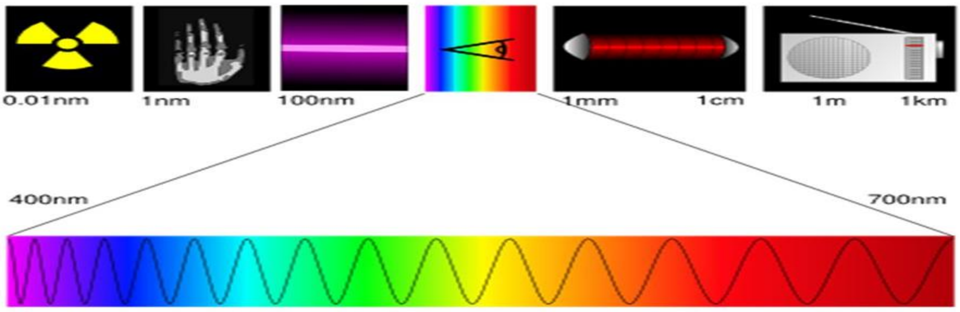
FICHE N°2 : OPTIQUE GEOMETRIQUE ET ONDULATOIRE

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

<u>Domaine visible</u> = 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**

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

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}$$

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

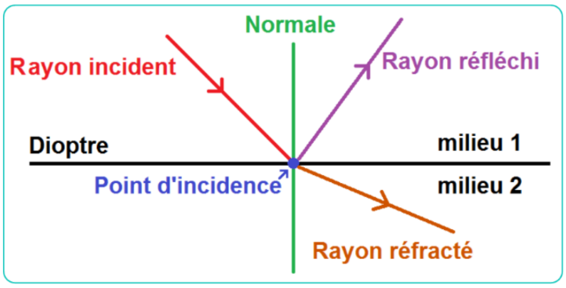
C'est donc λ qui est divisé par n $$v = \frac{c}{n} = \frac{\lambda \nu}{n} = \frac{\lambda}{n} \nu$$

3. OPTIQUE GEOMETRIQUE

	Optique géométrique	Optique ondulatoire
Définition	Étude des rayons, sur des systèmes simples	Étude de la lumière lorsqu'elle passe dans une fente/ un obstacle d'une largeur **proche de la longueur d'onde**
Ordres de grandeur	$> 1\mu m$	$\cong 1\mu m$
Applications	Lentilles minces + dioptres 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 n1 et n2**. Il peut être plan ou sphérique.

	Rayons	Angles
Incident	- -	Entre la normale et le rayon incident
De réflexion	Symétrique par rapport à l'incident	Égal à l'angle incident (→ loi de réflexion spéculaire)
Réfracté	Direction différente de l'incident	Entre la normale et rayon réfracté (→ loi de Snell-Descartes)

θ_1: *angle incident*

θ_1': *angle réfléch*

θ_2: *angle réfracté*

$\boldsymbol{\theta_1 = \theta_1'}$ **MAIS**
$\boldsymbol{\theta_2 \neq \theta_1}$

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

$$\boldsymbol{n_1 . \sin(\theta_1) = n_2 . \sin(\theta_2)}$$

Quelques cas particuliers :

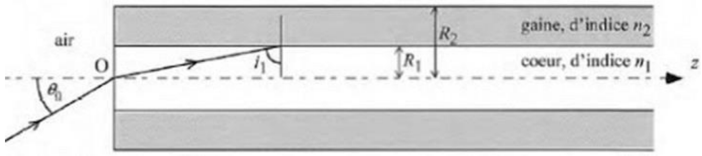
- si **l'angle incident = 0** → pas de déviation
- si $\boldsymbol{n1} = \boldsymbol{n2}$ → pas de déviation
- si le rayon incident vient depuis le milieu le plus réfringent (i.e. **n1>n2**) : possibilité de **réflexion totale**

Réflexion totale lorsque : $\boldsymbol{\theta_L \geq arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)}$ 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 (ncoeur > ngaine) → 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) :

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

Moment mnémotechnique :

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

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

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

$$NA = n.\sin\theta_m$$

Ou

$$NA \simeq \frac{nr}{D} \; si \; \theta_m \ll 1$$

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

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

θ_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 ≠ 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**

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

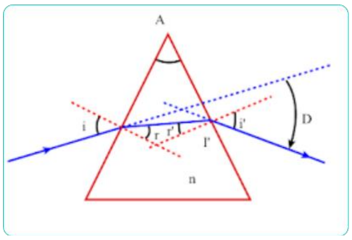
Loi de Cauchy :

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

Ainsi lorsque $\boldsymbol{\lambda}$ ↗, ***D*** ↘, 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.

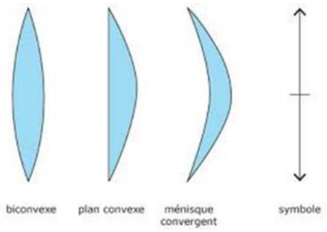
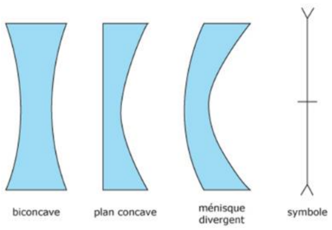


B. LENTILLES ET DIOPTRES

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 **dioptres sphériques**.

1) DEFINITIONS

Lentille : association de deux dioptres souvent sphériques.

Lentilles à bords minces	Lentilles à bords épais
	
Convergentes : Fait converger les rayons lumineux // venant de l'infini vers le foyer image Fi	**Divergentes** : Fait diverger les rayons lumineux // venant de l'infini en avant du dioptre -> foyer image virtuel
Corrige **l'hypermétropie**	Corrige la **myopie**

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

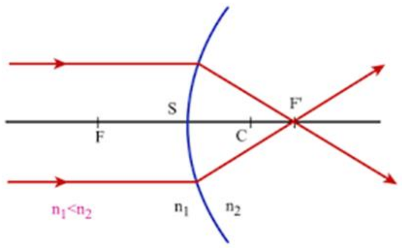
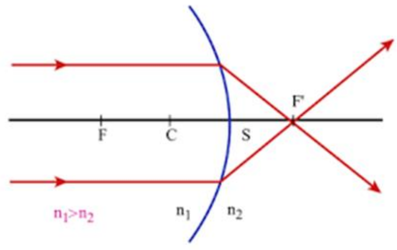
Stigmatisme : l'image d'un point est un point → ces 2 points sont dits **conjugués** → approché sauf dans le cas des miroirs plans rigoureux → dû à la **symétrie de révolution** des dioptres oculaires

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

<u>Rayons paraxiaux</u> : 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) DIOPTRES SPHERIQUES

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

S : sommet

C : centre

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

<u>D : vergence</u> (en dioptries)

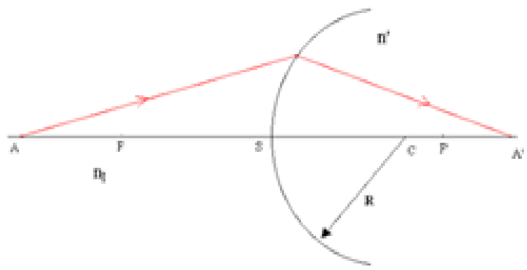
- D > 0 → dioptre **convergent**
- D < 0 → dioptre **divergent**

<u>$p = \overline{SA}$: distance objet</u>

- p > 0 → objet **virtuel**
- p < 0 → objet **réel**

<u>$p' = \overline{SA'}$: distance image</u>

- p' > 0 → image **réelle**
- p' < 0 → image **virtuelle**



3) FOYERS ET DISTANCES FOCALES

<u>Foyer objet F</u> : 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 $\overline{SA'} = +\infty$)

<u>Distance focale objet</u> : $-f = -\overline{SF}$

Le plan ⊥ à l'AO et passant par le foyer objet = « plan focal objet ».

<u>Foyer image F'</u> : 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 ($\overline{SA} = -\infty$).

<u>Distance focale image</u> : $f' = \overline{SF'}$

Le plan ⊥ à l'AO et passant par le foyer image = « plan focal image ».

Ainsi, on a (+++) :

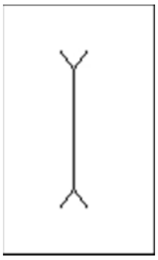
$$D = \frac{n'}{p'} - \frac{n}{p} = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$$

Moment mnémotechnique :

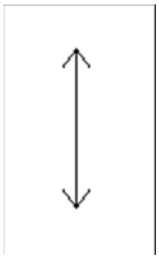
Pour se rappeler de $D = -\frac{n}{f}$ j'avais une phrase : « Devant moi Nadine fuit »
- Devant : D
- Moi : signe –
- Nadine : n
- Fuit : f

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

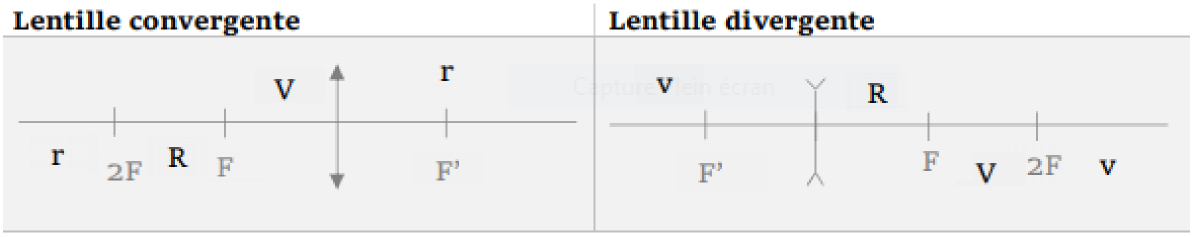
Si $|\gamma| > 1$ → image agrandie

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** : $\boxed{\delta = k\lambda}$

- **<u>Franges sombres</u>** → interférences destructives : les ondes arrivent <u>en opposition de phase</u> 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) :

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

Dans le cas où $\boldsymbol{D \gg a}$, la **différence de marche** s'écrit : $\boldsymbol{\delta = a.\sin\theta}$

Si l'angle est petit $\boldsymbol{\sin\theta = 0}$ donc $\boldsymbol{\delta = a.\theta}$

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

<u>Instant unités</u> :

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

Les maximas se trouvent sur tous les angles multiples de $\boldsymbol{\frac{\lambda}{a}}$

Les minimas se trouvent sur tous les angles multiples de $\boldsymbol{\frac{\lambda}{2a}}$

→ l'angle entre chaque pic = intervalle angulaire vaut : $\boldsymbol{\Delta\theta = \frac{\lambda}{a}}$

Ainsi si $\boldsymbol{\lambda}$ ↘ → maximas + serrés, si $\boldsymbol{\lambda}$ ↗ → maximas + éloignés

si $\boldsymbol{a}$ ↘ → maximas + éloignés, si $\boldsymbol{a}$ ↗ → maximas + serrés

<u>Interfrange i</u> : distance entre 2 franges sombres/claires consécutives ou longueur des tâches : $\boldsymbol{i = \frac{\lambda D}{a}}$

Intervalle angulaire en fct° de l'interfrange : $\boldsymbol{\Delta\theta = \frac{i}{D}}$

C. INTERFERENCES DANS DES LAMES MINCES

On considère ici des **sources étendues**.

Soit un milieu **transparent** mince délimité par <u>2 dioptres</u>, 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** : $\boldsymbol{\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2}}$

→ pour les interférences constructives, l'épaisseur minimale vaut : $\boldsymbol{e = \frac{\lambda}{4n}}$

→ pour les interférences destructives, l'épaisseur minimale vaut : $\boldsymbol{e = \frac{\lambda}{2n}}$

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

Instant unités :

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

2) LAME SUR UN MATERIAU D'INDICE OPTIQUE SUPERIEUR

On admet la **différence de marche** : $\boldsymbol{\delta = 2ne}$

→ pour interférences destructives, l'épaisseur minimale vaut : $\boldsymbol{e = \frac{\lambda}{4n}}$

→ pour interférences constructives, l'épaisseur minimale vaut : $\boldsymbol{e = \frac{\lambda}{2n}}$

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 : $\boldsymbol{\frac{\lambda}{a}}$

On peut également calculer les maximas d'intensité : $\boldsymbol{\theta = k\frac{\lambda}{a}}$

La **largeur** (angulaire) des pics diminue avec le nombre de fentes : $\boldsymbol{\Delta\theta = \frac{2\lambda}{N.a}}$

/!\ 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 $\boldsymbol{(< 1\mu m)}$. Ce phénomène concerne les **sources étendues** ≠ ponctuelles.

Mise en application : soit une source étendue et une ouverture ≅ 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 : $\boldsymbol{\theta = k\frac{\lambda}{b}}$

La largeur angulaire de la tâche centrale, est définie par : $\boldsymbol{\Delta\theta = \frac{2\lambda}{b}}$

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 :

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

Instant unités :
- $\boldsymbol{b}$ = $largeur\ de\ la\ fente/de\ l'obstacle$, en m
- $\boldsymbol{L}$ = $largeur\ de\ la\ tâche\ centrale$, en m

3) DIFFRACTION PAR UNE FENTE CIRCULAIRE

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

➔ demi-largeur angulaire $\boldsymbol{\Delta\theta = 0,61\frac{\lambda}{r}}$ dans le **vide**

➔ demi-largeur angulaire $\boldsymbol{\Delta\theta = 0,61\frac{\lambda}{rn'}}$ 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 $\boldsymbol{\frac{\lambda}{a}}$

- **la diffraction** : de modulation lente, a pour dimension angulaire : $\boldsymbol{\frac{\lambda}{b}}$

NB : Les interferences 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.

