

Physique : Optique géométrique et ondulatoire

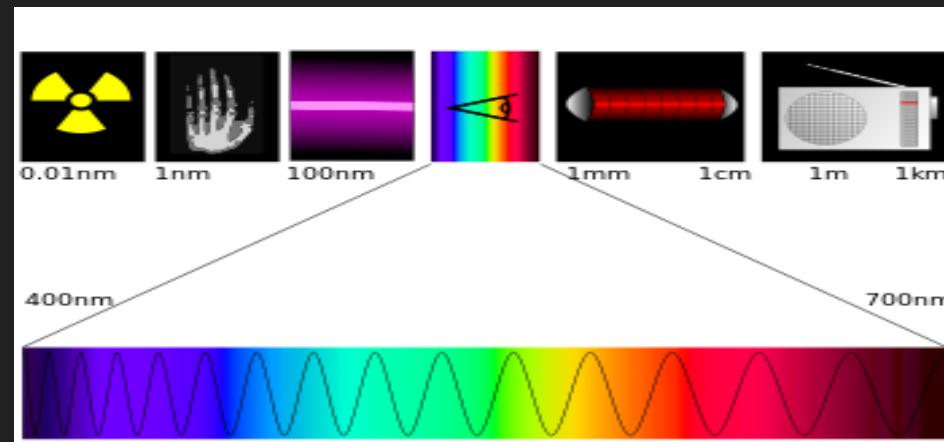
I. Introduction :

- Selon Maxwell → **onde lumineuse** = association d'un champ électrique et d'un champ magnétique, perpendiculaires entre eux.
- Elle est caractérisée par une vitesse **$v = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$**
- Onde lumineuse = onde électromagnétique **MAIS** onde EM $\neq$ onde lumineuse
- Toute onde a une longueur d'onde λ et une fréquence ν telles que

$$c = \lambda \nu$$

1. Spectre EM

- /!\ La lumière peut se déplacer dans le **vide** ET dans la **matière**
- /!\ Une onde est un **déplacement d'énergie** SANS déplacement de matière



Rayons γ < rayons X < UV < VISIBLE < infrarouges < micro-ondes < ondes radios

Domaine visible = 400 nm à 700nm

2. Propagation de la lumière dans un matériau et indice de réfraction

- 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 : indice de réfraction
 ϵ_r : constante
diélectrique du milieu

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

C'est donc λ qui est divisé par n

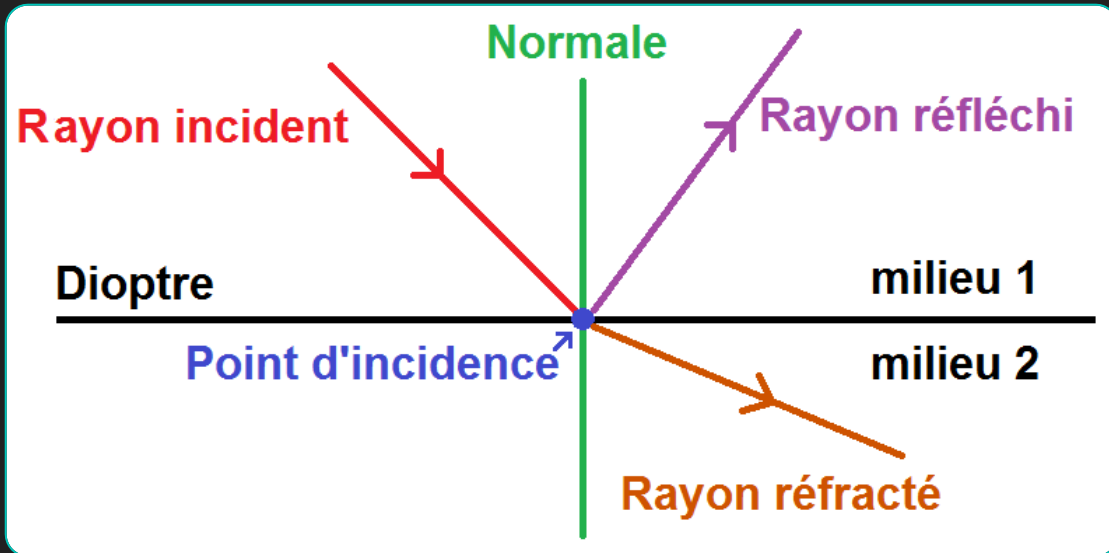
$$v = \frac{c}{n} = \frac{\lambda \nu}{n} = \frac{\lambda}{n} \nu$$

II. Optique géométrique

- **Définition** : étude des rayons avec des systèmes simples (lentilles minces, dioptries sphériques) transparents d'indice optique n_i donné.
- **Ordre de grandeur** : $> 1 \mu\text{m}$



1. Réflexion et réfraction



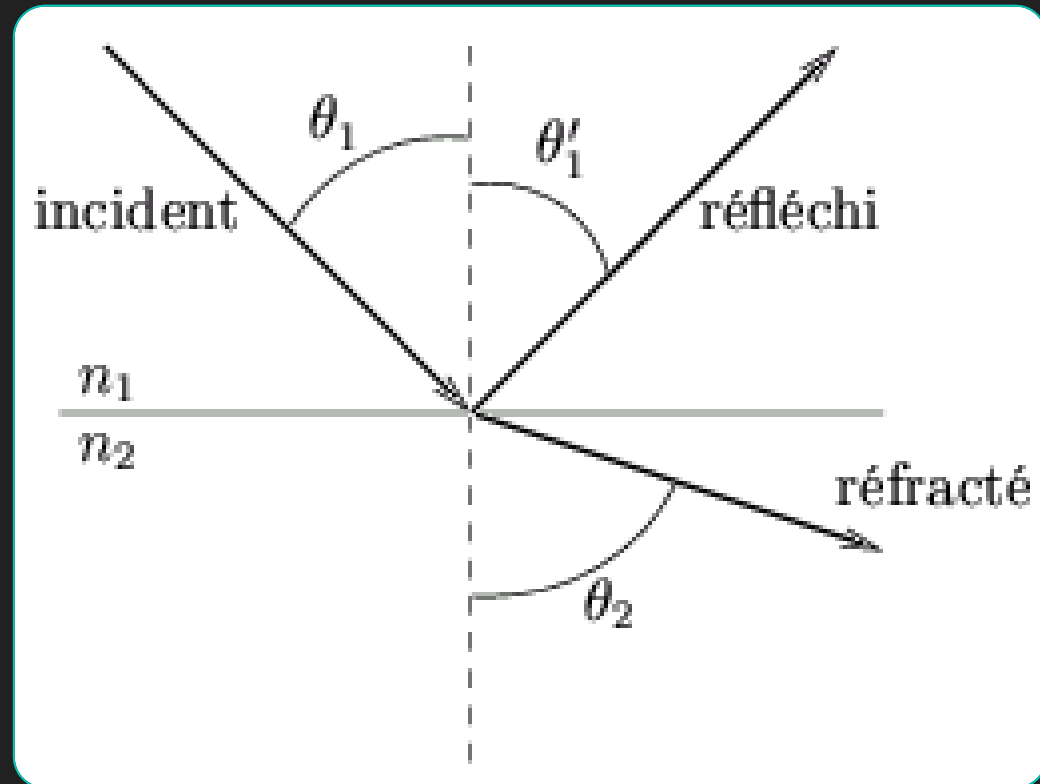
- **Dioptré** : interface lisse entre deux milieux d'indices optiques différents
- Si un rayon traverse un dioptré, il sera dédoublé en 2 rayons ; un **rayon réfléchi** et un **rayon réfracté**.

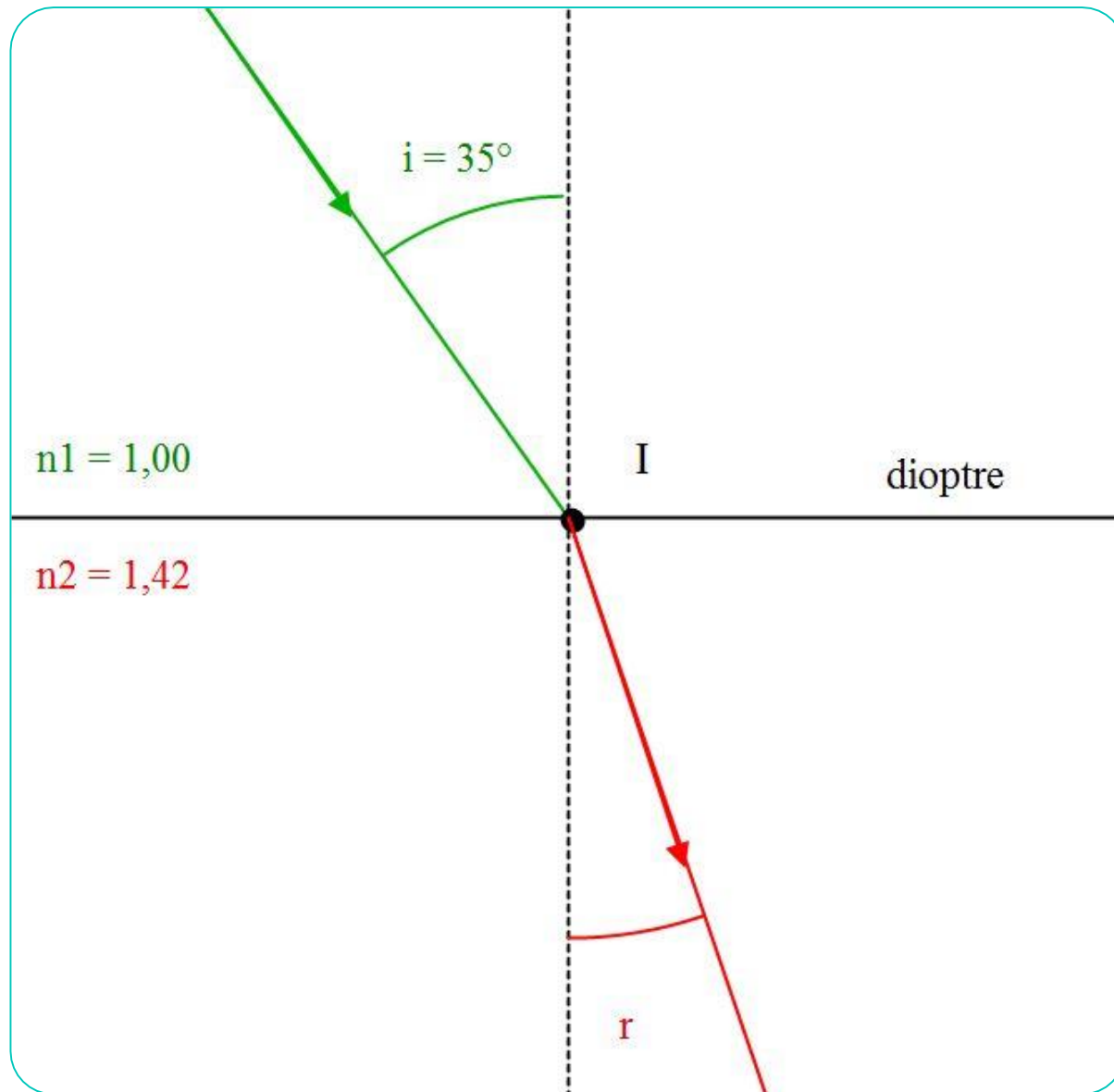
2. Loi de Snell-Descartes

- θ_1 : angle incident
- θ'_1 : angle réfléchi
- θ_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** :

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





$$n_1 < n_2$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right)$$

admet toujours une solution.

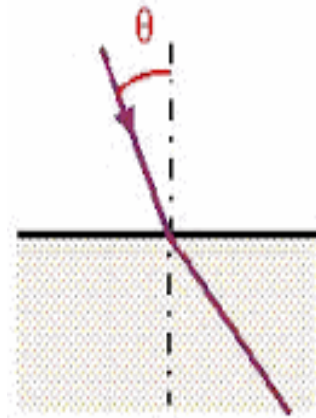
- On a **toujours** $\theta_2 < \theta_1$
- A.N: $\theta_2 = \arcsin\left(\frac{1,00}{1,42} \sin(35)\right)$
 $\theta_2 = \arcsin(0,4039)$
 $\theta_2 = 23,82^\circ$

$$n_2 < n_1$$

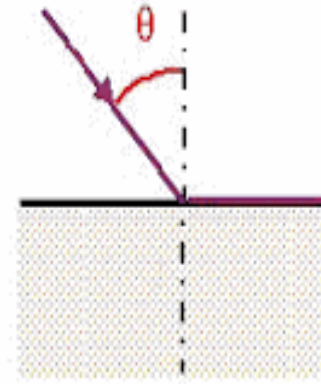
- Lorsque le rayon provient du milieu le plus réfringent, il y a possibilité de **réflexion totale**.
- **Angle limite** : angle incident à partir duquel la réflexion est totale.
- Calcul de l'angle limite θ_L

$$\theta_L = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

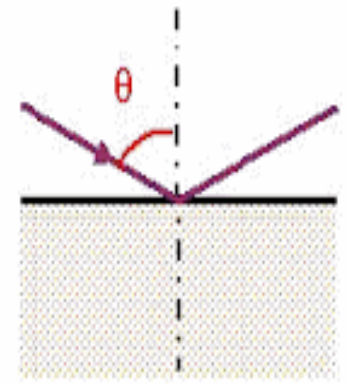
- Si $\theta_1 > \theta_L \rightarrow$ **réflexion totale** donc absence de rayon réfracté (transmis)



Réfraction : $\theta < \theta_c$



$\theta = \theta_c$



Réflexion totale : $\theta > \theta_c$

Exemple de l'eau

- $n_{eau} = 1,33$

- $n_{air} = 1$

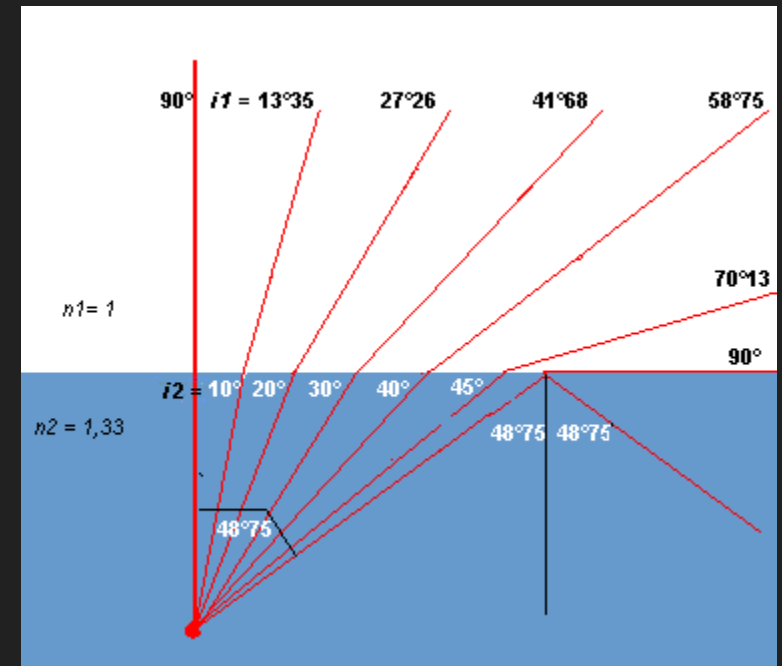
Soit un rayon provenant de l'eau et se dirigeant vers la surface.

$$\theta_L = \arcsin\left(\frac{n_{air}}{n_{eau}}\right)$$

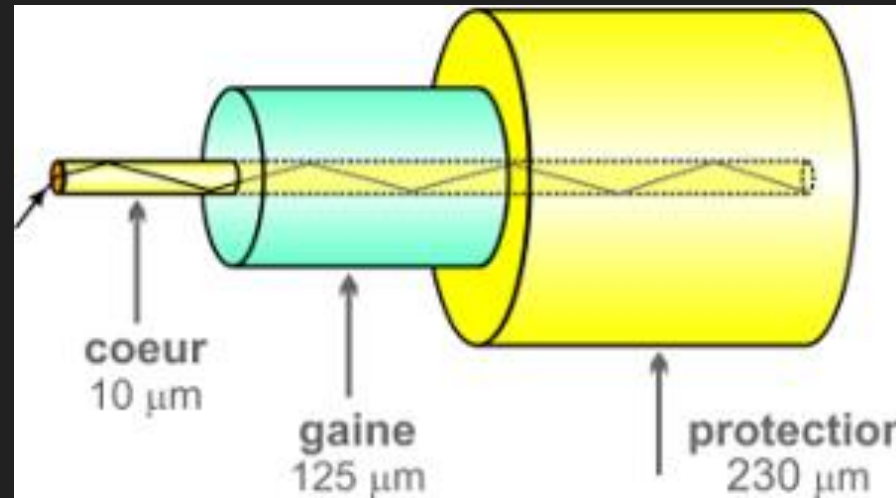
$$\theta_L = \arcsin\left(\frac{1}{1,33}\right)$$

$$\theta_L = 49^\circ$$

Donc si le rayon incident est **supérieur à 49°** , il y aura **réflexion totale**.



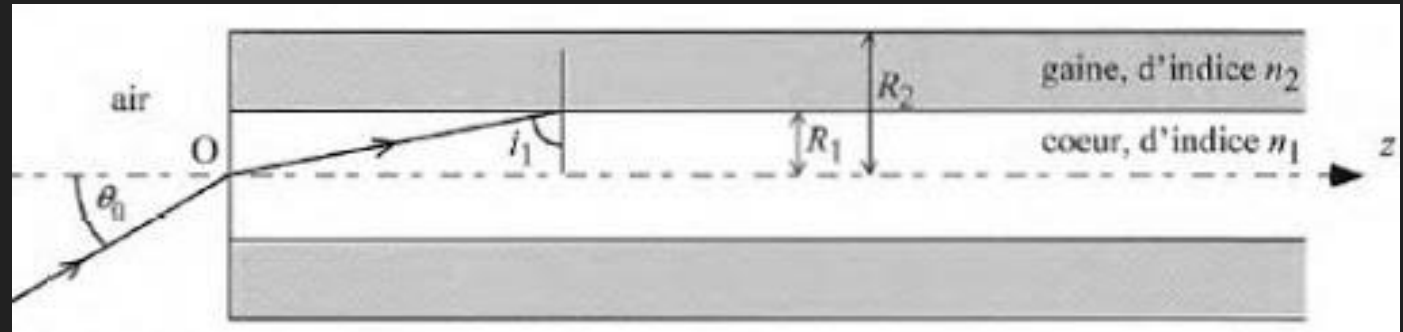
3. Application : fibre optique et prisme



- Une fibre optique est composée de 2 milieux : la gaine et le cœur. Or $n_{\text{cœur}} > n_{\text{gaine}}$ donc si le rayon incident arrive avec un angle suffisamment élevé, on se trouve dans un cas de **réflexion totale**. Le rayon se propage **sans perte d'énergie**.

Fibre optique

- Angle d'acceptance : demi-angle qui permet une réflexion totale. 2 angles d'acceptance forment un **cône d'acceptance**.
- Cela forme un système optique avec une ouverture finie circulaire → **ouverture numérique NA**



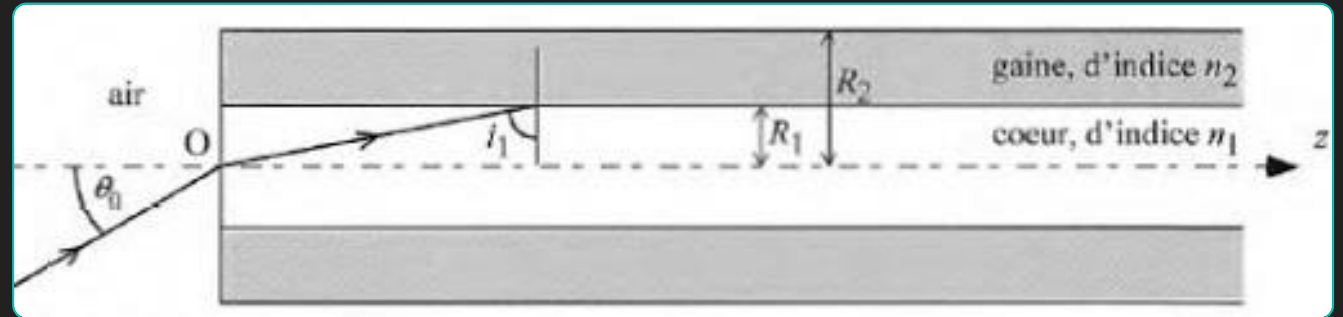
Fibre optique

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

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

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

Dans le cas de la fibre optique



Prisme

- Si l'angle d'incidence I est assez petit alors **l'angle de deviation D** est donné par :

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

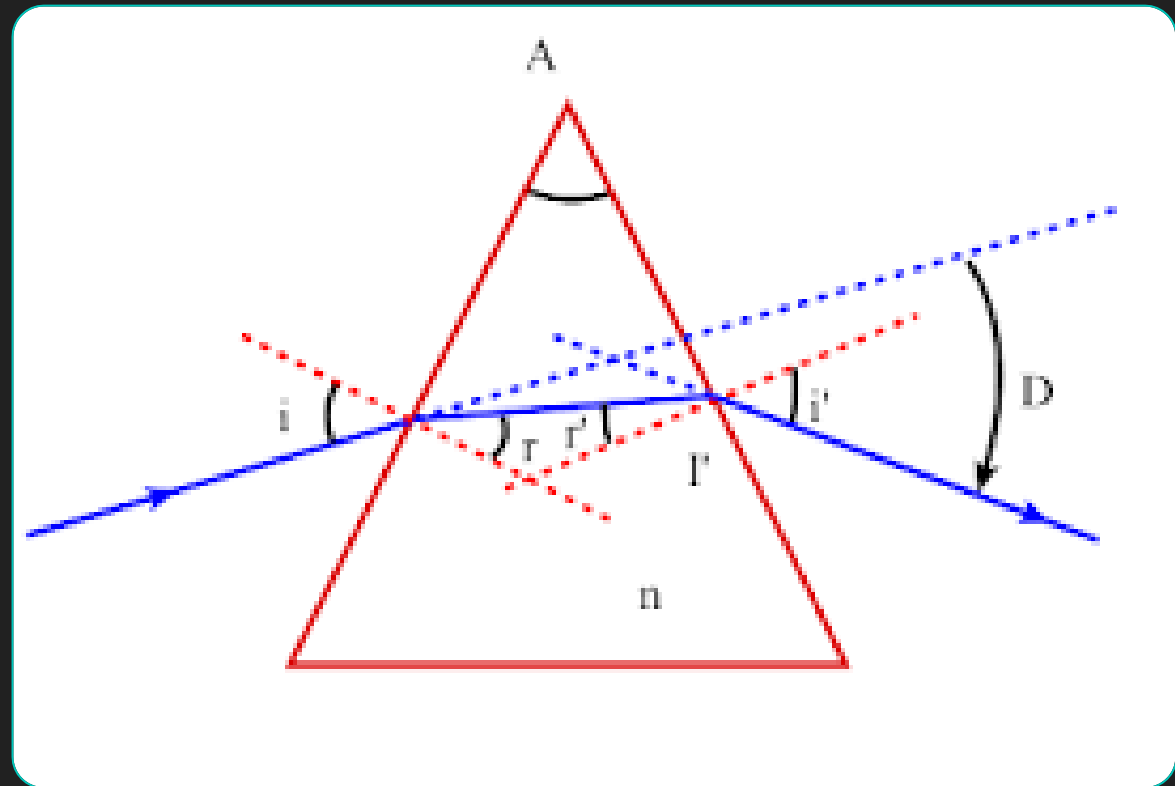
- Or n varie en fonction de la longueur d'onde donc **D aussi.**

- Loi de Cauchy :

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

- Or

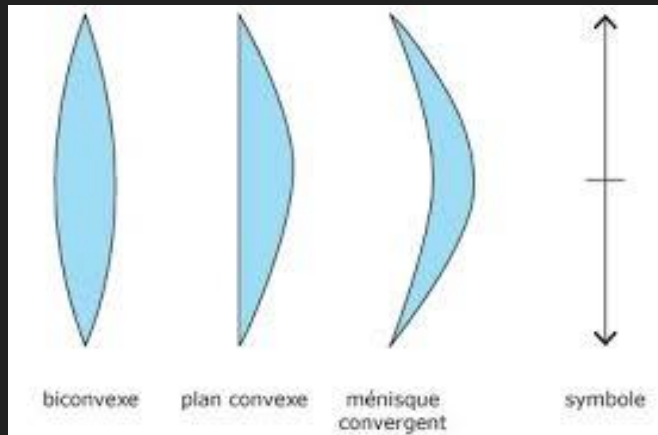
$$\begin{aligned} \lambda_{\text{bleu}} < \lambda_{\text{rouge}} &\rightarrow n_{\text{bleu}} > n_{\text{rouge}} \\ &\rightarrow D_{\text{bleu}} > D_{\text{rouge}} \end{aligned}$$



4. Lentilles et dioptries

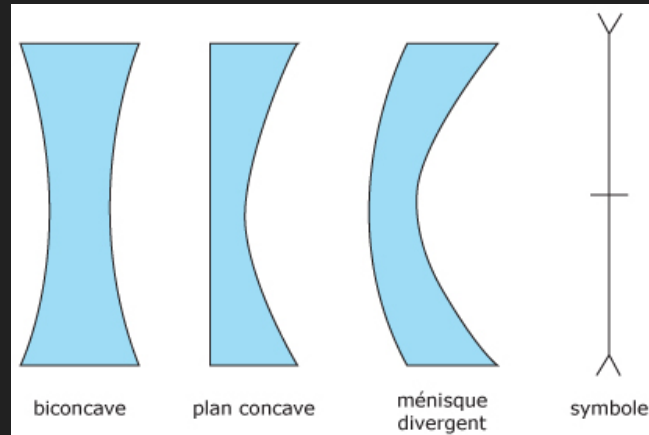
○ Lentilles à bords minces :

- convergentes
- corrigent l'hypermétropie



• Lentilles à bords épais :

- divergentes
- corrigent la myopie



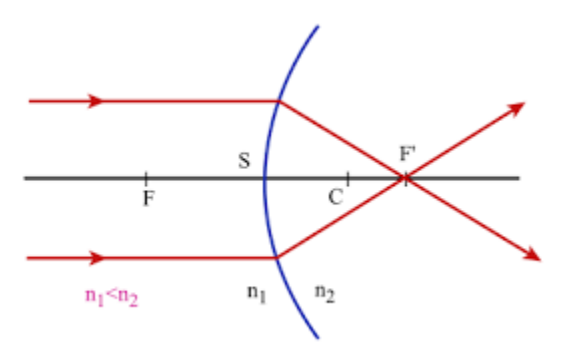
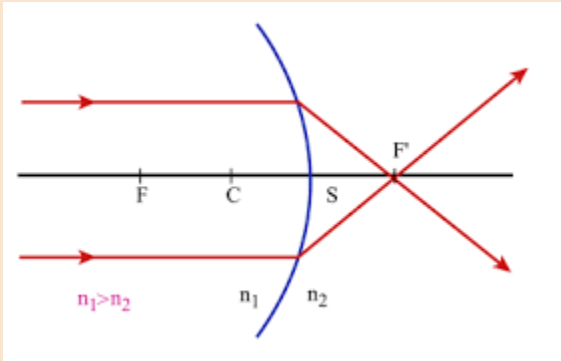
Une lentille est une association de 2 dioptries souvent sphériques.

5. Définitions

- **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 → réel si avant la face d'entrée / → virtuel si après
- **Image** : source de rayons sortant du système optique → réelle si derrière la face de sortie (→ projetable sur un écran) → virtuelle si avant face d'entrée
- **Stigmatisme** : l'image d'un point est un point → ces 2 points sont dits conjugués → approché sauf dans le cas des miroirs plans rigoureux → 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.

6. Dioptries sphériques

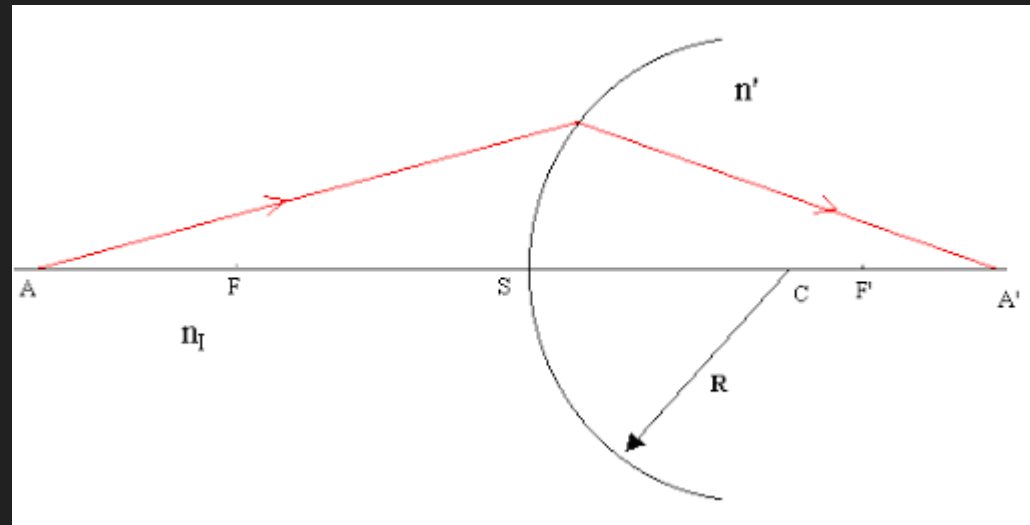
Dioptre convexe	Dioptre concave
	
S se trouve avant C $\overline{SC} > 0$	S se trouve après C $\overline{SC} < 0$

- S : sommet
- C : centre

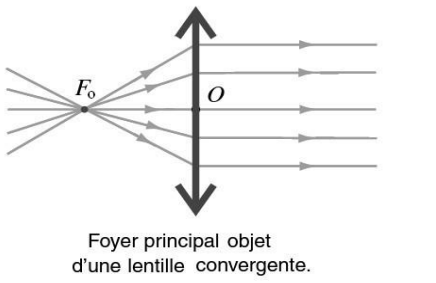
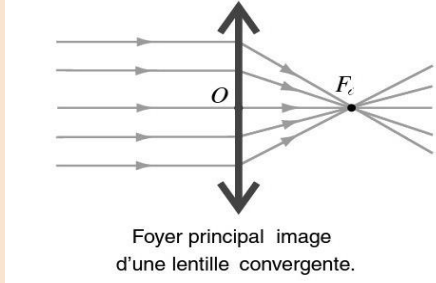
7. Loi du dioptre sphérique

- **D : vergence** (en dioptries)
 - $D > 0 \rightarrow$ dioptre **convergent**
 - $D < 0 \rightarrow$ dioptre **divergent**
- **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**

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



8. Foyers et distances focales

	Objet	Image
	 Foyer principal objet d'une lentille convergente.	 Foyer principal image d'une lentille convergente.
Foyer	Foyer objet Point à partir duquel divergent des rayons de manière parallèle à l'axe optique	Foyer image Point vers lequel converge un faisceau de rayons incidents parallèles à l'axe optique
Distance focale	distance focale objet $-f = -\overline{SF}$	Distance focale image $f' = \overline{SF'}$
Plan	Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par F est appelé plan objet	Le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par F' est appelé plan image.

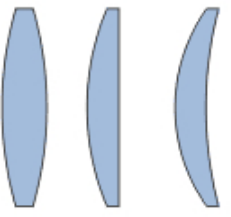
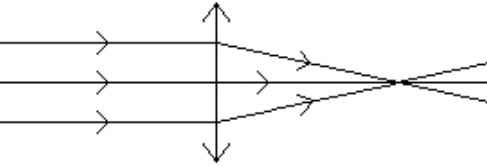
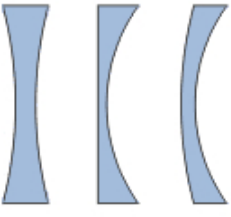
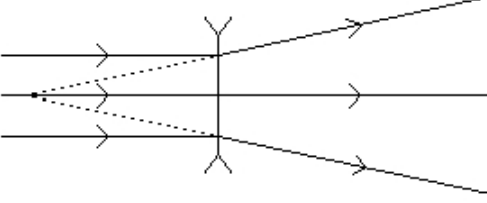
L'équaion du dioptre sphérique peut se réécrire :

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

9. Lentilles minces

- Définition (rappel): association de 2 dioptries sphériques (de courbure fine).

La vergence de 2 lentilles minces accolées s'additionnent.

	vue en coupe	schéma	déviatiion de la lumière
lentilles convergentes			
lentilles divergentes			

10. Construction géométriques

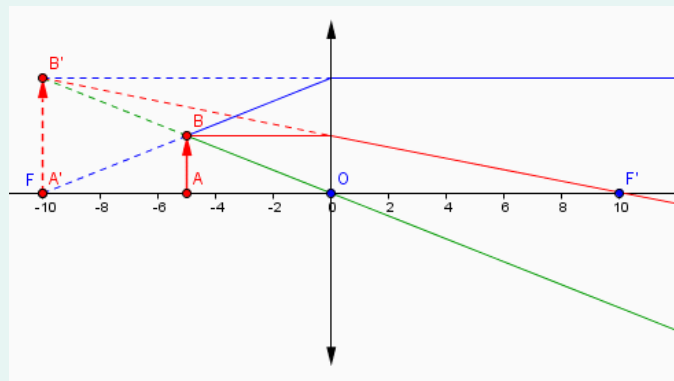
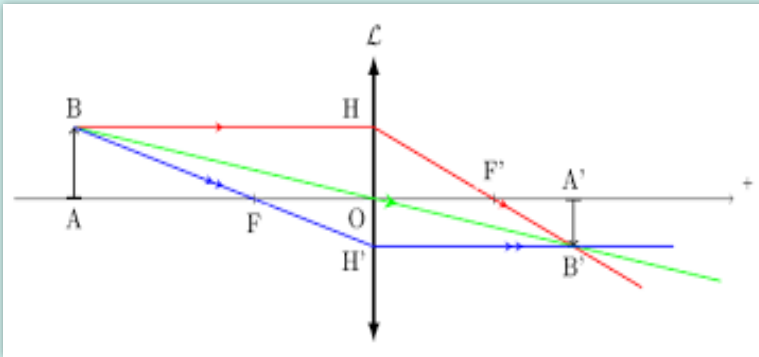
Les 3 règles de construction géométriques :

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**.

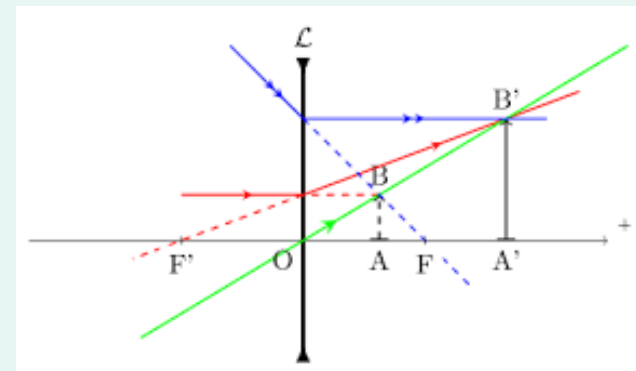
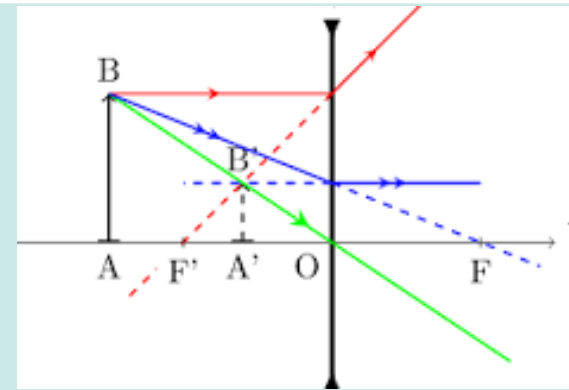
- Les **foyers images et objets** sont **inversés** selon si la lentille est convergente ou divergente (le foyer objet est avant une lentille convergente mais après une lentille divergente et inversement pour le foyer image).

Exemples de constructions géométriques

Lentilles convergentes



Lentilles divergentes



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

QCMs

Salle socratique :
PHYSIQUE THE BEST

QCM1: Soit un dioptre faisant l'interface entre un milieu 1 de constante diélectrique $\epsilon_r = 4$ et l'air d'indice $n_2 = 1$.

- A) En traversant le milieu 1, un rayon lumineux aura une vitesse de $1,5 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- B) En traversant le milieu 1, un rayon lumineux aura une vitesse de $0,75 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- C) On pourra observer un phénomène de réflexion totale si un rayon traverse le dioptre dans le sens milieu 1 $\rightarrow$ air avec un angle de 25°
- D) On pourra observer un phénomène de réflexion totale si un rayon traverse le dioptre dans le sens air $\rightarrow$ milieu 1 avec un angle de 35°
- E) Toutes les propositions sont fausses

Correction :

A) Vrai $\rightarrow v = \frac{c}{n}$ et $n = \sqrt{\epsilon_r}$ Donc $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3.10^8}{\sqrt{4}} = \frac{3.10^8}{2} = 1,5.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

B) Faux

C) Faux $\rightarrow \theta_L = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{2}\right) = \arcsin(0,5) = 30^\circ$

D) Faux $\rightarrow$ On passe d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent donc le phénomène de réflexion totale n'est pas possible.

E) Faux

QCM2: A propos de l'optique géométrique, donnez les vrais :

- A) Une lentille est un assemblage de 2 dioptries souvent sphériques.
- B) Dans une fibre optique, le cœur est plus réfringent que la gaine.
- C) Lors du passage de lumière blanche dans un prisme, le bleu est plus dévié que le rouge.
- D) Les phénomènes liés à l'optique géométrique ont un ordre de grandeur inférieur à $1 \mu\text{m}$.
- E) Toutes les propositions sont fausses

QCMs

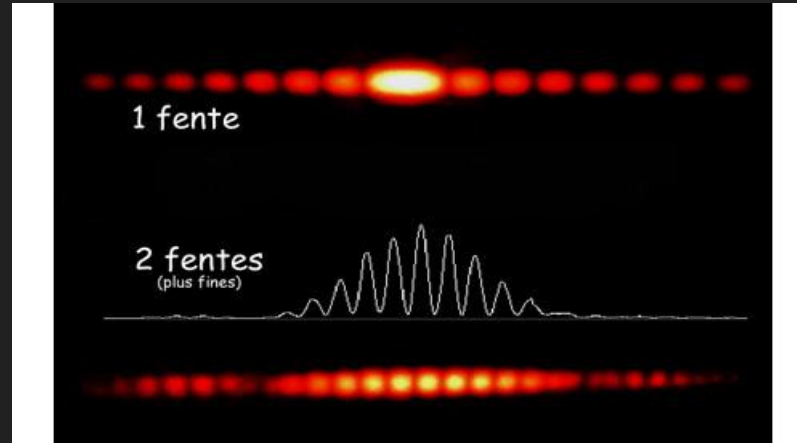
Salle socratique :
PHYSIQUETHEBEST

Correction :

- A) Vrai
- B) Vrai
- C) Vrai
- D) Faux → supérieur à 1 μm .
- E) Faux

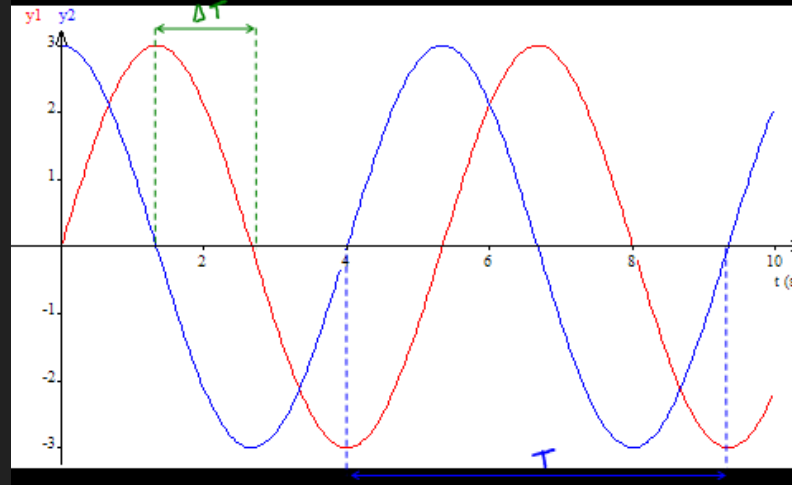
II. Optique ondulatoire

- Définition : étude de la lumière lorsqu'elle rencontre un **obstacle** (ou une fente) dont la largeur est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.
- Ordre de grandeur $\approx 1 \mu m$
- Phénomènes observables : interférences et diffractions.



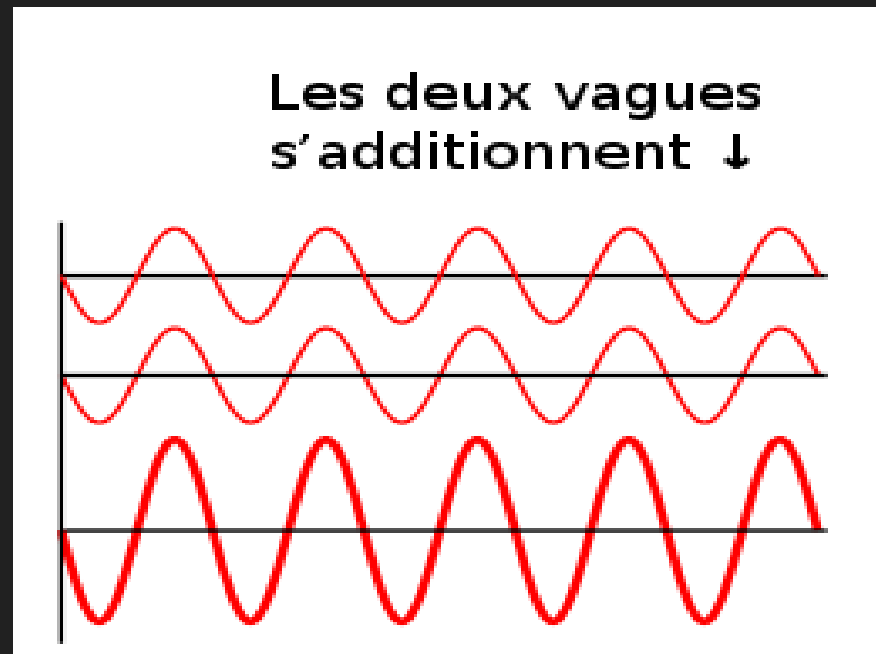
1) Interférences : définitions

- **Définition** : modifications de l'intensité lumineuse lors d'une superposition de signaux sinusoïdaux (ondes) déphasés → les champs électriques s'additionnent.
- ❖ **Cas général** : 2 ondes décalées l'une par rapport à l'autre qui se superposent → variation d'énergie → variation d'intensité.



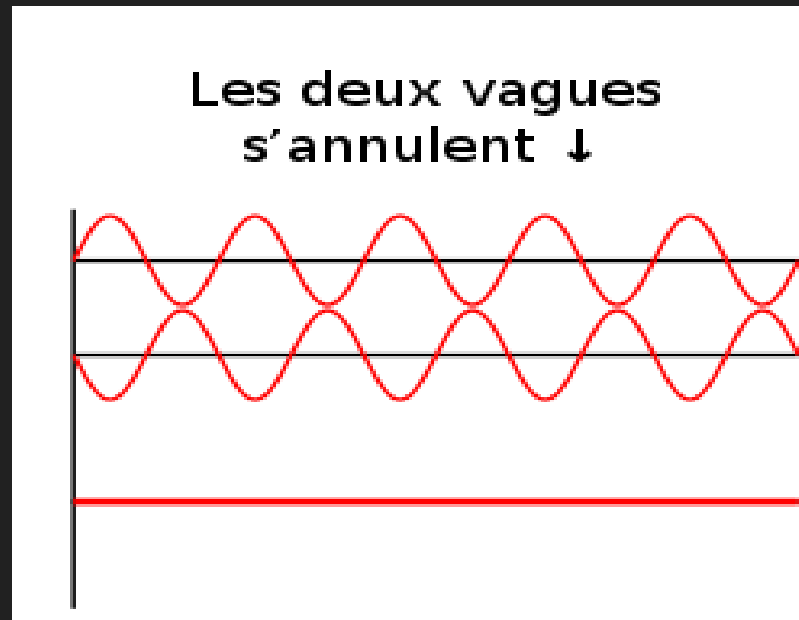
1) Interférences : définitions

- ❖ Ondes en phase : les champs électriques s'additionnent. L'amplitude de l'onde résultante est 4 fois plus grande. L'intensité est maximale. On parle d'interférences constructives.



1) Interférences : définitions

- ❖ Ondes en opposition de phase : Les champs électriques **s'annulent**. La variation d'énergie est donc nulle. On parle d'interférences **destructives**.



2) Interférences à deux sources

- On considère **deux sources ponctuelles** émettant des ondes **monochromatiques** (mêmes fréquences et longueurs d'ondes) et **cohérentes** (le déphasage est constant).
- Pour respecter ces conditions, on utilise une seule source émise par le même émetteur et traversant un système de **fentes d'Young** (2 fentes très fines et assez rapprochées de manière à ce que le rayon traverse les 2 fentes en même temps).
- Selon la distance parcourue par les 2 ondes, on observera
 - Des **interférences constructives** lorsque les ondes sont **en phase** (tâches lumineuses)
 - Des **interférences destructives** lorsque les ondes sont **en opposition de phase** (tâches sombres).
 - Des espaces intermédiaires

2) Interférences à deux sources : la différence de marche

- Différence de marche δ : différence de chemin parcourue par deux ondes.
 - Interférences constructives : franges claires, les ondes arrivent en phase au niveau du capteur donc la différence de marche est un multiple entier de la longueur d'onde.

$$\delta = k\lambda$$

- Interférences destructives : franges sombres, les ondes arrivent en opposition de phase au niveau du capteur (une onde à son maximum et l'autre à son minimum) donc la différence de marche est la somme d'un multiple entier de la longueur d'onde et d'une demi longueur d'onde.

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

2) Interférences à deux sources : intervalle angulaire et interfrange

○ Dans un cas où $D \gg a$

➤ Dans ce cas $\delta = a \cdot \sin\theta$. L'angle étant petit, on peut dire que $\delta = a \cdot \theta$

Intervalle angulaire $\Delta\theta$: angle entre 2 franges claires

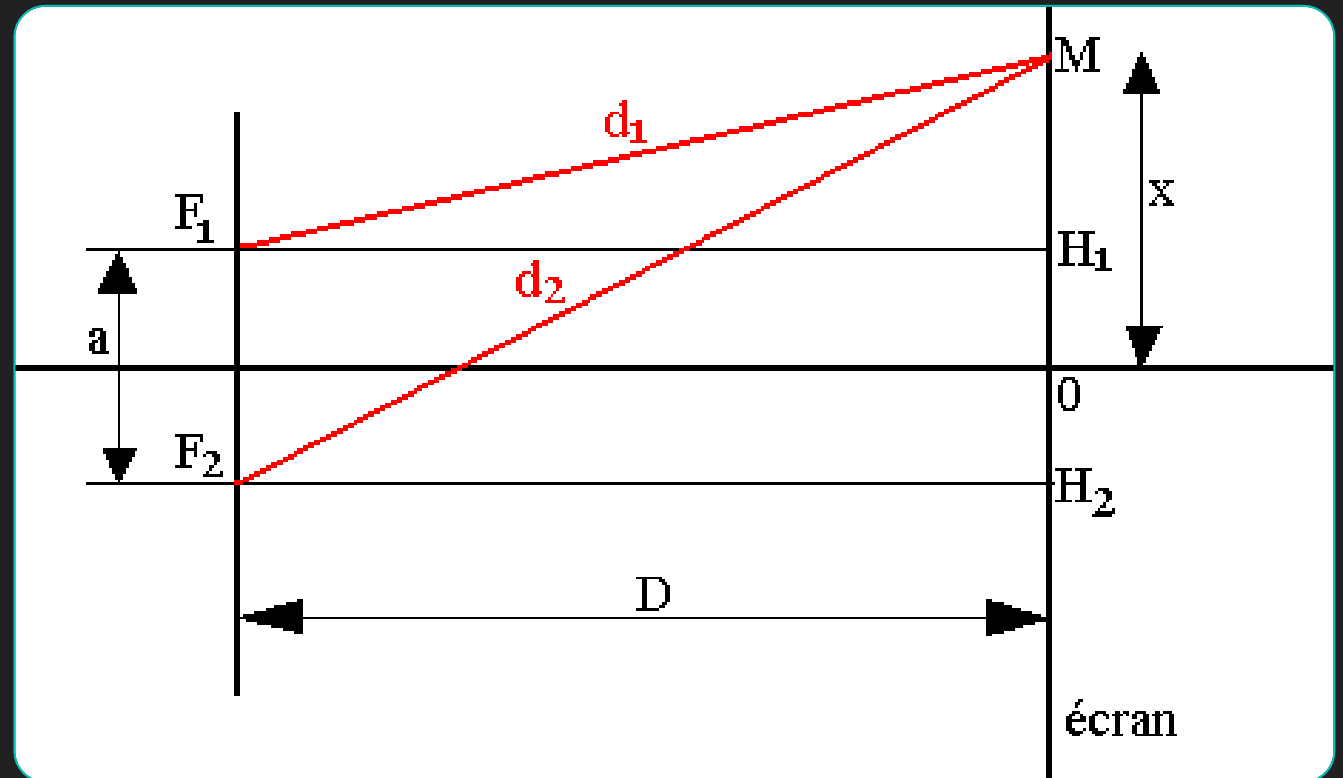
$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Interfrange : distance entre 2 taches sombres ou lumineuses

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

donc

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



3) Interférences dans les lames minces

- On considère des **sources étendues**.
- Ici le milieu transparent est délimité par **2 dioptries** formant une fine couche **d'épaisseur e** . Si on projette de la lumière dessus, il y aura 2 types de rayons réfléchis :
 - Certains seront **directement réfléchis** par la couche externe
 - D'autres **pénétreront la couche externe** et seront **réfléchis par la couche interne**

Point unités

n = indice optique du 2ème milieu, sans unité

e = épaisseur de la couche, en m

N = nombre de fente

3) Interférences dans les lames minces : indices optiques identiques des 2 côtés

- 2 rayons sont donc réfléchis mais pas au même endroit, il y a donc une **différence de marche**. Or la différence de marche est proportionnelle à la longueur d'onde donc les interférences seront différentes selon la longueur d'onde.

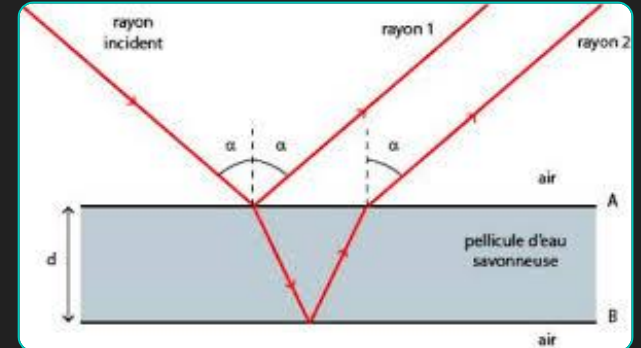
$$\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2}$$

- Interférences constructives :

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

- Interférences destructives :

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



3) Interférences dans les lames minces : indices optiques différents ($n_2 > n_1$)

○ Dans ce cas

$$\delta = 2ne$$

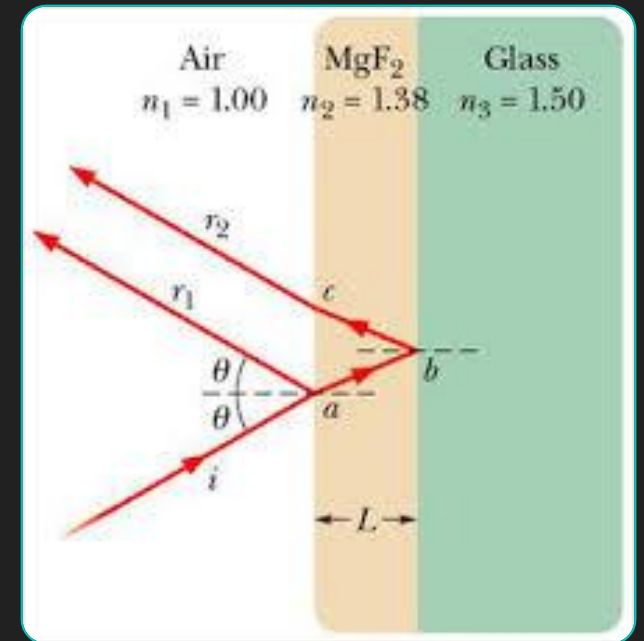
○ Interférences constructives :

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

○ Interférences destructives :

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

NB : cette situation correspond notamment à la création de verres anti-reflets.



4) Interférences à N sources = réseau optique

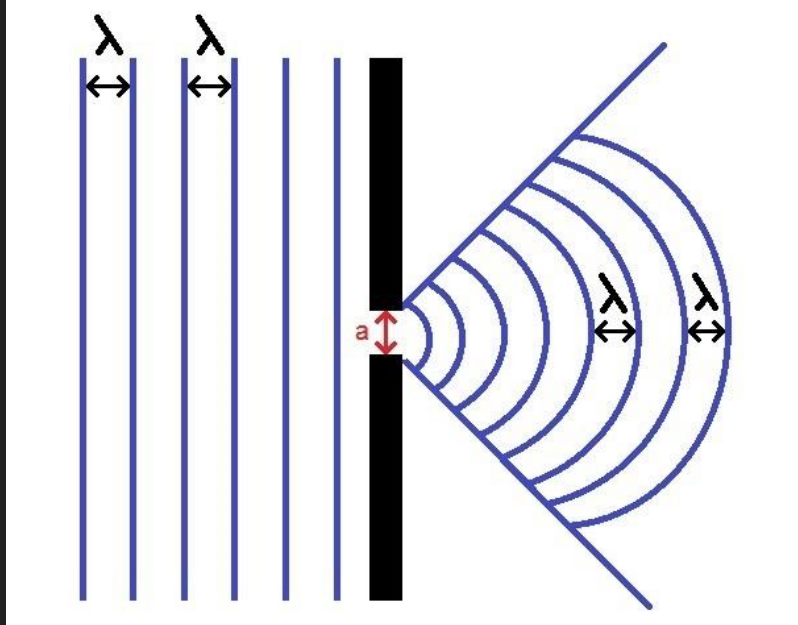
- Même principe que pour les interférences à 2 fentes sauf que la plaque opaque est percée de **N fentes** espacées les unes des autres par le **pas du réseau : a**

- Espacement entre 2 franges : $\frac{\lambda}{a}$ de plus $\theta = k \frac{\lambda}{a}$

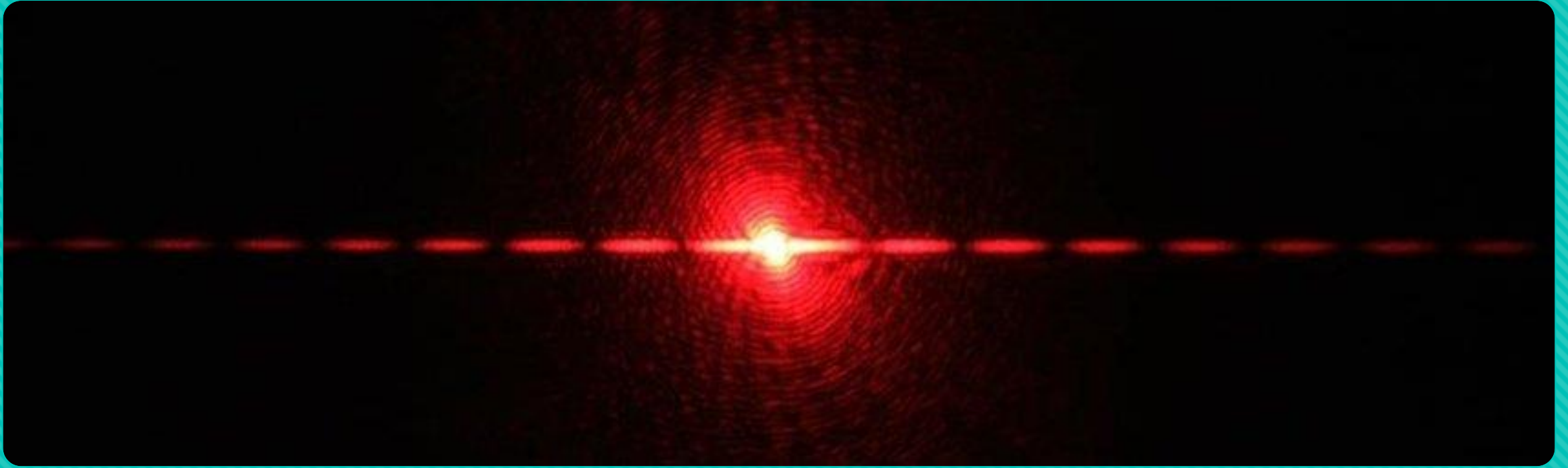
- La **largeur angulaire** des pics **diminue lorsque le nombre de fentes augmente** $\Delta\theta = \frac{2\lambda}{N \cdot a}$

5) Diffraction : définitions

- La diffraction est observée quand la propagation d'une **source étendue** est changée par un obstacle de taille équivalente à la longueur d'onde soit $< 1\mu m$



Lorsque les ondes rencontrent la fente, elles vont se casser et **interagir entre elles** pour former des régions **de différentes intensités lumineuses**.



6) Diffraction par une fente

La figure de diffraction comporte une **tâche centrale** de largeur L et de **forte intensité** et des **tâches satellites** d'intensités **plus faibles**.

6) Diffraction par une fente

- Pour trouver la position des **minimas** :

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

- **Largeur angulaire** de la tâche centrale :

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

- 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

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

7) Diffraction par une ouverture circulaire

- Grande tâche centrale : la **tâche d'Airy**, caractérisée par une **demi largeur angulaire**

Dans le **vide**

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

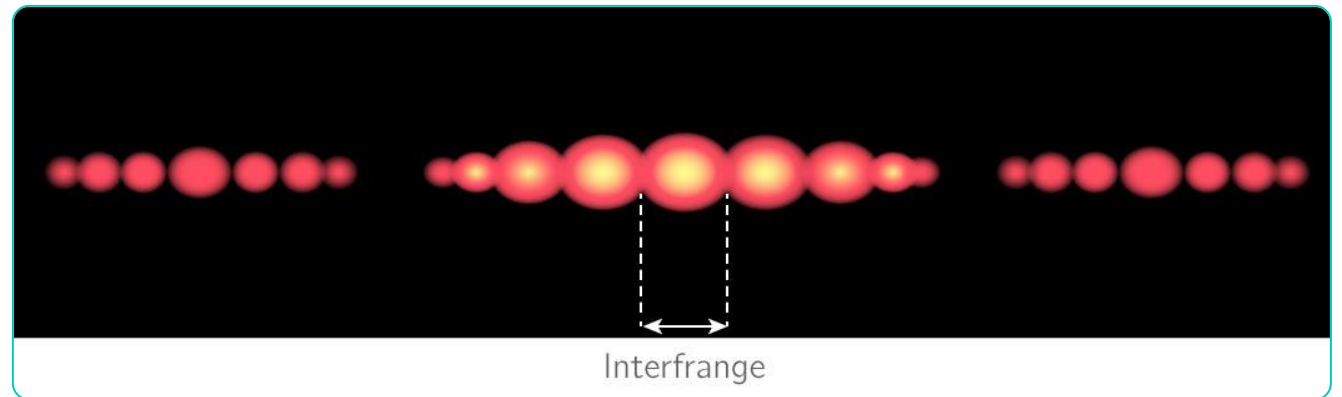
Dans un **milieu** d'indice n'

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



8) Diffraction par 2 fentes

- On considère 2 ondes qui vont passer par un système de fentes d'Young.
- La figure mélange donc interférences et diffraction.
- Les interférences varient rapidement en fonction de a
- La diffraction varie lentement en fonction de b



QCM3 : A propos de l'optique ondulatoire, donnez les vrais :

- A) Dans le cas d'interférences à 2 sources, si les 2 sources sont plus rapprochées l'une de l'autre, alors l'intervalle angulaire de la figure d'interférence sera plus petit.
- B) Dans le cas d'interférences à 2 sources, si les fentes sont verticales, alors les tâches observées sur la figure d'interférence seront horizontales.
- C) Dans le cas d'interférences à N fentes, plus il y a de fentes et plus la largeur des tâches diminue.
- D) Les figures de diffraction sont composées d'une tâche centrale et de tâches périphériques de même intensité lumineuse.
- E) Toutes les propositions sont fausses

QCMs

Salle socratique :
PHYSIQUETHEBEST

Correction :

- A) Faux → c'est l'inverse, ils sont inversement proportionnels
- B) Vrai
- C) Vrai
- D) Faux → les tâches périphériques ont une intensité plus faible.
- E) Faux