

## FICHE N°2 : OPTIQUE GEOMETRIQUE ET ONDULATOIRE

### 1. INTRODUCTION

L'électromagnétisme a déterminé la nature de la lumière, la relativité lui a chiffré sa vitesse et la quantique lui a donné ses composantes.

Selon **Maxwell**, l'onde lumineuse est l'association de deux champs : **électrique et magnétique**, perpendiculaires entre eux

/!\ Toute onde EM n'est pas lumineuse !

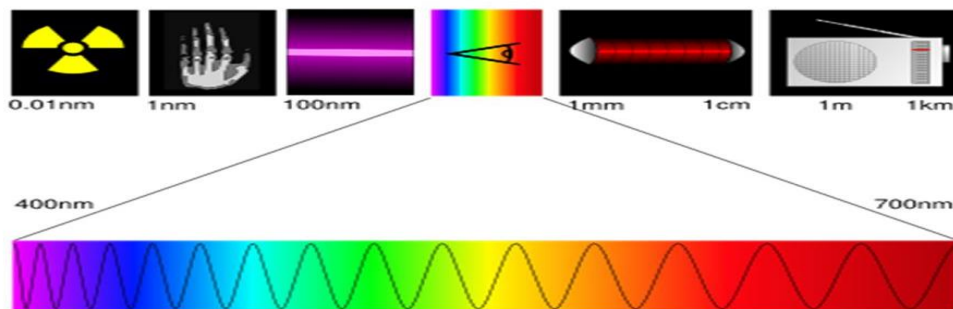
Toute onde a une **longueur d'onde** et une **fréquence**, pour la lumière on a :

$$c = \lambda \nu$$

La lumière n'a **pas besoin de support matériel** pour se déplacer.

/!\ Une onde est un **déplacement d'énergie SANS déplacement de matière**.

/!\ Ce n'est pas parce que la lumière peut se propager dans le vide qu'elle ne peut pas se propager dans un matériau.



**Rayons  $\gamma$  < rayons X < UV < VISIBLE < infrarouges < micro-ondes < ondes radios**

Domaine visible = **400 nm à 700nm**

### 2. PROPAGATION DE LA LUMIERE AU SEIN D'UN MATERIAU

Quand la lumière passe dans un **milieu matériel** (ex : air) sa **vitesse diminue**

$$v = \frac{c}{n} < 3.10^8 m.s^{-1}$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r}$$

**n** dépend de la **longueur d'onde** et la **fréquence** est **constante**

C'est donc  **$\lambda$  qui est divisé par n**

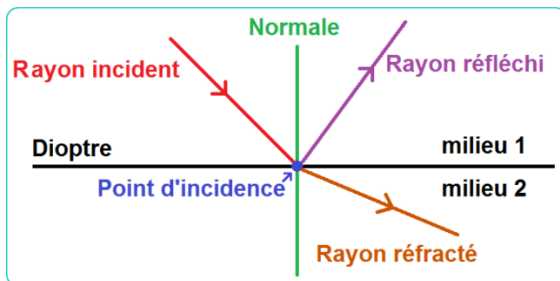
$$v = \frac{c}{n} = \frac{\lambda \nu}{n} = \frac{\lambda}{n} \nu$$

## 3. OPTIQUE GEOMETRIQUE

|                           | <b>Optique géométrique</b>                        | <b>Optique ondulatoire</b>   |
|---------------------------|---|--|
| <b>Définition</b>         | Étude des rayons, sur des <b>systèmes simples</b> | Étude de la lumière lorsqu'elle passe dans une <b>fente/ un obstacle</b> d'une largeur <b>proche de la longueur d'onde</b> |
| <b>Ordres de grandeur</b> | <b><math>&gt; 1\mu m</math></b>                   | <b><math>\cong 1\mu m</math></b>   |
| <b>Applications</b>       | Lentilles minces + dioptries sphériques           | Interférences + diffraction  |

## A) REFRACTION ET REFLEXION

Lorsque 2 milieux sont séparés par un **dioptre**, le rayon incident **se dédouble** en 2 rayons :

**Définition :**

**Dioptre** : interface lisse entre 2 milieux optiques caractérisés par des indices optiques différents  $n_1$  et  $n_2$ . Il peut être plan ou sphérique.

|                     | <b>Rayons</b>                              | <b>Angles</b>  |
|---------------------|--|--|
| <b>Incident</b>     | -<br>-                                     | Entre la normale et le rayon incident  |
| <b>De réflexion</b> | <b>Symétrique</b> par rapport à l'incident | <b>Égal à l'angle incident</b> ( $\rightarrow$ loi de réflexion spéculaire)        |
| <b>Réfracté</b>     | <b>Direction différente</b> de l'incident  | Entre la normale et rayon réfracté ( $\rightarrow$ <b>loi de Snell-Descartes</b> ) |

$\theta_1$ : angle incident

$\theta'_1$ : angle réfléchi

$\theta_2$ : angle réfracté

$\theta_1 = \theta'_1$  MAIS

$\theta_2 \neq \theta_1$

Le rayon change d'angle lorsqu'il est transmis (réfracté) selon la **loi de Snell-Descartes** :

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2)$$

**Quelques cas particuliers :**

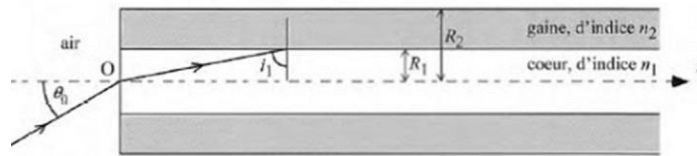
- si l'angle incident = 0  $\rightarrow$  pas de déviation
- si  $n_1 = n_2 \rightarrow$  pas de déviation
- si le rayon incident **vient depuis le milieu le plus réfringent** (i.e.  $n_1 > n_2$ ) : possibilité de **réflexion totale**

**Réflexion totale lorsque :**  $\theta_L \geq \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$  Cette équation admet toujours une solution.

### Applications de la réflexion totale :

1. Numérique : calcul de **l'angle limite** pour lequel le rayon incident subit une **réflexion totale**.

2. Fibre optique : 2 couches avec des **indices optiques différents** ( $n_{\text{coeur}} > n_{\text{gaine}}$ ) → si on envoie un rayon avec **angle suffisamment « plat »**, on a **réflexion totale** et le rayon peut se déplacer sur de **longues distances**.



3. Angle d'acceptance (+++) : **(demi)angle** pouvant permettre une **réflexion totale** → est à la base du **cône d'acceptance** (composé de « 2 » angles d'acceptance) :

$$n \cdot \sin \theta_a = \sqrt{n_{\text{coeur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}$$

#### Moment mnémotechnique :

Pour retenir l'ordre des valeurs dans la racine, je me disais que le cœur c'est le plus important donc  $n_{\text{coeur}}$  est avant  $n_{\text{gaine}}$

→ on a alors un système optique **d'ouverture finie circulaire**

On peut alors définir la notion **d'ouverture numérique NA** :

$$NA = n \cdot \sin \theta_m$$

Ou

$$NA \approx \frac{nr}{D} \text{ si } \theta_m \ll 1$$

Ou dans le cas de la **fibre optique**

$$NA = \sqrt{n_{\text{coeur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}$$

$\theta_m$  : **plus grand angle** sous lequel **l'objet voit l'ouverture** de l'axe optique

**NB** : Le **pouvoir séparateur** d'un instrument s'exprime souvent **en fonction de l'ouverture numérique** !

### Autre cas particulier :

La dispersion : **réfraction dépendante de la longueur d'onde**

Sur un **prisme non droit** (i.e. angle au sommet  $\neq 0$ ) → le rayon incident subit **2 déviations** (→ entrée + sortie). Cet ensemble de réfractions forme **l'angle D = angle de déviation**

**NB** : si l'angle incident n'est pas trop grand, on peut utiliser **l'approximation**

$$D \approx (n - 1) A$$

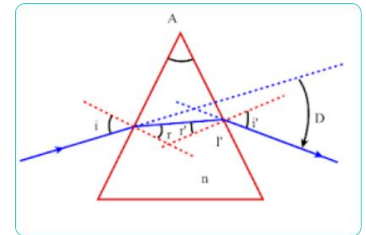
Loi de Cauchy :

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2}$$

Ainsi lorsque  $\lambda \nearrow$ ,  $D \searrow$ , le bleu est donc plus dévié que le rouge

### Moment mnémotechnique :

« bleu » me fait penser à « beuh » et la beuh ça rend déviant donc le bleu est plus dévié que le rouge.



## B. LENTILLES ET DIOPTRÉS

Le but de l'optique géométrique est **d'agrandir les images** ! Les rayons sont cependant constamment soumis au phénomène de **divergence**, on utilise alors des **lentilles** composées de **dioptries sphériques**.

### 1) DEFINITIONS

**Lentille** : association de deux dioptries souvent sphériques.

| Lentilles à bords minces  | Lentilles à bords épais   |
|---|---|
| <p>biconvexe   plan convexe   ménisque convergent   symbole</p>   | <p>biconcave   plan concave   ménisque divergent   symbole</p>  |
| <p><b>Convergentes</b> : Fait <b>converger</b> les rayons lumineux // venant de l'infini vers le foyer image <math>F_i</math></p> | <p><b>Divergentes</b> : Fait <b>diverger</b> les rayons lumineux // venant de l'infini en avant du dioptré <math>\rightarrow</math> foyer image virtuel</p> |
| Corrige l' <b>hypermétropie</b>   | Corrige la <b>myopie</b>  |

**Système optique** : assemblage de miroirs et de lentilles reliant objets et images. Par convention, l'entrée du système est à gauche, la sortie à droite. Le système est **centré** s'il possède un axe de symétrie de révolution (= **centre optique**).

**Objet** : source de rayons entrant dans le système optique  $\rightarrow$  **réel** si **avant** la face d'entrée /  $\rightarrow$  **virtuel** si **après**

**Image** : source de rayons sortant du système optique  $\rightarrow$  **réelle** si **derrière** la face de sortie ( $\rightarrow$  projetable sur un écran)  $\rightarrow$  **virtuelle** si **avant** face d'entrée

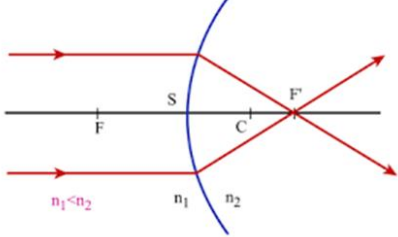
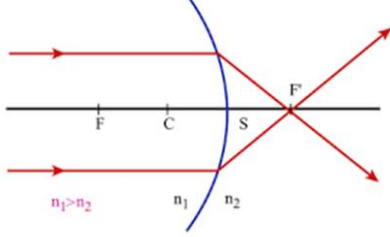
**Stigmatisme** : l'image d'un point est un point  $\rightarrow$  ces 2 points sont dits **conjugués**  $\rightarrow$  **approché** sauf dans le cas des miroirs plans rigoureux  $\rightarrow$  dû à la **symétrie de révolution** des dioptries oculaires

**Aplanétisme** : dans un système **centré**, tout petit objet  $AB$  et  $\perp$  à l'axe optique a une image  $A'B'$  plane et  $\perp$  au même axe.

**Rayons paraxiaux** : dans un système **centré**, ce sont des rayons ne formant que de **petits angles par rapport à l'axe optique**.

**NB** : les rayons **divergent à partir d'un objet réel** mais **convergent vers un objet virtuel**.

## 2) DIOPTRIS SPHERIQUES

| Dioptré <b>convexe</b>  | Dioptré <b>concave</b>   |
|---|--|
|  |  |
| S se trouve avant C<br>$\overline{SC} > 0$  | S se trouve après C<br>$\overline{SC} < 0$   |

S : sommet

C : centre

**D : vergence** (en dioptries)

$D > 0 \rightarrow$  dioptré **convergent**

$D < 0 \rightarrow$  dioptré **divergent**

$$D = \frac{n'}{p'} - \frac{n}{p} = \frac{n' - n}{\overline{SC}}$$

$p = \overline{SA}$  : **distance objet**

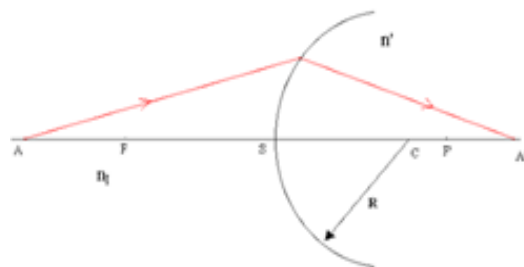
$p > 0 \rightarrow$  objet **virtuel**

$p < 0 \rightarrow$  objet **réel**

$p' = \overline{SA'}$  : **distance image**

$p' > 0 \rightarrow$  image **réelle**

$p' < 0 \rightarrow$  image **virtuelle**



## 3) FOYERS ET DISTANCES FOCALES

**Foyer objet F** : Point à **partir duquel divergent** des rayons **de manière parallèle à l'axe optique**.

L'image de F correspond à un point A' situé à l'infini (comme si  $\overline{SA'} = +\infty$ )

**Distance focale objet** :

$$-f = -\overline{SF}$$

Le plan  $\perp$  à l'AO et passant par le foyer objet = « **plan focal objet** ».

**Foyer image F'** : point **vers lequel converge** un faisceau de **rayons incidents parallèles à l'AO**.

Le foyer image F' correspond à l'image d'un objet A situé à l'infini ( $\overline{SA} = -\infty$ ).

**Distance focale image** :

$$f' = \overline{SF'}$$

Le plan  $\perp$  à l'AO et passant par le foyer image = « **plan focal image** ».

Ainsi, on a (+++) :

$$D = \frac{n'}{p'} - \frac{n}{p} = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

#### Moment mnémotechnique :

Pour se rappeler de  $D = -\frac{n}{f}$  j'avais une

phrase : « *Devant moi Nadine fuit* »

- Devant : D

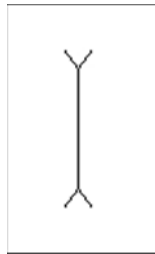
- Moi : signe –

- Nadine : n

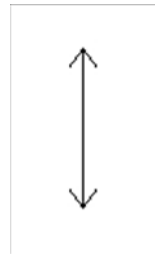
- Fuit : f

#### 4) LENTILLES MINCES

**NB** : La **vergence** de deux lentilles minces accolées **s'additionnent**.



Lentille divergente



Lentille convergente

#### Les 3 règles de construction géométriques :

1. Un rayon incident **parallèle** à l'AO est dévié par la lentille de sorte que le rayon sortant passe **par le foyer image F'**.
2. Un rayon incident passant **par le foyer objet F** est dévié par la lentille de sorte que le rayon sortant est **parallèle à l'AO**.
3. Les rayons qui passent **par le CO** ne sont **pas déviés**.

Les **foyers** images et objets sont **inversés** selon si la lentille est **convergente ou divergente** (le foyer objet est avant une lentille convergente mais après une lentille divergente et inversement pour le foyer image).

#### Grandissement transverse :

$$\gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA} = \frac{p'}{p}$$

Si  $\gamma > 0$  → image **à l'endroit**

Si  $\gamma < 0$  → image **renversée**

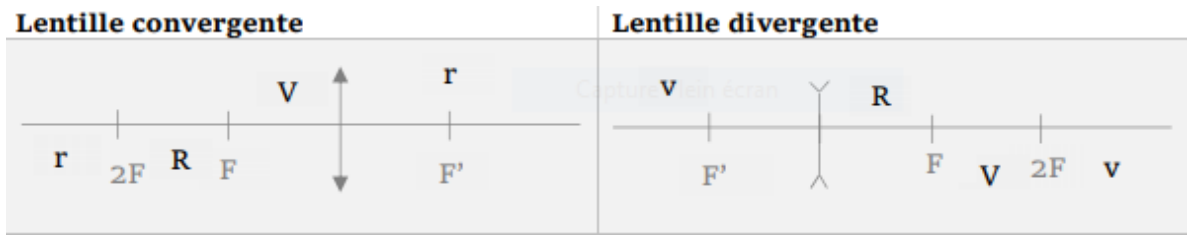
Si  $|\gamma| > 1$  → image **agrandie**

Si  $|\gamma| < 1$  → image **rétrécie**

**NB1** : pour un objet à **distance 2F** →  **$\gamma = 1$**

**NB2** : pour un objet placé **sur le plan focal** → **grandissement infini**

**Petit moyen mnémotechnique du tuteur d'il y a 3 ans (petit secret de famille) :**



L'emplacement des lettres par rapport à la lentille correspond à la position de l'objet.

L'emplacement des lettres par rapport à l'axe optique correspond au retournement de l'image : renversée si dessous et à l'endroit si au dessus.

Les lettres sont en majuscule si l'image est agrandie et en minuscule si rétrécie et v = virtuelle alors que r = réelle.

#### 4) OPTIQUE ONDULATOIRE

##### A. DEFINITIONS

**Intensité lumineuse** moyenne due à **superposition de signaux sinusoïdaux** (les ondes) **déphasés**. Les ondes sont une vibration du champ **électromagnétique + électrique** → les champs électriques **s'additionnent**.

##### 1. Cas général :

Soient 2 ondes **décalées** l'une par rapport à l'autre, on a une variation d'énergie donc une **variation de l'intensité lumineuse**.

##### 2. Ondes en phases :

Les champs électriques **s'additionnent** → l'amplitude est **4x plus grande** (l'énergie du champ électrique correspond au carré du champ électrique), l'intensité est maximale. → **interférences constructives**

##### 3. Ondes en opposition de phase :

La somme des amplitudes des 2 champs électriques **s'annule**, la variation d'énergie est nulle → **interférences destructives**

##### B. INTERFERENCES A 2 SOURCES D'ONDE

Soient 2 **sources ponctuelles** émettant des ondes **monochromatiques et cohérentes**.

On voit alors des **régions plus lumineuses** que d'autres :

- **Franges claires** → interférences **constructives** : les ondes partant des 2 sources doivent arriver **en phase** au niveau du capteur → soit un **nombre entier d'onde** :

$$\delta = k\lambda$$

- **Franges sombres** → interférences **destructives** : les ondes arrivent **en opposition de phase** au niveau du capteur → un **nombre entier + une demi-longueur d'onde** (→ une onde est à son maxima quand l'autre est à son minima) :

$$\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

Dans le cas où  $D \gg a$ , la **différence de marche** s'écrit :

$$\delta = a \cdot \sin \theta$$

Si l'angle est **petit**

$$\sin \theta \approx \theta$$

donc

$$\delta = a \cdot \theta$$

Ainsi l'**intensité lumineuse** sur l'écran est **périodique** avec une succession de **franges claires et de franges sombres**.

#### Instant unités :

- $\delta$  = différence de marche, en m
- $k$  = nombre entier, sans unité
- $a$  = distance entre les 2 sources d'ondes, en m
- $\lambda$  = longueur d'onde, en m
- $\theta$  = angle d'incidence de la source, en rad
- $D$  = distance entre les sources et l'écran, en m

Les **maximas** se trouvent sur tous les angles multiples de

$$\frac{\lambda}{a}$$

Les **minimas** se trouvent sur tous les angles multiples de

$$\frac{\lambda}{2a}$$

→ l'angle entre chaque pic = **intervalle angulaire** vaut :

$$\Delta \theta = \frac{\lambda}{a}$$

Ainsi si  $\lambda \searrow$  → maximas + serrés, si  $\lambda \nearrow$  → maximas + éloignés

si  $a \searrow$  → maximas + éloignés, si  $a \nearrow$  → maximas + serrés

**Interfrange  $i$**  : distance entre 2 franges sombres/clairées consécutives ou longueur des tâches :

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

**Intervalle angulaire** en fct° de l'interfrange :

$$\Delta \theta = \frac{i}{D}$$

### C. INTERFERENCES DANS DES LAMES MINCES

On considère ici des **sources étendues**.

Soit un milieu **transparent** mince délimité par 2 dioptres, si on envoie de la lumière, on a 2 types de rayons :

- un **directement réfléchi** sur la surface extérieure



- un **pénétrant à l'intérieur** de la couche **puis réfléchi** sur la surface intérieure

### 1) INDICES OPTIQUES EGAUX A L'EXTERIEUR

On admet **la différence de marche** :

$$\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2}$$

→ pour les interférences **constructives**,

$$e = \frac{\lambda}{4n}$$

l'épaisseur minimale vaut :

→ pour les interférences **destructives**,

$$e = \frac{\lambda}{2n}$$

l'épaisseur minimale vaut :

**NB** : ce phénomène **dépend donc de la longueur d'onde**

#### Instant unités :

- **n** = *indice optique de la lame, sans unité*
- **e** = *épaisseur de la couche, en m*
- **N** = *nombre de fentes*

### 2) LAME SUR UN MATERIAU D'INDICE OPTIQUE SUPERIEUR

On admet la **différence de marche** :

$$\delta = 2ne$$

→ pour interférences **destructives**,

$$e = \frac{\lambda}{4n}$$

l'épaisseur minimale vaut :

→ pour interférences **constructives**,

$$e = \frac{\lambda}{2n}$$

l'épaisseur minimale vaut :

Ce sont les épaisseurs minimales, l'expression des épaisseurs en général sont pour les interférences destructives :  $e = \left(k + \frac{1}{2}\right) * \frac{\lambda}{2n}$  avec k un entier positif. Donc il peut y avoir plusieurs épaisseurs pour lesquelles il y a des interférences destructives (QCMs !!!)

## D. INTERFERENCES A N SOURCES = RESEAU OPTIQUE

**Réseau optique** = écran opaque à la lumière avec dedans **fentes très fines**, de façon périodique. Chaque fente est alors une source de lumière, on observe des **interférences**.

On peut calculer **l'espacement entre 2 franges** :

$$\frac{\lambda}{a}$$

On peut également calculer les **maximas** d'intensité :

$$\theta = k \frac{\lambda}{a}$$

La **largeur** (angulaire) des pics **diminue avec le nombre de fentes** :

$$\Delta\theta = \frac{2\lambda}{N \cdot a}$$

**/!\ Plus il y a de fentes, plus l'intensité lumineuse est importante**

## E. DIFFRACTION

### 1) DEFINITIONS

La diffraction est observée lorsque la propagation des ondes est changée par un **obstacle de taille équivalente à la longueur d'onde (< 1μm)**. Ce phénomène concerne les **sources étendues** ≠ ponctuelles.

**Mise en application** : soit une source étendue et une ouverture  $\cong$  longueur d'onde, les ondes planes périodiques vont « **se casser** » et **former de nouvelles ondes**. On peut remplacer cette ouverture continue par une **infinité de sources ponctuelles** → **principe de Huygens-Fresnel** qui fait le lien entre **l'interférence** et la **diffraction** → dépend aussi de l'ouverture, **si ouverture ↘, diffraction ↗**.

## 2) DIFFRACTION PAR UNE SEULE FENTE

La figure de diffraction par une fente présente une **tâche centrale intense** et des **tâches satellites** avec une **intensité + faible**.

On peut retrouver la position des **minimas** :

$$\theta = k \frac{\lambda}{b}$$

La **largeur angulaire de la tâche centrale**, est définie par :

$$\Delta\theta = \frac{2\lambda}{b}$$

**Application** : La diffraction est aussi observée si l'écran opaque est remplacé par du vide et la fente par un **obstacle** de même taille.

La **largeur de la tâche centrale** se trouve **en multipliant** la **largeur angulaire** par la **distance d'observation** :

$$L = \frac{2\lambda}{b} D$$

Donc

$$b = \frac{2\lambda D}{L}$$

### Instant unités :

- **b** = largeur de la fente/de l'obstacle, en m
- **L** = largeur de la tâche centrale, en m

## 3) DIFFRACTION PAR UNE FENTE CIRCULAIRE

**Figure** : **tâche centrale (=d'Airy)** et **tâches périphériques**

→ demi-largeur angulaire

$$\Delta\theta = 0,61 \frac{\lambda}{r}$$

dans le **vide**

→ demi-largeur angulaire

$$\Delta\theta = 0,61 \frac{\lambda}{rn'}$$

dans un **matériau d'indice n'**

## 4) DIFFRACTION PAR DEUX FENTES

**Interférences et diffraction** peuvent être **combinées** : chaque fente diffracte l'onde et les 2 ondes diffractées interfèrent. On retrouve les 2 phénomènes :

- **l'interférence** : varie **rapidement** en fct° de la largeur angulaire entre chaque frange

$$\frac{\lambda}{a}$$

- **la diffraction** : de modulation **lente**, a pour dimension angulaire :

$$\frac{\lambda}{b}$$

**NB** : Les **interférences** varient rapidement en fonction de **a**.

La **diffraction** varie lentement en fonction de **b**.

Dédicaces !!!! :

A ma co-tut Blandine avec qui j'ai discuté par vocaux tout le long de la rédaction de cette fiche

A tous ceux qui aiment la physique (je sais que ça ne représente pas beaucoup de monde mais si tu es inclus.e sache que tu fais clairement partie des meilleurs ;) )

A toutes celles et ceux qui veulent sage femme, continuez à bosser et vous y arriverez !

Bon courage à tous, doubler c'est pas facile (je parle en connaissance de cause) mais vous allez voir qu'on y survit et que c'est encore plus libérateur une fois que tout est terminé.