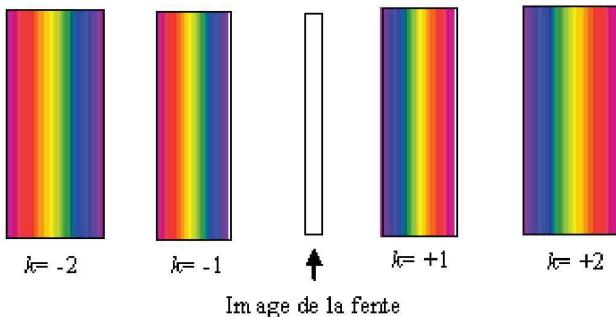


Figure 8: Dispersion d'un réseau vue de face en lumière polychromatique.

Exemples :

Nous prendrons un réseau de 500 traits/mm ($5 \cdot 10^5$ traits/m) ; soit $a = 2 \cdot 10^{-6}$ m

Premier exemple : Considérons une incidence $i = 45^\circ$ et l'ordre $k = 3$.
Calculons les angles d'émergence pour différentes longueurs d'ondes du spectre visible.

$\lambda = 450$ nm	$\lambda = 500$ nm	$\lambda = 550$ nm	$\lambda = 600$ nm	$\lambda = 650$ nm
$\theta = +1,84^\circ$	$\theta = -2,46^\circ$	$\theta = -6,77^\circ$	$\theta = -11,12^\circ$	$\theta = -15,53^\circ$

Commentaire :

Le rouge est plus dévié que le bleu.

L'écart angulaire du spectre s'appelle la **dispersion angulaire** : $\Delta D = 13,70^\circ$

Second exemple : Considérons une incidence $i = 45^\circ$ et l'ordre $k = 4$. Calculons les angles d'émergence pour différentes longueurs d'ondes du spectre visible.

$\lambda = 450$ nm	$\lambda = 500$ nm	$\lambda = 550$ nm	$\lambda = 600$ nm	$\lambda = 650$ nm
$\theta = -11,12^\circ$	$\theta = -17,03^\circ$	$\theta = -23,13^\circ$	$\theta = -29,53^\circ$	$\theta = -36,36^\circ$

L'écart angulaire est maintenant $\Delta D = 25,24^\circ$

Commentaire : On constate que la **dispersion augmente avec l'ordre de diffraction** et que **deux spectres peuvent se superposer**. De plus, plus l'ordre du spectre est grand, plus la luminosité est faible.

Autre exemple : Un réseau comporte 1200 traits/mm et est éclairé sous incidence rasante. Il constitue la partie principale du monochromateur d'un spectrophotomètre d'absorption travaillant de 190 à 800 nm. Quels sont les angles d'émergence correspondant aux limites du spectre pour l'ordre 1 et pour l'ordre 2 ? Pourquoi faudrait-il utiliser un filtre ? Dans quel domaine du spectre ?

Superposition des spectres

Il peut apparaître pour certaines valeurs de k . En effet, lorsqu'une même direction correspond, pour deux valeurs de k différentes à deux longueurs d'ondes différentes, la juxtaposition des deux longueurs d'ondes risque de se produire.

A partir de quel ordre k cet empiètement commence-t-il ?

$k\lambda_1 \geq (k+1)\lambda_2$ où λ_1 et λ_2 sont les longueurs d'ondes extrêmes du spectre visible.

La longueur d'onde du rouge du spectre d'ordre k empiète sur le violet du spectre d'ordre $(k + 1)$. Le calcul nous permet d'obtenir $k = 1,05$. La valeur minimale de k correspond à l'entier immédiatement supérieur : $k = 2$. L'empiètement commence entre les spectres du 2e et du 3e ordre.

La pouvoir de résolution du réseau :

En vertu du critère de Rayleigh, la diffraction limite la possibilité de séparer deux longueurs d'ondes trop proches l'une de l'autre. Il en découle un écart minimum entre deux longueurs d'onde voisines. Le pouvoir de résolution est défini comme le rapport :

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

La demi-largeur angulaire de la tache centrale de diffraction dans le cas d'un réseau vaut :

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{Na}$$

où N est le nombre total de traits ou de fentes éclairés du réseau.

Remarque : Le produit $L=Na$ représente la largeur éclairée du réseau.

L'écart minimum qui évite le recouvrement de deux radiations séparées de $\Delta\lambda$ est :

$$\Delta D \approx \frac{k}{a} \Delta\lambda$$

Le critère de Raleigh s'écrit : $\Rightarrow (\Delta\lambda)_{\text{diffraction}} = \frac{\lambda}{Nk}$

Le pouvoir de résolution théorique d'un réseau de diffraction s'exprime donc par :

$$R_k = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN$$

Ou encore :

$$R_k = k \frac{L}{a} = kLn$$

n est le nombre total de traits ou de fentes du réseau.

Exemple :

Pour $n = 500$ traits/mm ; $L = 2$ cm ; $k = 4$ et $\lambda = 500$ nm, nous obtenons :

$R = 40\ 000$ et $\lambda = 0,0125$ nm

$$R_k = \frac{L}{\lambda} (\sin \theta_k - \sin i).$$

Si $i=0$ (incidence normale), alors :

$$R_k = \frac{L}{\lambda} \sin \theta_k \approx \frac{L}{\lambda} \theta_k$$

TP- diffraction I

Fente, Fil et Trou

But

Le but de ce TP est l'observation et l'étude du phénomène de diffraction à l'aide de différents dispositifs optiques : fentes, trous et obstacle. L'exploitation des figures de diffraction permettra de déterminer les grandeurs caractéristiques des objets diffractant.

Manipulation

a) Diffraction par une fente réglable

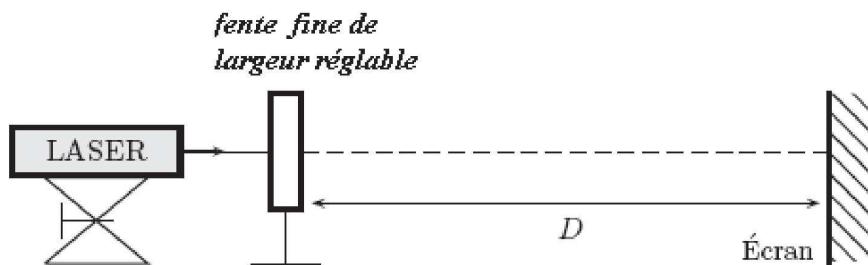


Figure 1 : Montage de la diffraction par une fente réglable.

Réaliser le montage de la figure 1, en plaçant verticalement une fente métallique de largeur réglable **a** près de la source laser. En situation optimale d'obtention de la figure de diffraction,

1-Représenter ce qui est observé sur l'écran.

2-Effectuer une rotation et noter vos observations.

3-Faire varier la largeur de la fente diffractant **a**. Quelle est l'influence de la largeur de la fente **a** sur la figure de diffraction et expliquer.

4-Mesurer précisément la largeur de la tache centrale de diffraction et la largeur d'une tache secondaire et conclure.

5-Faire varier la distance **D**. Quelle est l'influence de la distance **D** sur la figure de diffraction.

6-Mesurer la distance **X_{max}** correspondante au nombre maximum de franges sombres **N_{max}** observables sur l'écran translucide et remplir le tableau :

D (m)	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
N _{max}						
X _{max} (mm)						
i (mm)						
Δi (mm)						
a (mm)						
Δa (.....)						

7-Tracer la courbe **i=f(D)** (sur le papier millimétré). Quelle est l'allure de la courbe ?

8-Calculer les pentes des droites extrêmes et déduire la pente **p** et le Δp .

9-Quelle est la relation entre **p** et la largeur **a** de la fente diffractant.

10-Calculer la largeur a de la fente diffractant et son incertitude Δa .

Remarque : Les erreurs de lecture se font des deux côtés sur l'écran comme sur le banc. Ainsi, on prend $\Delta X_{\max}=2$ mm.

b) Mesure du diamètre d'un fil métallique (Expérience de Grimaldi)

Éclairer le fil de diamètre a avec le rayon laser et observer la tache de diffraction sur un écran placé à la distance $D=1,5$ m. La largeur de la tache centrale d est donnée par :

$$d = \frac{2\lambda D}{a}$$

- 1- Calculer le diamètre du fil après avoir mesuré précisément d . Prenez la distance $D=1$ m,
- 2- Mesurer, de nouveau, la largeur de la tache centrale d et calculer la valeur de la longueur d'onde.

TP- diffraction II

Réseau, CD et DVD

But

Le but de ce TP est l'observation et l'étude du phénomène de diffraction à l'aide d'un réseau par transmission ou par réflexion. L'exploitation des figures de diffraction permettra de déterminer les grandeurs caractéristiques des objets diffractant.

Manipulation

a) Diffraction par un réseau (diffraction par transmission)

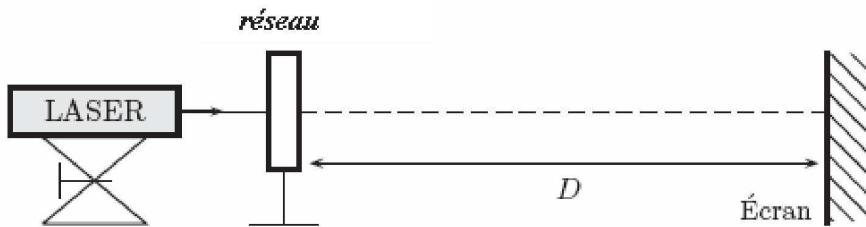


Figure 1 : Montage de la diffraction par réseau

1- Réaliser le montage de la figure 1, en mettant le réseau de 100T/mm sur le banc optique perpendiculairement au faisceau laser, puis le réseau 300T/mm. Rapprocher ensuite suffisamment l'écran du réseau pour observer le 5^{ème} ordre de diffraction. Conclusion.

2- Pour le réseau de 100T/mm, mesurer l'abscisse x_k pour chaque ordre de diffraction k et remplir le tableau ci-dessous. Pour une meilleure précision, on mesure la distance entre les ordres $-k$ et $+k$ qu'on divise par deux ensuite. Prenez une seule valeur pour la distance D en mettre.

Ordre k	1	2	3	4	5
x_k (mm)					
$\tan \theta_k = x_k/D$					
θ_k (rad)					
$\sin \theta_k$					
R_k					

3-Représenter graphiquement la variation $\sin \theta = f(k)$, calculer la pente de la droite et par la suite déduire le pas du réseau a .

4-Calculer les pentes des droites extrêmes et déduire la pente p et le Δp .

5-Quelle est la relation entre p et le pas a du réseau.

6- Calculer le pouvoir de résolution R_k pour chaque ordre k , sachant que la largeur du réseau est $L=1,5$ cm et le reporter dans le tableau ci-dessus. Conclure.

b) Mesure de l'interpiste d'un CD et d'un DVD (diffraction par réflexion)

La surface d'un CD (DVD) est constituée de sillons circulaires (figure 2). Le long d'un sillon, on grave une succession de creux qui représentent l'information numérique. Les sillons d'un CD ou ceux d'un DVD sont équidistants. Constituant pour un faisceau de lumière large un réseau de diffraction périodique, ce qui explique les irisations observées à sa surface. Nous allons exploiter ce phénomène de diffraction pour tirer des informations sur la structure de la surface d'un CD ou celle d'un DVD. Il existe d'autres disques pour le stockage des données plus denses comme HD DVD et le Blu-Ray.

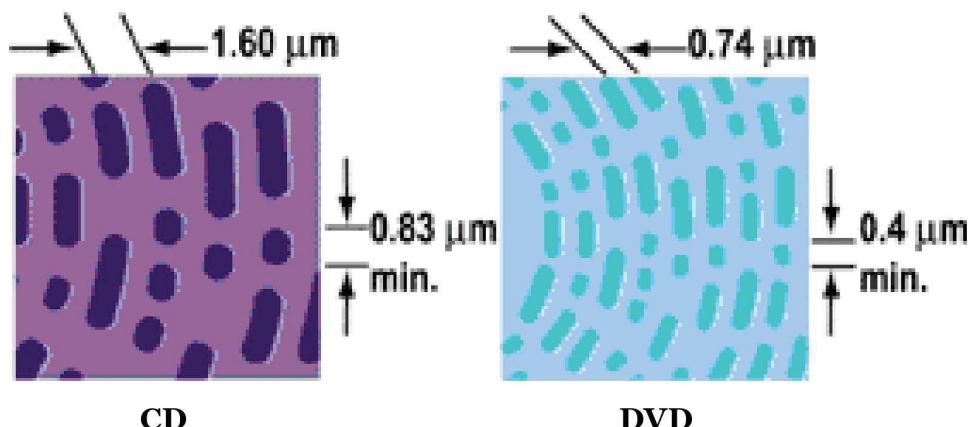


Figure 2 : Les cuvettes et les sillons des CD comparés à ceux du DVD

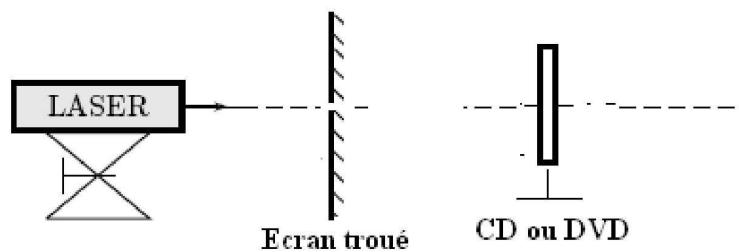


Figure 3 : Montage de la diffraction pour un CD ou un DVD

Réaliser le montage de la figure 3.

- 1-Représenter vos observations sur un schéma.
- 2-Mesurer la distance entre les deux maxima symétriques et calculer la valeur de l'interpiste du disque compact.
- 3- Reprendre la même expérience avec un DVD.
- 4-Que pouvez-vous en déduire concernant les capacités de stockage d'un CD et d'un DVD.