

Chapitre 1 : Rappel mathématique

1.1 GRANDEURS PHYSIQUES ET INCERTITUDES

1.1.1 Décrire un phénomène physique.

Pour décrire un phénomène physique il est nécessaire d'attribuer à ce phénomène des grandeurs mesurables.

Mesurer une grandeur physique c'est lui associer un nombre comparé à une quantité de même nature que la grandeur à mesurer, cette quantité est prise comme référence et est appelée unité.

Exemple : la grandeur G est la longueur de la table et l'unité u est une règle non graduée. S'il faut reporter 20 fois la règle pour parcourir la longueur de la table, on en déduit que la mesure g de la grandeur G est telle que : $g = \frac{G}{u} = \frac{\text{longueur de la table}}{\text{longueur de la règle}} = 20$.

1.1.2 Système d'unités.

Un système d'unités est constitué des unités fondamentales choisies arbitrairement et des unités dérivées.

Le Système International compte sept (07) unités de base (fondamentales) qui sont :

Grandeurs	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Dimension de la grandeur
Longueur	mètre	m	L
Masse	kilogramme	kg	M
Temps	seconde	s	T
Intensité du courant électrique	ampère	A	I
Température thermodynamique	kelvin	K	Θ
Quantité de matière	mole	mol	N
Intensité lumineuse	candela	cd	J

Remarque01 :

Un autre système est utilisé par les physiciens. C'est le système CGS (centimètre Gramme Seconde).

1.1.3 Equation aux dimensions.

Toute grandeur physique G peut être exprimée en fonction des grandeurs fondamentales grâce à une relation appelée **équation aux dimensions**. C'est une équation qui relie la dimension d'une grandeur dérivée à celles des sept grandeurs de base.

Dans une équation aux dimensions, la dimension de la grandeur dérivée X est notée $[X]$.

La forme générale d'une équation aux dimensions est :

$$[X] = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\varepsilon N^\zeta J^\eta$$

Où :

- ❖ L, M, T, I, Θ , N et J sont les dimensions respectives des sept grandeurs de base.
- ❖ $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$ et η sont les exposants respectifs des sept grandeurs de base.

Remarque : Une **grandeur sans dimension**, ou **grandeur de dimension 1**, est une grandeur pour lesquels tous les exposants dimensionnels sont nuls.

Exemple : d'après la loi de Newton la force est donnée par $\vec{F} = m\vec{a}$ avec $a = \frac{d^2x}{dt^2}$.

$$[a] = [x][t]^{-2} \rightarrow [a] = LT^{-2} \text{ et } [F] = [m][a] \rightarrow [F] = MLT^{-2}$$

❖ Si la masse est exprimée en kilogramme (kg) et l'accélération en m/s^2 alors l'unité de la force est le newton (N).

❖ Dans le CGS la masse est en gramme(g), l'accélération en cm/s^2 et l'unité est la dyne.

$$1N = 1kg \cdot 1m/s^2 = 10^3g \cdot 10^2cm/s^2 \rightarrow 1newton = 10^5dynes.$$

Les équations aux dimensions permettent de :

➤ Trouver l'unité d'une grandeur.

Exemple : la force de frottement due à la viscosité d'un fluide est donnée par la formule de Stocks

$F = 6\pi\eta r v$, où r est le rayon de la bille, v la vitesse et η le coefficient de viscosité du fluide.

$$[\eta] = [F][r]^{-1}[v]^{-1} \rightarrow [\eta] = MLT^{-2}L^{-1}(LT^{-1})^{-1} \rightarrow [\eta] = ML^{-1}T^{-1}$$

D'où l'unité de la viscosité $\eta : \frac{kg}{(m \cdot s)}$.

➤ Vérifier l'homogénéité d'une relation.

Exemple : la période θ des oscillations d'un pendule simple de longueur λ est $\theta = 2\pi \sqrt{\frac{\lambda}{g}}$ où g

est l'accélération de la pesanteur.

$$[\theta] = [\lambda]^{\frac{1}{2}}[g]^{-\frac{1}{2}} \rightarrow [\theta] = L^{\frac{1}{2}}(LT^{-2})^{-\frac{1}{2}} \rightarrow [\theta] = L^{\frac{1}{2}}L^{-\frac{1}{2}}(T^{-2})^{-\frac{1}{2}} \rightarrow [\theta] = T.$$

La dimension de la période est bien celle d'un temps.

➤ Etablir la correspondance entre les unités dans deux systèmes différents.

Exemple : le travail W d'une force \vec{F} le long d'un déplacement \vec{l} colinéaire à \vec{F} est :

$$W = Fl.$$

$$[W] = [F][l] \rightarrow [W] = MLT^{-2}L \rightarrow [W] = ML^2T^{-2}$$

$$1kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} = 1joule = 10^3g \cdot (10^2cm)^2 \cdot s^{-2} = 10^7gcm^2s^{-2} = 10^7ergs$$

$$\underline{1joule = 10^7ergs}$$

1.2 Calcul d'erreurs

1.2.1 Complément mathématique

1.2.1.1 Dérivée d'une fonction.

On appelle dérivée d'une fonction $y = f(x)$ au point x la quantité définie par :

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

La dérivée est souvent notée par : $f'(x) = \frac{dy}{dx}$.

fonction	x^n	$\sin(x)$	$\cos(x)$	$\ln(x)$	e^x
dérivée	nx^{n-1}	$\cos(x)$	$-\sin(x)$	$\frac{1}{x}$	e^x

1.2.1.2 Opérations sur les dérivées

$$\begin{cases} y(x) = u(x) + v(x) + w(x) & \rightarrow y'(x) = u'(x) + v'(x) + w'(x) \\ y(x) = u(x) \cdot v(x) & \rightarrow y'(x) = u'(x) \cdot v(x) + u(x) \cdot v'(x) \\ y(x) = f(u(x)) & \rightarrow y'(x) = f'_u \cdot u'(x) \end{cases}$$

1.2.1.3 Dérivée logarithmique.

La dérivée de la fonction $\ln f(x)$ est : $\frac{f'(x)}{f(x)}$, on l'appelle aussi la dérivée logarithmique de $f(x)$.

Propriété :

$$y(x) = u(x) \cdot v(x) \quad \rightarrow \quad \frac{y'(x)}{y(x)} = \frac{u'(x)}{u(x)} + \frac{v'(x)}{v(x)}$$

Exemple : $y(x) = \frac{u(x)}{v(x)} \quad \rightarrow \quad \frac{y'(x)}{y(x)} = \frac{u'(x)}{u(x)} - \frac{v'(x)}{v(x)}$

1.2.1.4 Différentielle totale.

Soit la fonction à plusieurs variables $f(x, y, z)$.

La dérivée partielle de la fonction $f(x, y, z)$ par rapport à la variable x est :

$$f'_x = \frac{\partial f}{\partial x}. \text{ Où les variables } y \text{ et } z \text{ sont supposées constantes.}$$

On a de même : $f'_y = \frac{\partial f}{\partial y}$. Où les variables x et z sont supposées constantes.

$$f'_z = \frac{\partial f}{\partial z}. \text{ Où les variables } x \text{ et } y \text{ sont supposées constantes.}$$

On appelle différentielle totale, notée df , de la fonction $f(x, y, z)$ la quantité :

$$df = f'_x \cdot dx + f'_y \cdot dy + f'_z \cdot dz$$

Exemple :

$$\diamond f(x, y, z) = x + y + z \quad \rightarrow \quad f'_x = f'_y = f'_z = 1 \quad d'où \quad df = dx + dy + dz.$$

$$\diamond f(x, y) = x \cdot y \quad ; \quad f'_x = y \quad ; \quad f'_y = x \quad \rightarrow \quad df = ydx + xdy \quad \text{ou} \quad \frac{df}{f} = \frac{dx}{x} + \frac{dy}{y}$$

Remarque02 : la quantité $\frac{df}{f}$ est appelée différentielle logarithmique.

1.2.2 Mesures et précisions sur les grandeurs mesurées.

1.2.2.1 Erreur absolue et incertitude absolue.

➤ L'erreur absolue, notée dg , sur la mesure de la grandeur G est l'écart entre la mesure g et la valeur exacte g_e de la grandeur G .

$$dg = g - g_e$$

L'erreur absolue est une valeur algébrique et a la même unité que la grandeur physique.

➤ L'incertitude absolue, notée Δg , c'est l'écart maximum possible entre la mesure et la valeur exacte.

$$|dg| \leq \Delta g$$

L'incertitude absolue est positive et a la même unité que la grandeur physique.

1.2.2.2 L'erreur absolue et la différentielle totale.

Soit la grandeur physique $G(x, y, z)$ où $x, y,$ et z sont des grandeurs mesurables. L'erreur absolue sur la grandeur G représente la différentielle totale sur G .

$$dG = f'_x \cdot dx + f'_y \cdot dy + f'_z \cdot dz$$

L'incertitude absolue sur G est donc :

$$G = |f'_x| \cdot \Delta x + |f'_y| \cdot \Delta y + |f'_z| \cdot \Delta z$$

1.2.2.3 Erreur relative et incertitude relative.

➤ L'erreur relative est le rapport de l'erreur absolue sur la mesure : $\frac{dg}{g}$. C'est un nombre sans unité.

On peut donc assimiler l'erreur relative à la différentielle logarithmique.

➤ L'incertitude relative est le rapport : $\frac{\Delta g}{g}$. C'est un nombre sans unité.

Remarque03 : plus l'incertitude relative est petite, meilleure est la précision.
Quelques règles sur les incertitudes.

Grandeur	Erreur absolue	Incetitude absolue	Incetitude relative
$G = A \pm B$	$dG = dA \pm dB$	$\Delta G = \Delta A + \Delta B$	$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta A}{ A \pm B } + \frac{\Delta B}{ A \pm B }$
$G = A \cdot B$	$dG = BdA + AdB$	$\Delta G = B \Delta A + A \Delta B$	$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta A}{ A } + \frac{\Delta B}{ B }$
$G = \cos A$	$dG = -\sin A \cdot dA$	$\Delta G = -\sin A \cdot \Delta A$	$\frac{\Delta G}{G} = tgA \cdot \Delta A$

Remarque 04 :

Si les grandeurs sont liées, on doit d'abord calculer l'erreur afin de grouper les termes semblables (termes ayant la même erreur) et ensuite passer à l'incertitude.

Exemple : soit la grandeur $A(x, y, z)$ avec $z = g(x)$

$$dA = f'_x \cdot dx + f'_y \cdot dy + f'_z \cdot dz \quad \text{avec} \quad dz = g'(x) \cdot dx$$

$$dA = (f'_x + f'_z \cdot g'(x)) \cdot dx + f'_y \cdot dy \quad \rightarrow \quad \Delta A = |f'_x + f'_z \cdot g'(x)| \cdot \Delta x + |f'_y| \cdot \Delta y$$

1.2.3 La mesure et les chiffres significatifs.

Toute mesure ou calcul d'une grandeur est entaché d'erreurs. On exprime donc un résultat avec un certain nombre de chiffres significatifs.

1.2.3.1 Définition.

Les chiffres significatifs d'une mesure sont *les chiffres certains* et le *premier chiffre incertain*.

Exemple :

- 317 contient 3 chiffres significatifs 3 et 1 sont certains alors que 7 est incertain puisque la valeur est comprise entre 316 et 318.
- 317,0 contient 4 chiffres significatifs 3, 1 et 7 sont certains alors que 0 est incertain. La valeur est comprise entre 316,9 et 317,1.
- 0,0326 contient 3 chiffres significatifs 3 et 2 sont certains alors que 6 est incertain. La valeur est comprise entre 0,0325 et 0,0327.

❖ Le cas des zéros :

On dit que 2,000 a 4 chiffres significatifs. 5,06 a 3 chiffres significatifs tandis que 0,002 n'a qu'un chiffre significatif.

Les zéros à l'extrême gauche d'un nombre ne sont pas significatifs.

1.2.3.2 Calcul et chiffres significatifs.

1.2.3.2.1 Multiplication et division.

Le résultat d'une multiplication ou d'une division a autant de chiffres significatifs qu'en a la mesure la moins précise utilisée dans le calcul.

Exemple :

$$\frac{36,54 \times 58,4}{42,30} ; \text{ le calcul donne : } 50,44765957$$

Le résultat doit être donné avec 3 chiffres significatifs : 50,4.

1.2.3.2.2 Addition et soustraction.

Après une *addition ou une soustraction*, le résultat ne doit pas avoir plus de décimales (de chiffres après la virgule) que le nombre qui en comporte le moins.

Exemple : $220,2 + 968,114 - 12,51$; le calcul donne : 1175,804

Le résultat doit être donné avec une décimale : 1175,8.

Remarque 05 : règle d'écriture des résultats.

- En général et si c'est possible l'incertitude absolue doit être écrite avec un seul chiffre significatif.

Le résultat de la mesure ou du calcul doit avoir le même nombre de chiffres après la virgule que celui de l'incertitude absolue.

Chapitre 2 : OPTIQUE

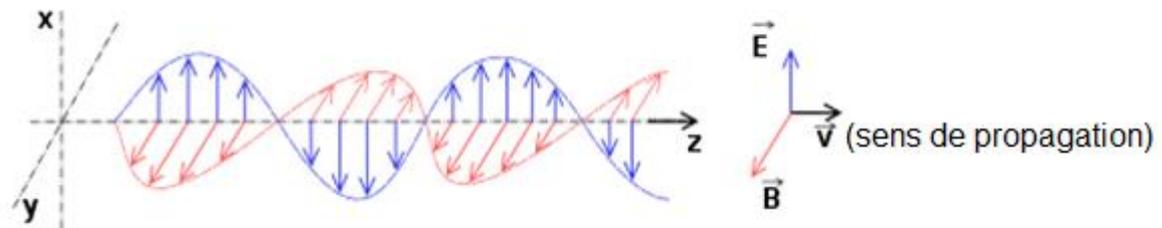
2.1 Les ondes électromagnétiques

L'Optique est la partie de la physique qui étudie les propriétés de la lumière.

2.1.1 Introduction

L'onde électromagnétique est formée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{B} perpendiculaires entre eux et chacun des deux champs oscille sinusoidalement. L'ensemble des deux champs se propage dans la direction perpendiculaire au plan (\vec{E}, \vec{B}) .

(Voir figure ci-dessous) :



2.1.2 Nature de la lumière

2.1.2.1 Caractéristiques d'une onde électromagnétique.

- fréquence f (Hz)
- célérité (vitesse de propagation) c (m/s)
- longueur d'onde λ (m)
- intensité (W/m^2)

La longueur d'onde est la distance parcourue pendant une période :

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}. \quad v \text{ et } \lambda \text{ dépendent du milieu de propagation :}$$

- Dans le vide : $c_0 = 299792458 \text{ m/s}$ ($\approx 300000 \text{ km/s}$).
- $v \leq c_0$
- $\lambda \leq \lambda_0$.

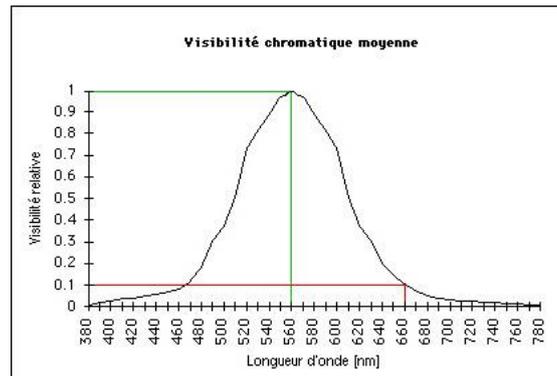
2.1.2.2 Domaine de la lumière visible.

Le domaine de la lumière visible s'étend du rouge au violet.

fréquence	Longueur d'onde λ_0	domaine
$4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ – $7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$	$0,76 \mu\text{m}(\text{rouge}) - 0,4 \mu\text{m}(\text{violet})$	<i>Lumière visible : rouge au violet</i>

2.1.2.3 Courbe de sensibilité de l'œil.

L'œil ne présente pas la même sensibilité dans toutes les longueurs d'onde. La courbe obtenue est appelée sensibilité de l'œil. On remarque, selon cette courbe, qu'une source de lumière située vers 660 nm doit être environ 10 fois plus lumineuse qu'une source de 560 nm pour être perçue avec la même intensité. Cette valeur n'est bien sûr qu'une moyenne, chaque individu possède sa propre sensibilité chromatique.



Maximum de sensibilité : 560 nm (vert-jaune)

2.1.2.4 Sources de la lumière.

Tout corps qui émet de la lumière est une *source lumineuse*.

La lumière peut-être :

- Soit produite par la source elle-même (lumière émise par une lampe, par une bougie ou celle émise par le soleil).
- Soit renvoyée par un corps éclairé (lumière diffusée par la lune).

On distingue trois types de substances :

- Les substances transparentes sont des substances qui se laissent parfaitement traverser par la lumière (le verre, l'eau limpide, la cellophane,).
- Les substances opaques sont des substances qui arrêtent totalement la lumière (le bois, l'acier, ...).
- Les substances translucides sont des substances qui absorbent plus ou moins la lumière suivant leur nature et leur épaisseur (papier huilé, verre martelé,...).

Remarque : l'épaisseur de la substance traversée intervient beaucoup dans la transmission de la lumière.

2.1.2.4.1 Lumière monochromatique.

C'est une lumière composée d'une seule longueur d'onde.

Ex. : Laser, Lampe à vapeur de sodium ...

2.1.2.4.2 Lumière polychromatique.

C'est un mélange de lumières monochromatiques.

Ex. : Lumière blanche (lumière du jour, ampoule ...), soleil, LED ...

2.1.2.5 Rayons lumineux. Faisceaux lumineux.

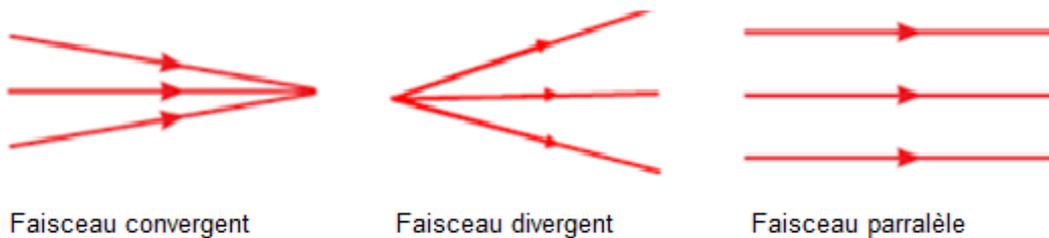
2.1.2.5.1 Rayons

L'expérience montre qu'à partir d'une source lumineuse la lumière se propage dans toutes les directions selon des lignes droites. Chaque ligne est appelé rayon lumineux. Un rayon lumineux est représenté par une droite sur laquelle une flèche indique le sens de propagation.



2.1.2.5.2 Faisceaux

En pratique un rayon lumineux n'existe pas ; les rayons sont toujours groupés en faisceaux. On distingue :



2.1.2.6 Indice de réfraction absolu d'un milieu transparent :

C'est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur la vitesse de la même lumière (même longueur d'onde) dans le milieu transparent. $n = \frac{c_0}{v}$

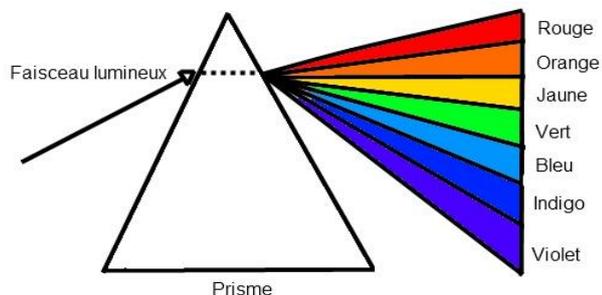
Remarque : l'indice de réfraction relatif d'un milieu1 par rapport au milieu2 est défini par :

$$n_{1/2} = \frac{\text{vitesse de la lumière dans le milieu2}}{\text{vitesse de la lumière dans le milieu1}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

- Indice de réfraction du vide : $n_0 = 1$.
- $n \geq 1$.
- $n_{air} \approx 1,0003$.
- $n_{eau} \approx 1,33$ ($v_{eau} \approx 225000km/s$).
- $n_{verre} \approx 1,5$ à $1,9$

L'indice de réfraction dépend de la couleur (sauf dans le vide).

$$\lambda_{air} \approx \lambda_0 \cdot \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$



2.1.2.6.1 Théorie corpusculaire de la lumière.

La lumière est constituée de particules élémentaires : les photons (Einstein 1905).

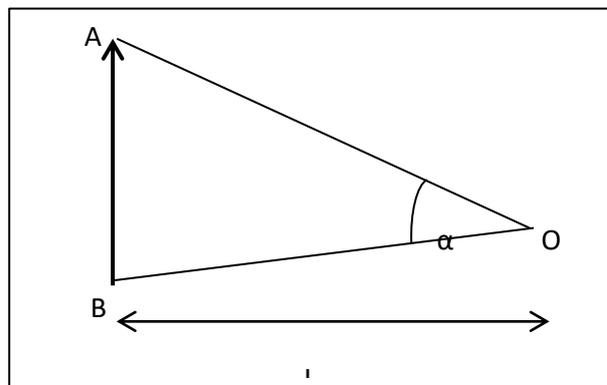
2.1.2.6.2 Propriétés du photon.

- masse nulle au repos
- vitesse de la lumière
- énergie : $E = h \cdot \nu$. $h \approx 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (constante de planck) et ν fréquence.

2.1.2.6.3 Diamètre apparent d'un objet.

Soit un objet AB et un observateur dont l'œil est en O. l'angle α des droites OA et OB joignant O aux extrémités A et B de l'objet est appelé :

Angle sous lequel on voit de O l'objet AB
 Ou : *angle apparent de l'objet AB*
 Ou : *diamètre apparent de l'objet AB*



Le diamètre apparent est $\alpha \approx \text{tg} \alpha = \frac{AB}{L}$

2.2 Optique Géométrique

2.2.1 Principes de l'optique géométrique et propagation de la lumière

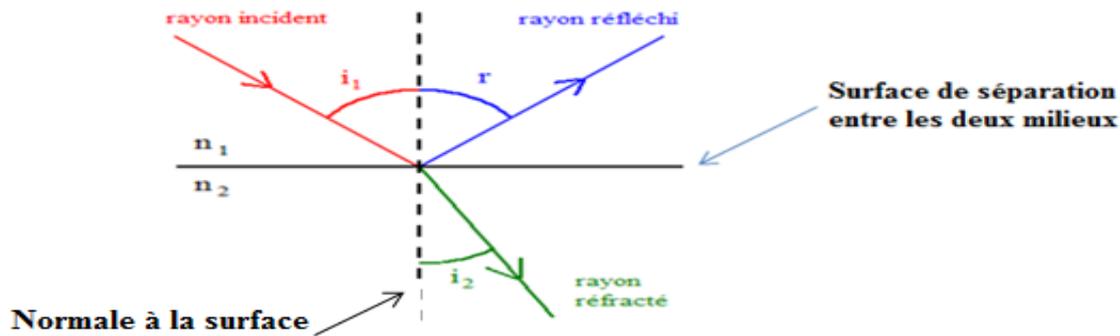
2.2.1.1 Principe de Fermat :

Le chemin suivi par la lumière est celui qui prend le moins de temps.

2.2.1.2 Principe de retour inverse :

Le chemin suivi par la lumière est indépendant du sens de parcours.

2.2.1.3 Propagation



Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.

2.2.2 Réfraction

2.2.2.1 Lois de Snell-Descartes.

Remarque06 :

Pour la réflexion la surface de séparation des deux milieux est appelée miroir, dans le cas de la réfraction la surface de séparation des deux milieux est appelée dioptre.

Le rayon incident et la normale au point d'incidence définissent le plan d'incidence.

➤ 1ère loi :

le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence.

➤ 2ème loi (loi de la réflexion) :

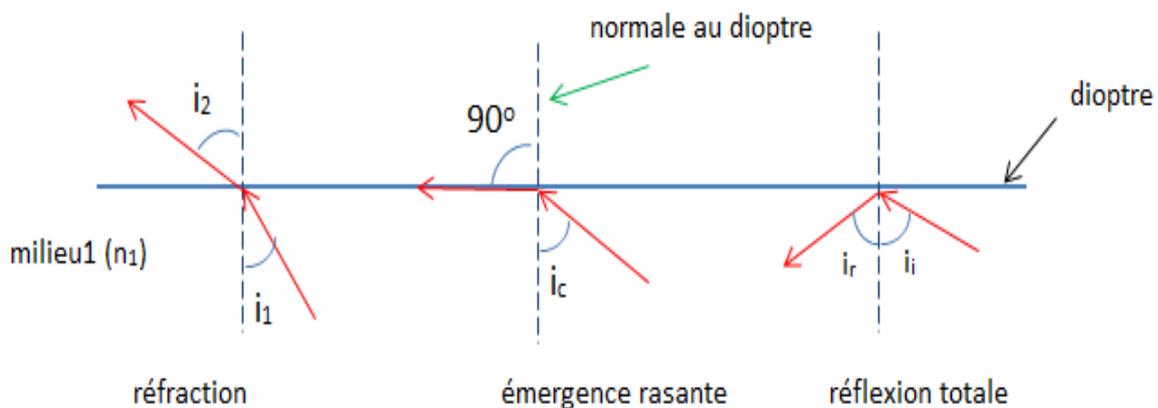
l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence $r = i_1$.

➤ 3ème loi (loi de la réfraction) :

$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$ avec n_1 : indice de réfraction du milieu 1 et n_2 : indice de réfraction du milieu 2.

Réfringence : Un milieu est d'autant plus réfringent que son indice de réfraction est important.

Le milieu 1 plus réfringent que le milieu 2 : $n_1 > n_2$



Le rayon réfracté s'écarte de la normale : $i_1 < i_2$ car $n_2 < n_1$.

L'angle critique i_c est défini par $\sin(i_c) = \frac{n_2}{n_1}$. Il correspond à une émergence rasante ($i_2 = 90^\circ$).

Application numérique : passage de l'eau ($n_1 = 1,33$) dans l'air ($n_2 = 1$):

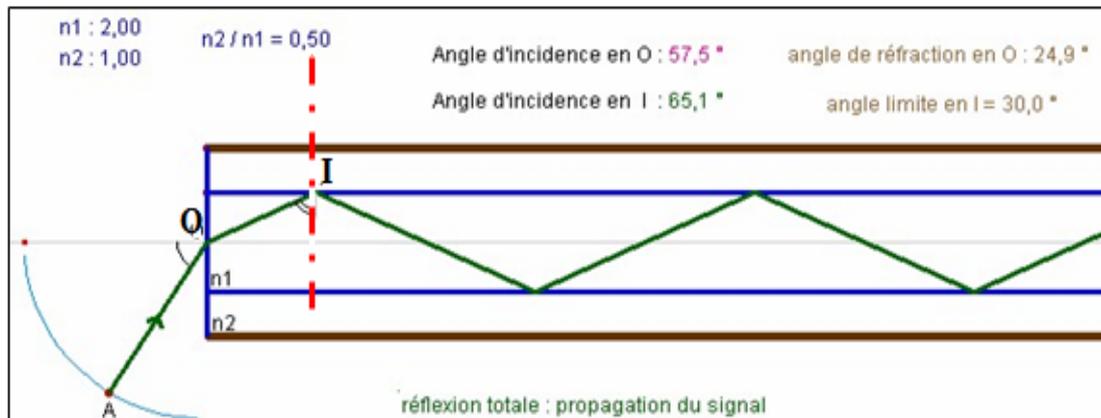
$$\sin(i_c) = \frac{1}{1,33} = 0,75 \rightarrow i_c \approx 49^\circ$$

Pour $i_1 < i_c$ on a réfraction.

Si $i_1 > i_c$ il n'y a pas de rayon réfracté : on parle alors de réflexion totale.

2.2.2.2 Applications de la réflexion totale :

2.2.2.2.1 Fibre optique



Une fibre optique est un guide de lumière.

• deux conditions pour avoir réflexion totale en I :

a) indice du cœur ($n_1=2,00$) > indice de la gaine ($n_2=1,00$). $\sin(i_c) = \frac{1}{2} = 0,5 \rightarrow i_c = 30^\circ$

b) angle d'incidence (i_1) > angle critique ($i_c = 30^\circ$).

2.2.2.3 Aspect énergétique de la réflexion et de la réfraction

2.2.2.3.1 La lumière transporte de l'énergie.

2.2.2.3.1.1 Coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion est défini par :

$$R = \frac{\text{énergie du faisceau réfléchi}}{\text{énergie du faisceau incident}}$$

2.2.2.3.1.2 Coefficient de transmission :

Le coefficient de transmission et T :

$$T = \frac{\text{énergie du faisceau réfracté}}{\text{énergie du faisceau incident}}$$

2.2.2.3.1.3 Loi de conservation de l'énergie :

La conservation de l'énergie total nous permet d'écrire :

$$R + T = 1$$

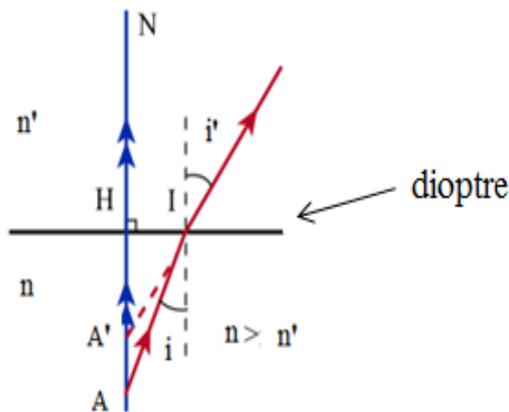
2.2.2.3.1.4 Formule de Fresnel (sous incidence normale) :

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

Application Numérique : passage air \leftrightarrow verre (indice 1,5) : $R = 0,04 = 4 \%$, $T = 96 \%$

2.2.2.4 DIOPTRE PLAN

2.2.2.4.1 Image donnée par un dioptre plan.



Remarque07 : l'expérience montre qu'un dioptré plan donne de bonnes images, si les rayons traversent le dioptré sous faible incidence.

A point objet réel dans un milieu d'indice n .

Dans le triangle AHI : $tg(i) = \frac{HI}{HA}$.

Dans le triangle A'HI : $tg(i') = \frac{HI}{HA'}$

Donc :

$$\frac{tg(i')}{tg(i)} = \frac{HA}{HA'} \approx \frac{\sin(i')}{\sin(i)} \quad (\text{faible incidence}).$$

La loi de la réfraction donne : $n \sin(i) = n' \sin(i') \rightarrow \frac{\sin(i')}{\sin(i)} = \frac{n}{n'}$.

En désignant par p la longueur HA (position de l'objet) et par p' la longueur HA' on obtient :

$$\frac{n}{p} = \frac{n'}{p'}$$

Cas particulier : si l'un des milieux est l'air ($n' = 1$) l'autre milieu, verre, eau,... étant plus réfringent ($n > n'$) on a alors : $p' = \frac{p}{n}$. Le point objet A subit alors un déplacement apparent

AA' tel que :

$$AA' = p - p' = p - \frac{p}{n} = p \left(1 - \frac{1}{n} \right) = p \left(\frac{n-1}{n} \right).$$

2.2.2.4.2 Lames à faces parallèles.

1) Marche d'un rayon lumineux à travers une lame à faces parallèles d'épaisseur « e ». $n_1 = 1$ (air).

On a $n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2) \rightarrow \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$

Et on a aussi : $n_2 \cdot \sin(i'_2) = \sin(i'_1)$ avec $i'_2 = i_2$ (alterne-internes).

D'où : $i_1 = i'_1$. Le rayon émergent est parallèle au rayon incident.

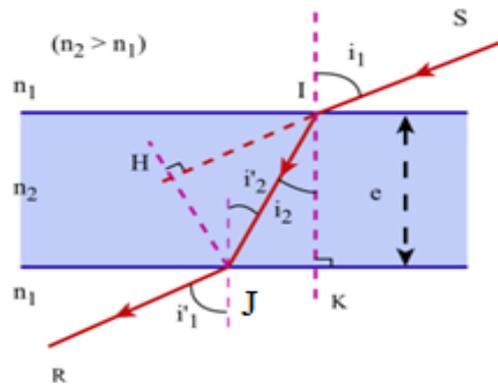
Ce rayon a cependant subi un déplacement latéral.

Dans le triangle IHJ : $JH = d = IJ \sin(i_1 - i_2)$.

Dans le triangle IJK : $IK = e = IJ \cos(i_2) \rightarrow IJ = \frac{e}{\cos(i_2)}$.

D'où le déplacement latéral : $d = \frac{e \cdot \sin(i_1 - i_2)}{\cos(i_2)}$.

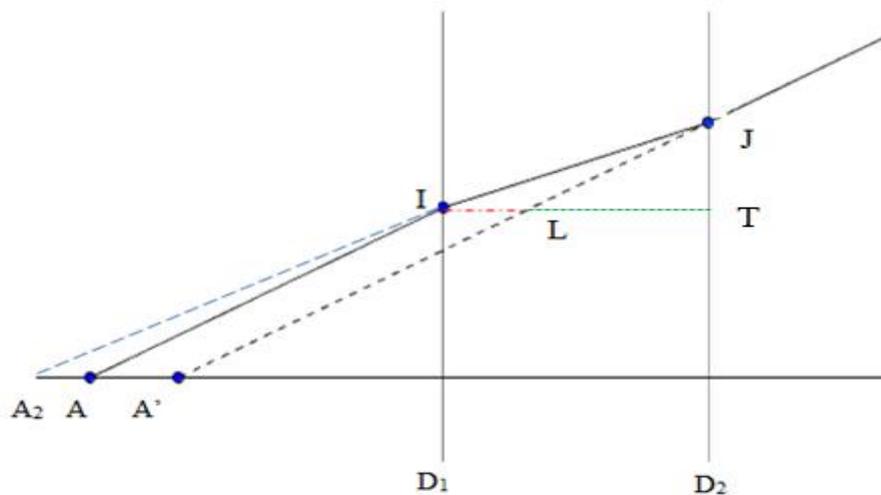
Cas limites : $i_1 = i'_1 = 0 \rightarrow e = 0$ et $i_1 = 90^\circ$ et $i_2 = i_c = \lambda$ (angle limite) $\rightarrow d = e$.



Images d'objets vus à travers une lame à faces parallèles.

Nous supposons les conditions d'obtention de bonnes images réunies.

A : objet réel émettant un rayon AI. Dans la lame ce rayon semble provenir de A2 image virtuelle de A donnée par le premier dioptre rencontré. Ce rayon intérieur IJ fait jouer à A2 le rôle d'objet réel pour le deuxième dioptre qui donne une image virtuelle A'. AA'LI est un parallélogramme.



Le rapprochement de l'objet A est AA' tel que AA' = IL. Or IL est le rapprochement apparent que fait subir le dioptre D2 à un point objet situé en I, à la distance IT=e de son plan.

$$IL = e \cdot \frac{n-1}{n} \quad d'où \quad \underline{AA' = e \cdot \frac{n-1}{n}}.$$

Le rapprochement est indépendant de la position de l'objet ; il ne dépend que de l'épaisseur de la lame et de son indice.

Exemple : quel est le déplacement subit par les objets examinés à travers un vitre de magasin, d'indice 1,5 et d'épaisseur 6mm.

$$AA' = e \cdot \frac{n-1}{n} \rightarrow AA' = 6 \cdot \frac{1,5-1}{1,5} \rightarrow AA' = 2mm. \text{ Ce déplacement est très faible}$$

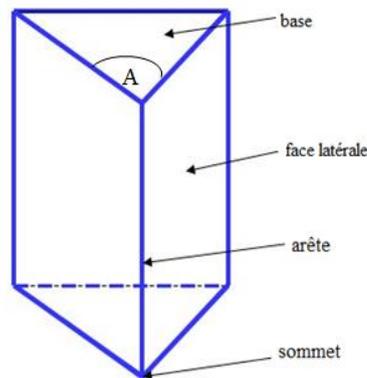
2.2.2.4.3 LE PRISME

2.2.2.4.3.1 Définitions.

Un prisme est milieu transparent limité par deux dioptrés non parallèles.

Les deux plans qui limitent ce milieu sont appelés *faces* du prisme.

L'intersection des faces est l'*arête* ; à l'opposé de l'arête se trouve la base. L'angle délimité par les deux dioptrés et l'arête est l'*angle du prisme* \hat{A} .



2.2.2.4.3.2 Formules du prisme.

Réfraction au point d'incidence :

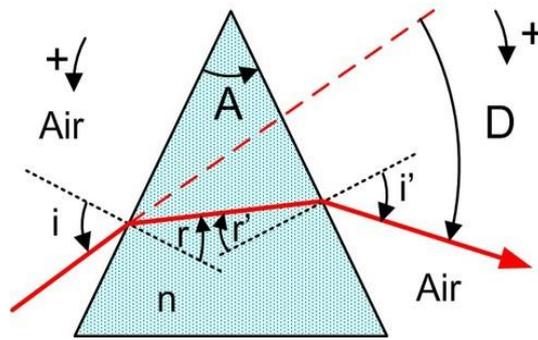
$$\sin \hat{i} = n \sin \hat{r}.$$

Réfraction au point d'émergence :

Si \hat{r}' est l'angle d'incidence du rayon intérieur sur la face de sortie, et si $r' < \lambda$.

λ (angle limite) ; alors le rayon incident émerge sous un angle \hat{i}' tel que :

$$n \sin \hat{r}' = \sin \hat{i}'.$$



Relation entre \hat{r} , \hat{r}' et \hat{A} :

$$\hat{A} = \hat{r} + \hat{r}'$$

Déviaton d'un rayon :

La déviaton est l'angle \hat{D} entre le rayon incident et le rayon émergent. $\hat{D} = \hat{i} + \hat{i}' - \hat{A}$

Les quatre formules :

$$\begin{cases} \sin \hat{i} = n \sin \hat{r} \\ n \sin \hat{r}' = \sin \hat{i}' \\ \hat{A} = \hat{r} + \hat{r}' \\ \hat{D} = \hat{i} + \hat{i}' - \hat{A} \end{cases} \text{ Sont les formules du prisme.}$$

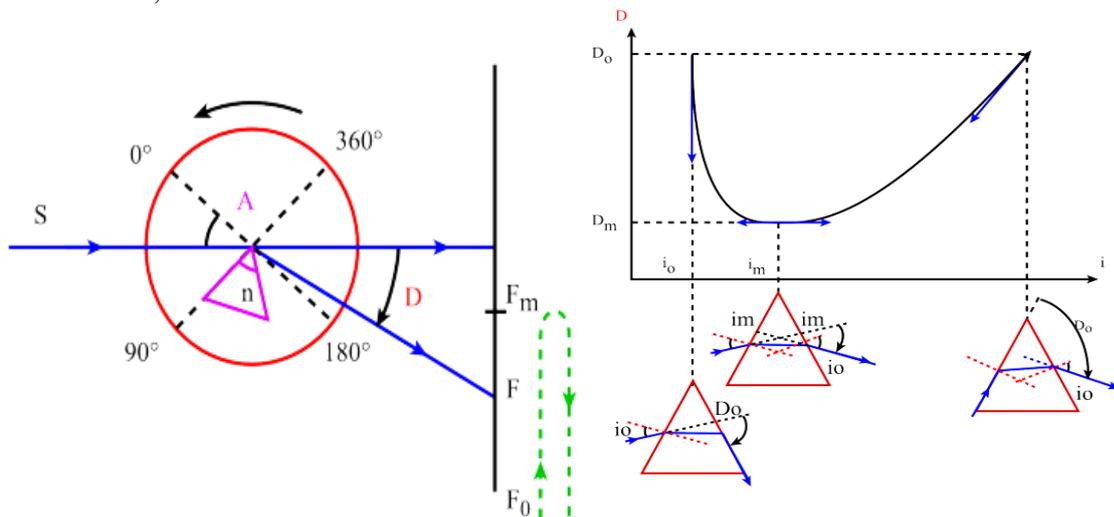
❖ Cas d'un prisme de petit angle \hat{A} avec rayon incident presque normal.

Dans ce cas les formules du prisme deviennent :

$$\begin{cases} \hat{i} = n \hat{r} \\ n \hat{r}' = \hat{i}' \\ \hat{A} = \hat{r} + \hat{r}' \\ \hat{D} = n(\hat{r} + \hat{r}') - \hat{A} \end{cases} \rightarrow \hat{D} = n\hat{A} - \hat{A} \rightarrow \hat{D} = (n - 1)\hat{A}$$

Variaton de la déviaton \hat{D} avec l'angle d'incidence \hat{i}

L'expérience montre que quand l'incidence varie, la déviaton \hat{D} décroît passe par un minimum, et croît ensuite.



On montre qu'au minimum de la déviation, l'angle d'émergence est égal à l'angle d'incidence :

$$\widehat{i'} = \widehat{i} = \widehat{i}_m \quad \text{et} \quad \widehat{r'} = \widehat{r} = \widehat{r}_m = \frac{\widehat{A}}{2}$$

$$\text{D'où } \widehat{D}_m = 2\widehat{i}_m - \widehat{A} \rightarrow \widehat{i}_m = \frac{(\widehat{A} + \widehat{D}_m)}{2}.$$

2.2.2.4.3.3 Application : mesure de l'indice de réfraction d'un milieu.

On mesure \widehat{A} et \widehat{D}_m . La loi de Descartes $n = \frac{\sin \widehat{i}}{\sin \widehat{r}}$ s'écrit alors :

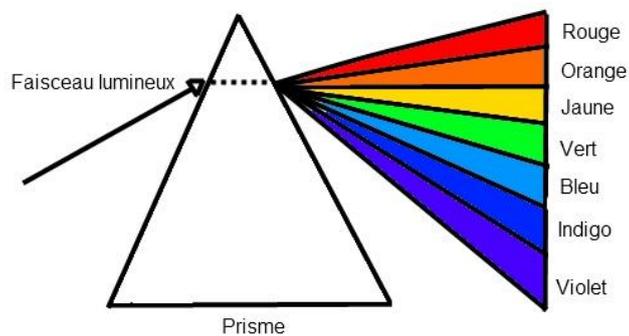
$$n = \frac{\sin \frac{\widehat{D}_m + \widehat{A}}{2}}{\sin \frac{\widehat{A}}{2}}$$

La détermination de l'indice n se ramène donc à la mesure de \widehat{A} et \widehat{D}_m .

Variation de la déviation avec l'indice.

On constate que la déviation augmente avec l'indice de réfraction du prisme.

Observation : La lumière est décomposée par le prisme. Le violet est plus dévié que le rouge.



Explication : phénomène de dispersion : $D(\text{couleur}) : \lambda \searrow D \nearrow$ et $D(n) : n \nearrow D \nearrow$

Finalemnt : $\lambda \searrow n \nearrow$

n dépend de λ : le milieu est *dispersif*. Le seul milieu non dispersif est le vide ($n_0 = 1$).

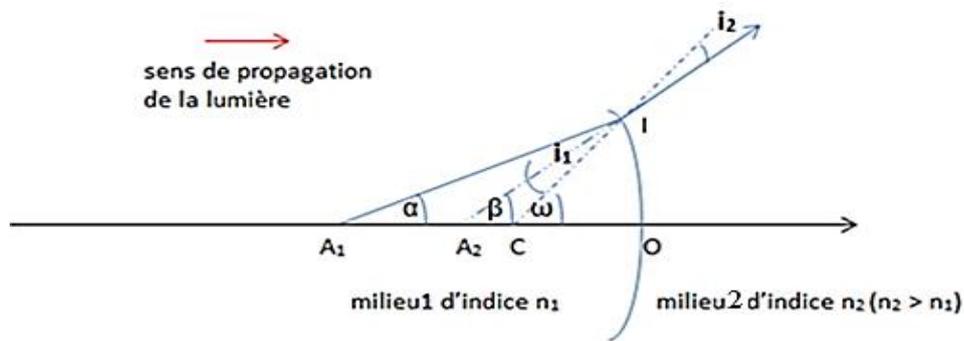
Remarque : deux conditions d'émergence

- ❖ $A \leq 2\lambda$. λ angle limite.
- ❖ L'angle d'incidence doit-être compris entre certaines limites.

2.2.2.5 Dioptrés sphériques

2.2.2.5.1 Définition

Un dioptré sphérique est un ensemble constitué de deux milieux transparents, homogènes et isotropes, d'indices différents séparés par une surface sphérique.



2.2.2.5.2 Relation de position pour un dioptre sphérique.

r : rayon du dioptre sphérique.

n_1 : indice du milieu1.

n_2 : indice du milieu2.

i_1 et i_2 étant petits (conditions de Gauss), on a :

$n_1 \cdot i_1 = n_2 \cdot i_2$ (Loi de Kepler i.e : $\sin \alpha \approx \alpha$).

D'autre part on a :

$$\begin{cases} \omega = \alpha + i_1 \\ \omega = \beta + i_2 \end{cases} \rightarrow n_1 \cdot (\omega - \alpha) = n_2 (\omega - \beta)$$

O et H presque confondus (ouverture petite).

$$\frac{\overline{HI}}{\overline{OA_1}} \approx \alpha ; \frac{\overline{HI}}{\overline{OA_2}} \approx \beta \text{ et } \frac{\overline{HI}}{\overline{OC}} \approx \omega.$$

$$n_1 \cdot (\omega - \alpha) = n_2 (\omega - \beta) \rightarrow n_1 \cdot \left(\frac{\overline{HI}}{\overline{OC}} - \frac{\overline{HI}}{\overline{OA_1}} \right) = n_2 \left(\frac{\overline{HI}}{\overline{OC}} - \frac{\overline{HI}}{\overline{OA_2}} \right) \rightarrow n_1 \cdot \left(\frac{1}{\overline{OC}} - \frac{1}{\overline{OA_1}} \right) = n_2 \left(\frac{1}{\overline{OC}} - \frac{1}{\overline{OA_2}} \right).$$

En posant : $P' = \overline{OA_2}$, $P = \overline{OA_1}$ et $r = \overline{OC}$, la relation précédente s'écrit :

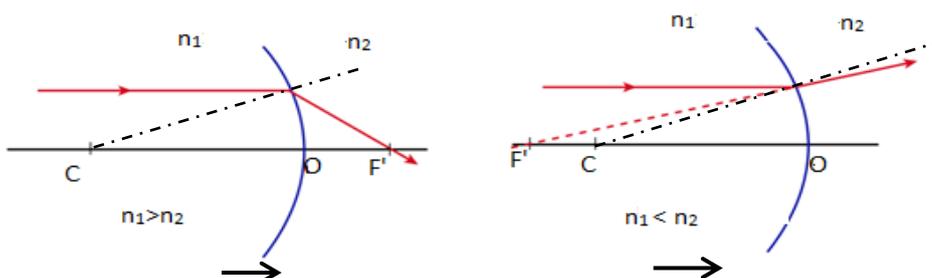
La Formule de position :

$$\frac{n_1}{p} - \frac{n_2}{p'} = \frac{n_1 - n_2}{r}$$

2.2.2.5.3 Convention des signes :

- ❖ O sommet du dioptre : origine de l'axe, l'axe est orienté positivement dans le sens de propagation.
- ❖ $P < 0$: objet réel. $P > 0$ objet virtuel.
- ❖ $P' < 0$: image virtuelle. $P' > 0$ image réelle.

Foyer image.



Le foyer image F' est le point de l'axe principal dont l'objet est situé à l'infini.

La distance focale est : $f' = \overline{OF'}$.

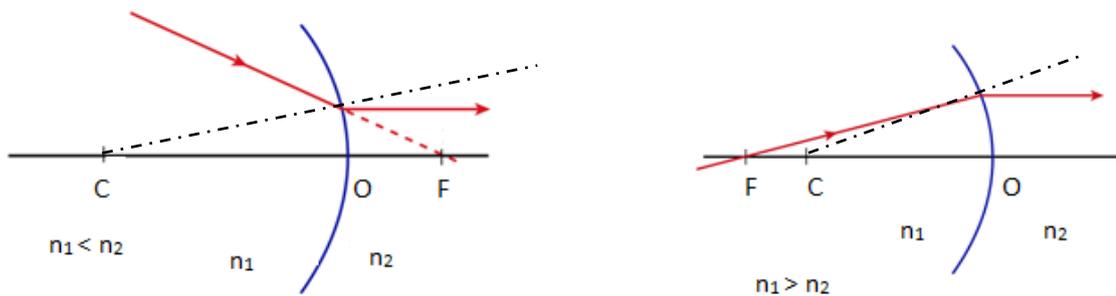
$$\frac{n_1}{p} - \frac{n_2}{p'} = \frac{n_1 - n_2}{r} \rightarrow \frac{n_1}{\infty} - \frac{n_2}{f'} = \frac{n_1 - n_2}{r} \rightarrow \boxed{f' = -r \cdot \frac{n_2}{n_1 - n_2}}$$

Foyer objet.

Le foyer objet F est le point de l'axe principal dont l'image est située à l'infini.

La distance focale est : $f = \overline{OF}$.

$$\frac{n_1}{p} - \frac{n_2}{p'} = \frac{n_1 - n_2}{r} \rightarrow \frac{n_1}{f} - \frac{n_2}{\infty} = \frac{n_1 - n_2}{r} \rightarrow \boxed{f = r \cdot \frac{n_1}{n_1 - n_2}}$$



Remarque08 : la relation de position peut être mise sous la forme suivante :

$$\boxed{\frac{f}{p} + \frac{f'}{p'} = 1}$$

Cette formule est connue par : la formule de Descartes.

2.2.2.5.4 Vergence (convergence) d'un dioptre sphérique.

On définit la vergence d'un dioptre par la relation : $V = \frac{n_2 - n_1}{r}$

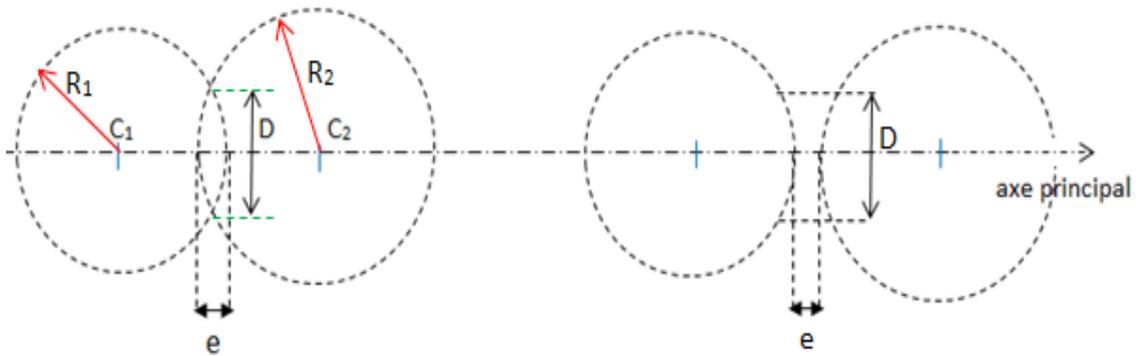
L'unité de la vergence est la dioptrie ($\frac{1}{m} = m^{-1}$). 1 dioptrie=1D (ou 1δ)

Le dioptre sera convergent si sa vergence est positive c'est-à-dire si le centre de courbure C est situé dans le milieu d'indice de réfraction le plus grand.

2.2.2.6 Les lentilles sphériques minces

2.2.2.6.1 Lentille sphérique.

Une lentille sphérique est constituée par un milieu transparent limité par deux dioptres sphériques.



2.2.2.6.2 **Éléments géométriques.**

Les rayons R_1 et R_2 des sphères qui constituent les faces de la lentille sont les *rayons de courbure*.

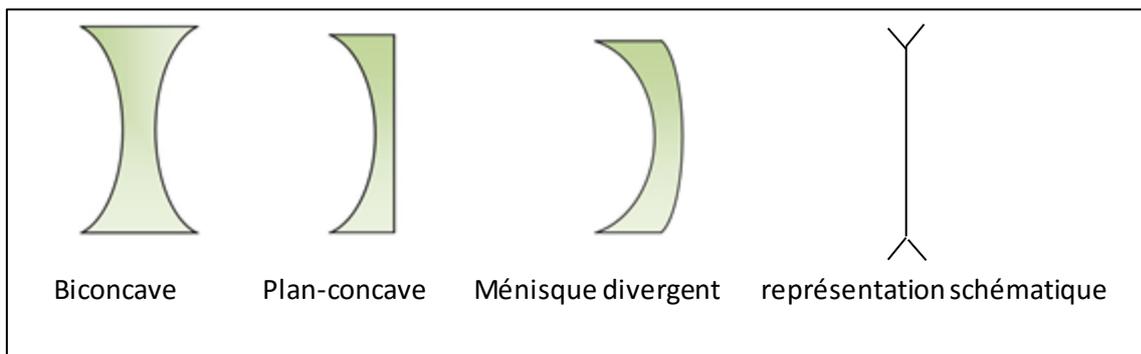
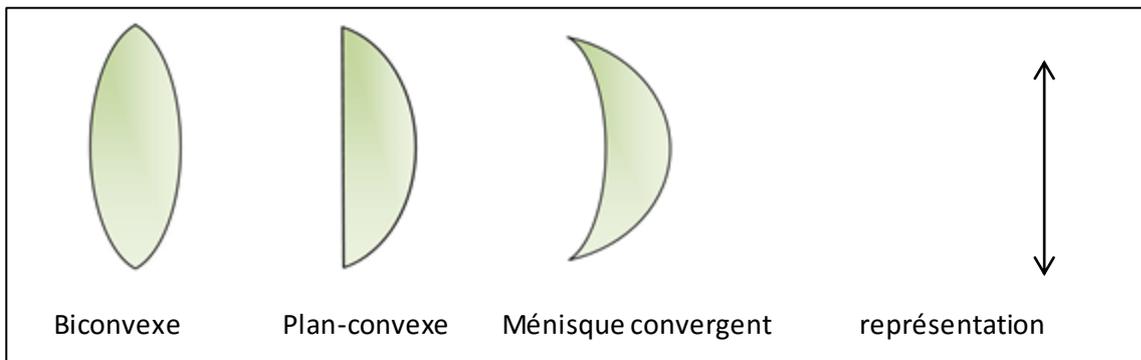
La droite C_1C_2 qui passe par les centres de ces sphères est l'*axe principal*.

Le diamètre D du cercle, normal à l'axe principal, qui limite la lentille, est le *diamètre d'ouverture*.

La portion e de l'axe principal située dans le milieu transparent qui constitue la lentille est son épaisseur.

2.2.2.6.3 **Classification des lentilles. On distingue :**

➤ Les lentilles à bords minces, ou lentilles convergentes, comprenant trois types.



- Les lentilles à bords épais, ou lentilles divergentes, comprenant trois types.
- on supposera que les deux sommets des deux calottes sont confondus en un point O appelé centre optique de la lentille. Tout rayon passant par le centre optique traverse la lentille sans déviation.

2.2.2.6.4 Lentilles convergentes.

2.2.2.6.4.1 Foyers. Plans focaux. Distance focale.

Foyer image :

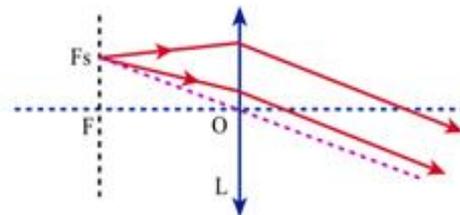
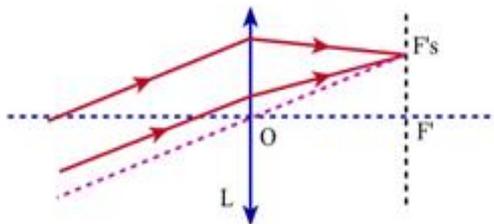
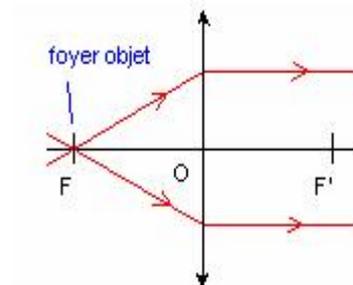
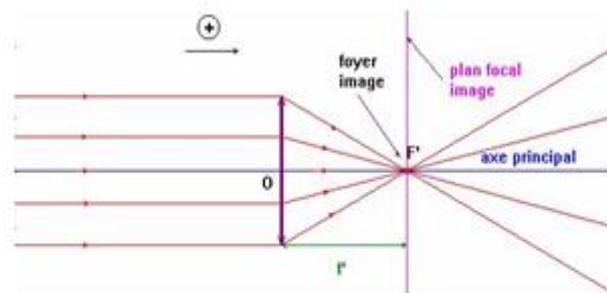
Tout faisceau de rayons incidents parallèles à l'axe principal traversent la lentille en convergeant en un point F' de cet axe. F' est le *foyer principal image* : il est *réel*.

Foyer objet :

Tout faisceau, incident, de rayons divergents dont le sommet est le point F, symétrique de F' par rapport à O traversent la lentille en formant faisceau de rayons parallèles. F est le *foyer principal objet* : il est *réel*. Les deux foyers principaux (image et objet) sont symétriques par rapport au centre optique.

- Tout plan perpendiculaire à l'axe principal et contenant le foyer principal image F' est appelé plan focal image et tout point de ce plan est foyer secondaire image.
- Tout plan perpendiculaire à l'axe principal et contenant le foyer principal objet F est appelé plan focal objet et tout point de ce plan est foyer secondaire objet.
- Nous conviendrons d'appeler *distance focale*, et de la désigner par f , la longueur du *segment OF'*.

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

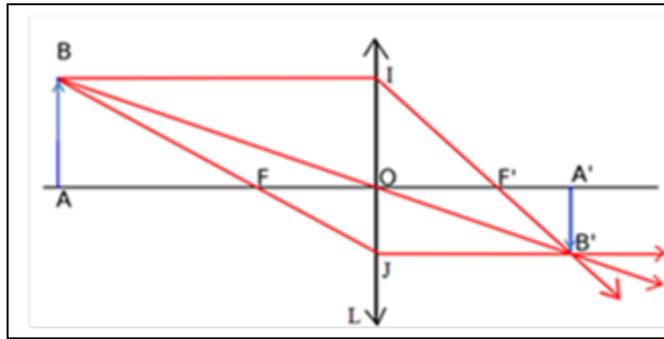


2.2.2.6.4.2 Formule des lentilles convergentes.

A'B' est l'image de AB. Les triangles semblables JOF et JIB donnent la relation : $\frac{JO}{JI} = \frac{OF}{IB} \dots (1)$.

Les triangles semblables IOF' et IJB' donnent la relation : $\frac{IO}{JI} = \frac{OF'}{JB'} \dots (2)$.

Par addition membre à membre des relations (1) et (2), et en tenant compte des segments égaux, on a :



$$\frac{JO + IO}{JI} = \frac{OF}{IB} + \frac{OF'}{JB'} \rightarrow OF' \left(\frac{1}{IB} + \frac{1}{JB'} \right) = 1 \text{ soit: } \boxed{\frac{1}{OA} + \frac{1}{OA'} = \frac{1}{OF'}}$$

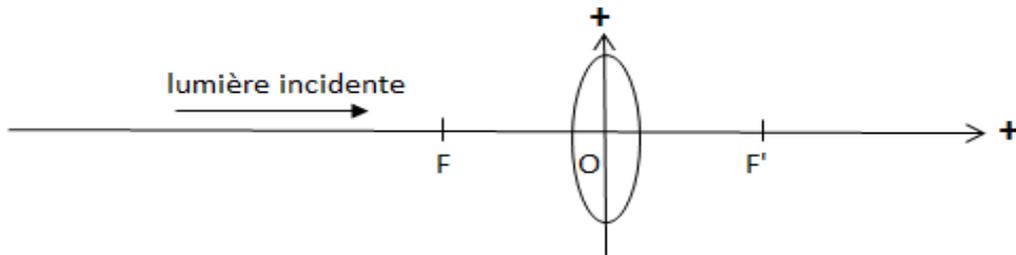
Cette relation permet de calculer une des trois longueurs OA, OA', OF', quand on connaît les deux autres.

Par division membre à membre les relations (1) et (2), et en tenant compte des segments égaux, on a :

$$\frac{JO}{IO} = \frac{JB'}{IB'} \text{ soit : } \boxed{\frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA}}$$

Cette relation permet de calculer le rapport des longueurs image-objet quand on connaît les positions.

Les formules précédentes peuvent être rendues générales en adoptant les conventions suivantes :



Origine : le centre optique O.

Sens positif sur l'axe principal :

le sens de la propagation de la lumière. Sens positif normale à l'axe principal : vers le haut.

p : position de l'objet, le segment algébrique \overline{OA} .

P' : position de l'image, le segment algébrique $\overline{OA'}$.

f : le segment $\overline{OF'}$. F' : foyer principal image.

o : le segment \overline{AB} (hauteur de l'objet).

i : le segment $\overline{A'B'}$ (hauteur de l'image).

Formules des lentilles :

Formule de position : $-\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$

Formule de grandissement : $\frac{i}{o} = \frac{p'}{p}$

2.2.2.6.4.3 Applications des lentilles convergentes.

- Collimateur : appareil destiné à produire des faisceaux de rayons parallèles.
- Loupe et microscope optique.
- Verres correcteurs de la vue : certains défauts de la vue sont corrigés avec des lentilles convergentes.

2.2.2.6.5 Lentilles divergentes.

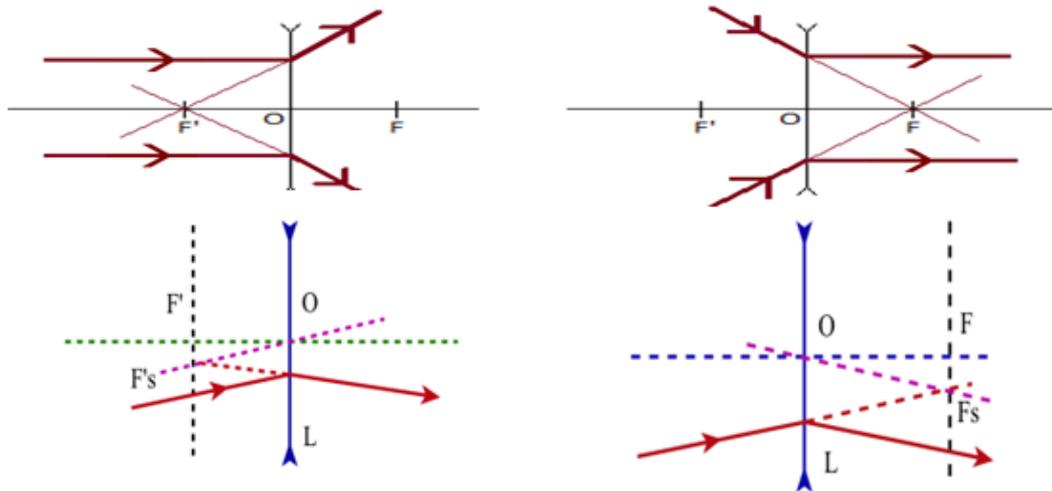
2.2.2.6.5.1 Foyers. Plans focaux. Distance focale.

Foyer image :

Tout faisceau de rayons incidents parallèles à l'axe principal traversent la lentille divergente en convergeant en un point F' de cet axe. F' est le *foyer principal image* : il est *virtuel*.

Foyer objet :

- Tout faisceau, incident, de rayons convergents dont le sommet est le point F , symétrique de F' par rapport à O traversent la lentille en formant faisceau de rayons parallèles. F est le *foyer principal objet* : il est *virtuel*.



- Tout plan perpendiculaire à l'axe principal et contenant le foyer principal image F' est appelé plan focal image et tout point de ce plan est foyer secondaire image.

Tout plan perpendiculaire à l'axe principal et contenant le foyer principal objet F est appelé plan focal objet et tout point de ce plan est foyer secondaire objet.

Formule des lentilles divergentes.

Les formules de position et de grandissement établies pour les lentilles convergentes restent valables avec les mêmes conventions pour les lentilles divergentes.

Remarque : la distance focale conservant la même définition : $f = \overline{OF'}$.

F' : foyer principal image étant virtuel, f est négatif.

Applications des lentilles divergentes.

- Augmentation du champ de vision à travers une lentille divergente.
- Téléobjectif : images très grandes d'objets très éloignés.
- Verres correcteurs de la vue : les lunettes à verres divergents sont portées par les myopes.

2.2.2.6.5.2 Vergence d'une lentille- lentilles accolées.

la vergence d'une lentille (convergence), notée V , est : $V = \frac{1}{f}$.

Dans le MKSA, l'unité de la vergence est la dioptrie (δ).

Exemple :

a) la vergence d'une lentille convergente de distance focale $f = +40\text{cm}$ est :

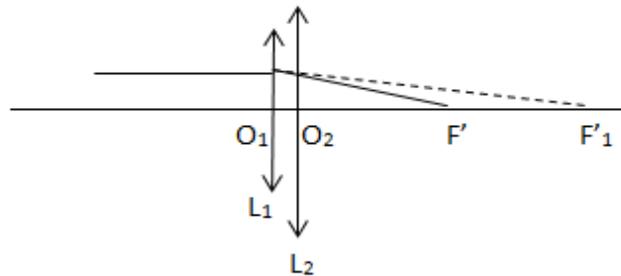
$$V = \frac{1}{0,40} = +2,5 \delta.$$

b) la vergence d'une lentille divergente de distance focale $f = -25\text{cm}$ est :

$$V = -\frac{1}{0,25} = -4 \text{ dioptries.}$$

Vergence d'un système de lentilles accolées.

L_1 et L_2 deux lentilles accolées de façon que leurs axes principaux coïncident. F'_1 : Image donnée par L_1 joue le rôle d'objet **virtuel** pour L_2 . L_2 donne une image **réelle** en F' .



$$-\frac{1}{O_2F'_1} + \frac{1}{O_2F'} = \frac{1}{f_2} \text{ soit: } \frac{1}{O_2F'} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{O_2F'_1}.$$

Si nous supposons les centres O_1 et O_2 confondus, $\overline{O_2F'_1} = \overline{O_1F'_1} = f_1$, on a : $\frac{1}{O_2F'} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1}$
 $\overline{O_2F'}$ représente la distance focale image f d'une lentille unique L remplaçant (L_1, L_2) .

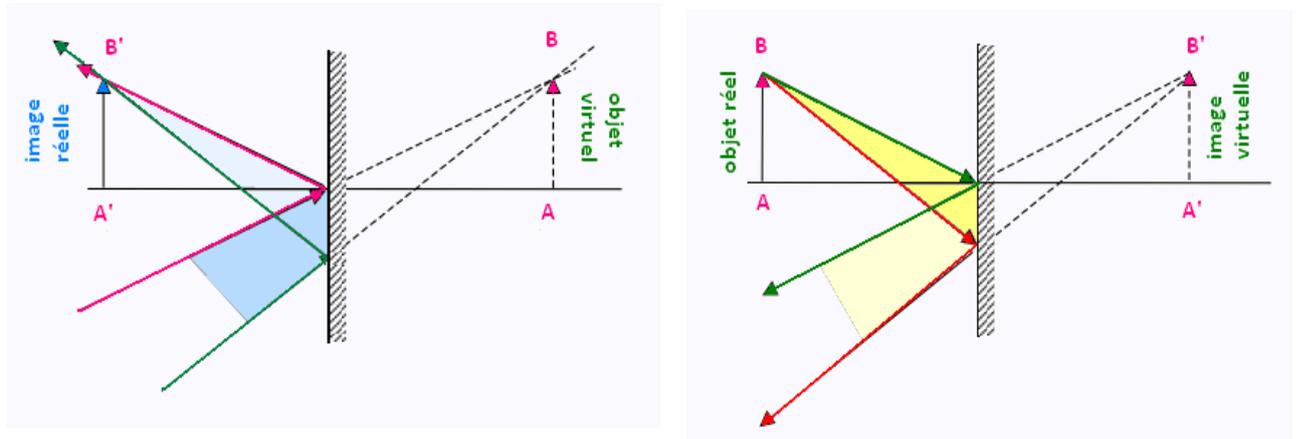
2.2.2.6.6 Théorème des vergences :

La vergence d'un système de lentilles minces accolées, de même axe principal, est égale à la somme **algébrique** des vergences de toutes les lentilles.

2.2.3 Réflexion

2.2.3.1 Image d'un objet donnée par un miroir plan.

Les deux figures ci-dessus montrent la construction d'image par un miroir plan, en vertu de la



loi de réflexion. De ces deux figures on peut généraliser sur la nature de l'objet et celle de l'image comme suit ;

- ❖ Objet ponctuel **réel** est sommet d'un faisceau incident **divergent**. Objet ponctuel **virtuel** est sommet d'un faisceau incident **convergent**.
- ❖ Image ponctuelle réelle est sommet d'un faisceau sortant **convergent**. Image ponctuelle **virtuelle** est sommet d'un faisceau sortant **divergent**.

2.2.3.2 Eléments du miroir sphérique.

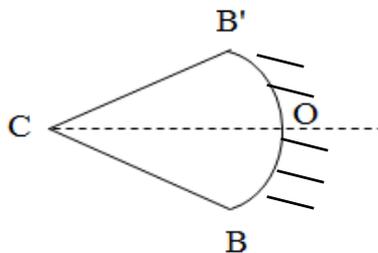
B et B' sont les bords du miroir.

O : sommet du miroir ; C : le centre du miroir.

OC : est l'axe principal du miroir.

L'angle $\widehat{BCB'}$ est l'ouverture du miroir.

Remarque : pour obtenir des images nettes il faut que l'ouverture du miroir soit petite et que les rayons incidents soient petits (les rayons lumineux proches de l'axe). Ceux sont les conditions de Gauss.



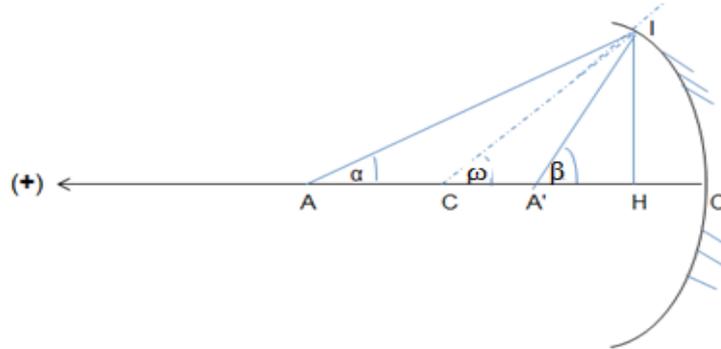
2.2.3.2.1 Relation fondamentale (de positions) des miroirs sphériques.

A : objet ponctuel sur l'axe principal.

A' : image ponctuelle de A donnée par le miroir sphérique.

Les angles α, β et ω étant petits on a :

$$\sin(\alpha) = \frac{HI}{HA} \approx \alpha ; \sin(\beta) = \frac{HI}{HA'} \approx \beta \text{ et } \sin(\omega) = \frac{HI}{HC} \approx \omega$$



Vu que l'ouverture du miroir est petite on peut considérer que H est proche de O est donc : $HC=OC$.

On obtient donc : $\frac{HI}{OA} \approx \alpha ; \frac{HI}{OA'} \approx \beta$ et $\frac{HI}{OC} \approx \omega$.

Des triangles ICA et ICA' on a :

$$\begin{cases} \omega = \alpha + i \\ \beta = \omega + i \end{cases} \rightarrow \underline{\alpha + \beta = 2\omega}$$

$$\alpha + \beta = 2\omega \rightarrow \frac{HI}{OA} + \frac{HI}{OA'} = \frac{2HI}{OC} \rightarrow \boxed{\frac{1}{OA} + \frac{1}{OA'} = \frac{2}{OC}}$$

En posant : $P' = \overline{OA'}$, $P = \overline{OA}$ et $r = \overline{OC}$, la relation précédente s'écrit :

$$\boxed{\frac{1}{P} + \frac{1}{P'} = \frac{2}{r}} \text{ C'est la formule de position.}$$

Convention des signes :

- Le sens de la réflexion de la lumière est le sens positif. Le sommet du miroir est l'origine de l'axe.
- $P > 0$: l'objet est réel. $P' > 0$: l'image est réelle.
- $P < 0$: l'objet est virtuel. $P' < 0$: l'image est virtuelle.
- $r > 0$: miroir concave. $r < 0$: miroir convexe.
-

Foyer d'un miroir sphérique.

Si l'objet est à l'infini ($p \rightarrow \infty$) alors $\frac{1}{p} = 0$.

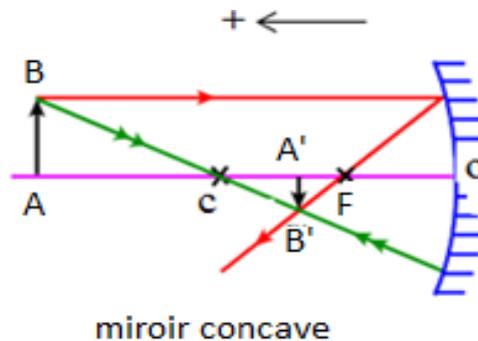
L'image sera au point F d'abscisse $p' = \frac{r}{2}$, ce point F tel que : $\overline{OF} = f = \frac{r}{2}$ est le foyer du miroir sphérique.

Conséquences : on déduit donc que :

- ❖ Tout rayon incident parallèle à l'axe principal se réfléchit en passant par le foyer F.
- ❖ Tout rayon incident passant par le foyer F se réfléchit parallèlement à l'axe principal.

Pour la construction de l'image $A'B'$ de l'objet AB nous avons besoin de 2 rayons.

- ❖ Un rayon incident parallèle à l'axe principal qui se réfléchit en passant par le foyer F .
- ❖ Un rayon incident passant par le centre C qui se réfléchit sur lui-même.



L'agrandissement (γ) est définie par :

$$\boxed{\gamma = -\frac{p'}{p}}. \text{ Pour } \gamma > 0 \text{ l'image est droite. Pour } \gamma < 0 \text{ l'image est renversée.}$$

Remarque :

- ❖ à partir de la formule de position $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}$, on peut retrouver les propriétés du miroir plan. En effet pour un miroir plan on a $r \rightarrow \infty$ d'où $p = -p'$ (image et objet sont symétriques par rapport au miroir et sont de natures opposées).
- ❖ Pour le grandissement on a $\gamma = -\frac{p'}{p} = -\frac{-p}{p} = +1$. L'image n'est pas renversée (droite) et de même hauteur que l'objet.

2.2.4 Instruments d'optique :

Nous étudierons quelques instruments d'optique constitués de lentilles minces, et on définira quelques grandeurs caractérisant ces instruments. On se limitera aux conditions de Gauss pour que la description soit simplifiée, parmi ces instruments L'œil, le microscope et la loupe.

2.2.4.1 L'œil :

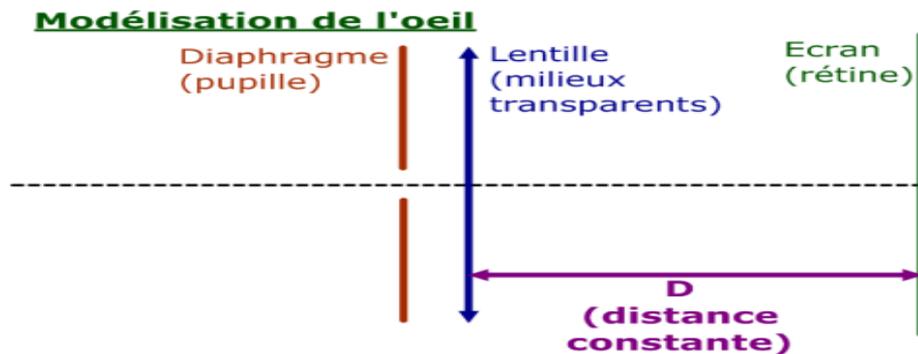
2.2.4.1.1 Description :

L'œil humain est un dispositif optique approximativement sphérique constitué des éléments principaux suivants :

- un dioptre sphérique, la cornée, par laquelle la lumière pénètre, et qui baigne dans une solution aqueuse (l'humeur aqueuse),
- un diaphragme, la pupille, qui permet de régler l'intensité lumineuse entrant dans l'œil.
- une lentille biconvexe, le cristallin, qui sépare l'extérieur de l'intérieur de l'œil.
- l'intérieur de l'œil, constitué d'un gel appelé l'humeur vitrée
- les récepteurs de lumière, qui tapissent la rétine.

➤ le nerf optique qui transmet les informations de la rétine au cerveau.

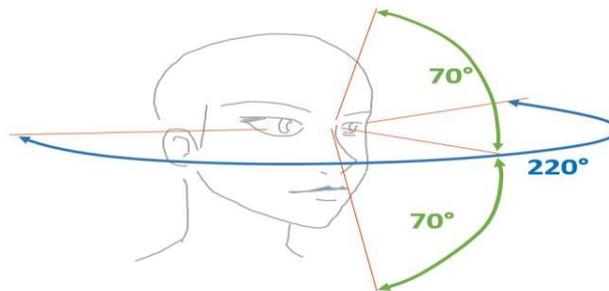
2.2.4.1.2 Modélisation de l'œil :



- La lumière qui pénètre dans l'œil traverse des milieux homogènes transparents. L'image se forme sur la rétine qui transmet les informations au cerveau.
- Un œil peut être modélisé par un diaphragme (pupille), une lentille convergente (milieux transparents) et un écran simulant la rétine.

2.2.4.1.3 Champ de vision :

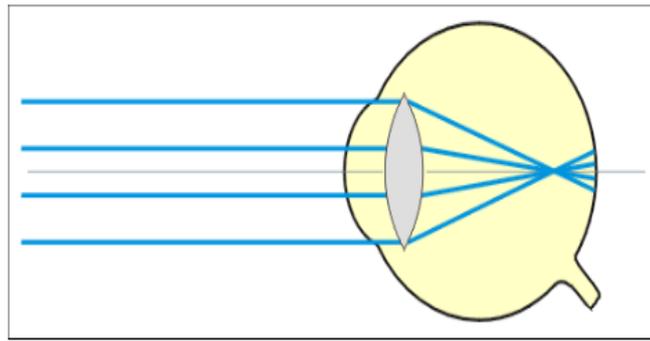
Le champ visuel est la partie de l'espace qu'un œil peut percevoir autour du point qu'il fixe. quand l'œil fixe un point immobile situé droit devant lui. Il est capable de détecter dans une zone d'espace limitée, des lumières, des couleurs et des formes.



2.2.4.1.4 Les défauts de l'œil

La myopie :

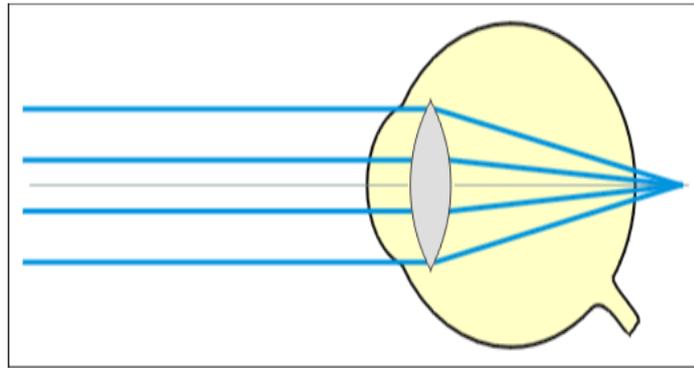
La myopie est une anomalie de l'œil dans laquelle l'image d'un objet éloigné se forme en avant de la rétine. L'œil est trop convergent donc trop long. Un myope ne voit pas distinctement les objets éloignés. Il doit se rapprocher de l'objet pour le voir correctement.



L'hypermétropie :

Un œil hypermétrope est un œil pas assez convergent. Il est donc trop court. L'image d'un objet observé se forme après la rétine.

Un hypermétrope distingue plus facilement les objets éloignés que les objets rapprochés.

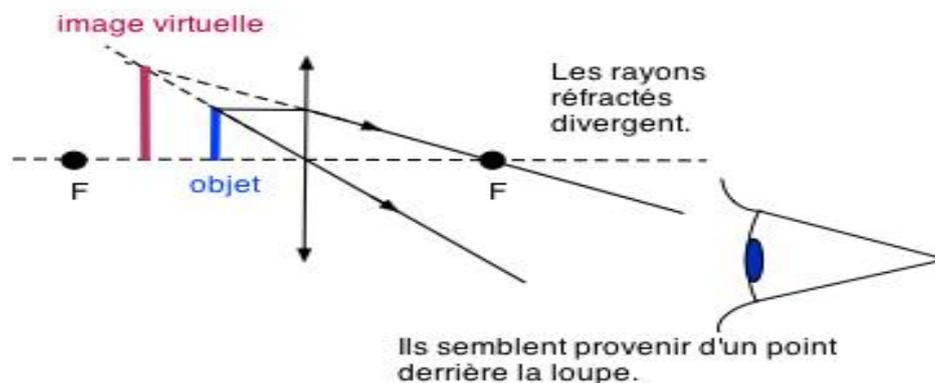


2.2.4.2 La loupe et le microscope optique

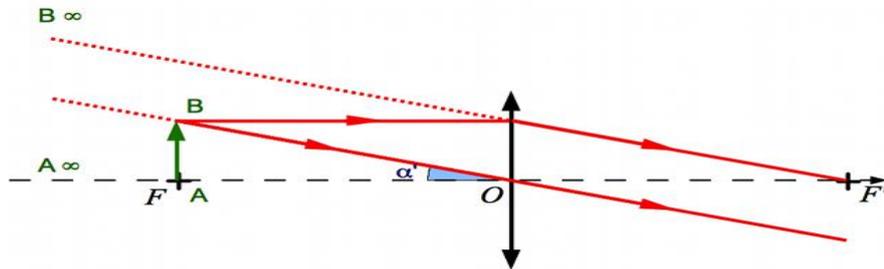
Il s'agit d'une lentille convergente de faible distance focale entre (2 à 10 cm) qui permet d'agrandir l'angle sous lequel l'œil voit l'objet afin de pouvoir distinguer les détails non visibles à l'œil nu.

2.2.4.2.1 Formation des images par le biais d'une loupe :

- L'œil puisse observer au travers de la loupe image agrandie si l'objet se place entre le foyer optique O de la lentille et son foyer objet F,



- pour que l'œil puisse observer cette image sans accommodation, celle-ci doit être à l'infini. La meilleure position de l'objet est celle où il sera sur le foyer principal objet.



2.2.4.2.2 Grossissement et puissance d'une loupe :

Grossissement :

Soit α l'angle sous lequel on visualise l'objet à l'œil nu. Cet angle est le diamètre apparent. α' est l'angle sous lequel on voit l'image.

- L'angle α' sous lequel est vu l'image.
- L'angle α sous lequel est vu l'objet depuis l'œil à la distance de vision minimale de l'œil emmétrope.

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

Puissance :

On définit également, pour le cas des objets à distance finie, la puissance de l'instrument, comme étant le rapport de diamètre apparent de l'image, sur la taille AB de l'objet :

$$P = \frac{\alpha'}{AB}$$

Remarque :

Angle apparent de l'image (α') est plus grosse et plus éloignée.

$$\alpha' = \arctan\left(\frac{A'B'}{d'}\right) \approx \frac{A'B'}{d'}$$

Cet angle dépend de la distance entre la loupe et l'objet, ainsi que de la loupe et l'œil.

Chapitre3: Mécanique des fluides

2.3 Mécanique des fluides.

En physique, les interactions ou forces mutuelles entre les molécules déterminent les différents états de la matière. Chaque état dépend des compétitions entre les forces de cohésion et de répulsion.

- **L'état solide** (ordonné): ordre à grande échelle ou amorphe : pas d'ordre) : possède à la fois un volume et une forme propres, les atomes sont dans des positions fixes dans l'espace. Les forces d'interaction sont importantes.
- **L'état gazeux** : les atomes sont dilués dans l'espace. il ne possède ni forme, ni volume propre et la compression est possible. les atomes ou les molécules sont libres de leurs déplacements Les forces de cohésion sont faibles (les majoritaires étant les forces de répulsion).
- **L'état liquide** : c'est l'état intermédiaire entre les deux précédents. il possède un volume propre sans forme propre, les atomes ou les molécules sont plus proches les uns des autres et, par conséquent, plus contraints dans leurs déplacements. Un liquide est incompressible. Le mouvement est possible mais les forces d'attraction sont insuffisantes pour maintenir les atomes en place (mouvement de translation et de rotation). Un liquide peut s'écouler.

2.4 Définition et Caractéristiques d'un fluide.

2.4.1 Définition

Un fluide peut être considéré comme étant formé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. Un fluide est donc un milieu matériel continu, parfaitement déformable, il englobe les liquides et les gaz.

2.4.2 Caractéristiques et propriétés des fluides.

Les propriétés des fluides en générale, sont l'ensemble des caractères physiques qui conditionnent leurs comportements (au repos ou en mouvement), dans ce qui suit on s'intéressera exclusivement aux propriétés des liquides.

2.4.2.1 La masse volumique ρ (pas uniquement pour les fluides).

Définition :

La masse volumique d'une substance correspond à la masse de cette substance par unité de volume. Elle s'exprime selon la relation suivante :

$$\rho \left(\frac{Kg}{m^3} \right) = \frac{m(Kg)}{V(m^3)}$$

Exemples.

Liquide (à 20 °C)	Essence	Huile d'olive	Eau douce	Glycérine	Glycérine
Masse volumique (g/mL)	0.750	0.920	1.00	1.26	13.6

2.4.2.2 Effets de la température.

Quand la température augmente, la masse volumique d'un fluide diminue, Mis à part pour l'eau entre 0°C et 4°C,

2.4.2.3 Densité.

La densité d'un corps (liquide ou solide), notée d , est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un corps de référence : pour les liquides et les solides, c'est l'eau pure à 4°C et pour les gaz, c'est l'air, à la même température et sous la même pression.

$$d = \frac{\rho_{\text{corps}}}{\rho_{\text{réf}}} \quad \cdot \quad \rho_{\text{ref}} = \rho_{\text{eau}} = 10^3 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

La densité est une valeur sans dimension.

2.4.2.4 Poids volumique ϖ .

Le poids spécifique est le rapport entre le poids du liquide et son volume, c'est-à-dire le poids de l'unité de volume. L'unité est le $N \cdot m^3^{-1}$.

$$\varpi = \frac{P}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \frac{m}{V} \cdot g = \rho \cdot g \rightarrow \varpi = \rho \cdot g$$

2.4.2.5 Volume massique v .

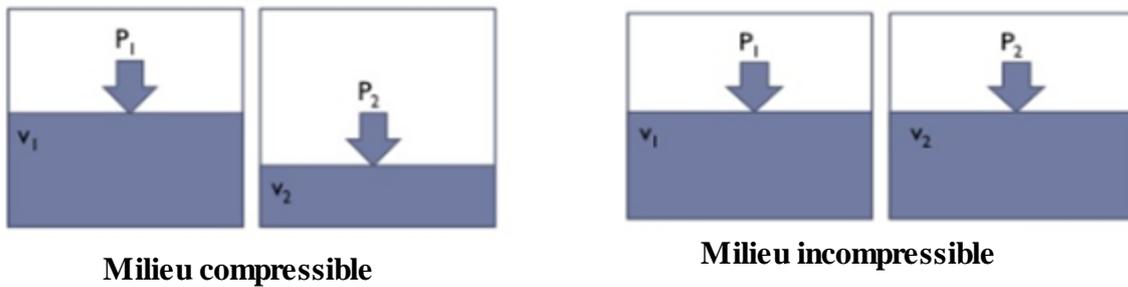
C'est le volume qu'occupe l'unité de masse d'une substance, c'est l'inverse de la masse volumique. L'unité est $\text{m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1}$.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

2.4.2.6 La compressibilité des fluides.

La caractéristique la plus importante qui permet de distinguer un liquide et un gaz est sa compressibilité.

Un liquide est un fluide qui occupe un certain volume, où ce volume peut varier très peu, et ceci est sous l'influence de variables fortes telles que la pression et la température.



En revanche, un gaz, il occupe toujours le volume maximum dont il dispose, il s'agit essentiellement d'un liquide compressible (ou expansible).

2.4.2.7 La viscosité.

La viscosité est définie comme étant la propriété d'un fluide à résisté au mouvement d'une couche de fluide au-dessus d'une autre couche de fluide adjacente. Ou simplement C'est la résistance à l'écoulement de la matière. Lorsqu'elle augmente, la capacité de s'écouler diminue (ex : le miel).

2.4.2.7.1 Mise en évidence expérimentale (aspect macroscopique).

Considérons une tranche de fluide d'épaisseur h entre 2 plans parallèles de surface S . Le plan supérieur est mis en translation suivant la direction Ox , avec une vitesse \vec{V}_0 suivant \vec{i} tel que $\vec{V}_0 = V_0 \vec{i}$.

- Les couches ne se mélangent pas et elles sont parallèles.
- l'adhérence est parfaite et le mouvement du fluide est uniquement le résultat de la mise en mouvement de la paroi mobile.

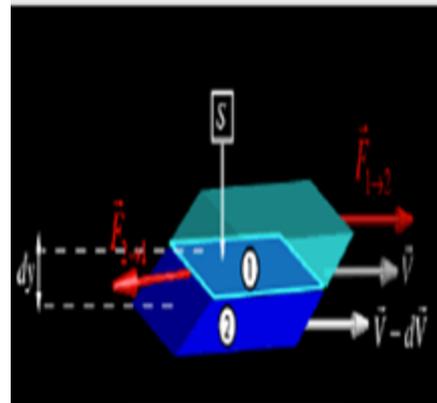


Figure 01

- Supposons que la vitesse a la forme $\vec{V} = V(y, t)\vec{i}$.
 - toutes les molécules d'une même couche s'écoulent à la même vitesse. On isole deux couches de fluide immédiatement voisines.
 - Les deux couches séparées de dy et on note S l'aire de la couche normale à Oy .
- Soit :
1. \vec{V} la vitesse de la couche supérieure (1).
 2. $\vec{V} - d\vec{V}$ la couche inférieure (2).

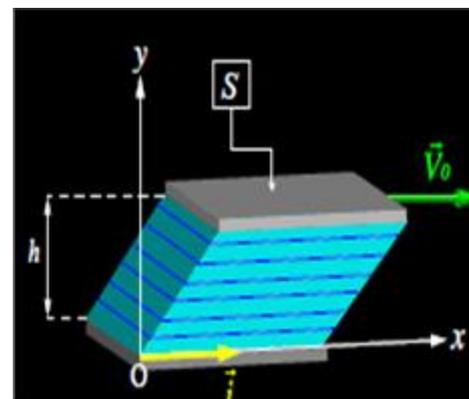


Figure 02

- La couche (1) exerce une force d'entraînement sur la couche (2) notée : $\vec{F}_{1/2}$.
- D'après le principe des actions réciproque la couche (2) exerce une force résistante (égale et opposée) sur la couche (1) notée : $\vec{F}_{2/1}$.
- La force : $\vec{F}_{2/1}$ s'oppose au glissement de (1) par rapport à (2) et à la déformation du système (1) et (2), elle est proportionnelle à l'aire de contact **S** entre les deux surfaces et de sens opposé au déplacement d'ensemble du fluide (ici dirigé suivant $-\vec{l}$).
- Pour un écoulement unidirectionnel tel que $\vec{V} = V(y, t)\vec{l}$, la force de surface \vec{F} , appelée force de cisaillement ou force de viscosité, qui s'exerce entre 2 couches de fluide successives (de surface de contact S normales a Oy) s'écrit : $\vec{F}_{2/1} = -\eta \cdot \frac{dV}{dy} \cdot S\vec{l}$.

Avec :

- η la viscosité dynamique Unité : $Pa \cdot s$ ou Poiseuille (Pl) Dimension : $M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$.
- $\frac{dV}{dy}$ La vitesse de déformation (le taux de cisaillement=taux de variation de la vitesse par rapport à la variable y dans l'espace) en s^{-1} .

- Le signe $-$ indique que cette force s'oppose au sens de déplacement de la couche supérieur.

Remarque :

On peut également définir une autre expression de la viscosité pour un fluide appelée **viscosité cinématique**, notée telle que

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \left\{ \begin{array}{l} \nu : \text{viscosité cinématique} \\ \text{Dimension } L^2 T^{-1} \\ \text{Unité } m^2 s^{-1} \end{array} \right.$$

2.5 Hydrostatique (Statique des fluides ou Fluides au repos).

La statique des fluides (ou hydrostatique) est l'étude des fluides au repos, c'est-à-dire il n'y a pas de mouvement macroscopique d'une particule fluide par rapport à une autre.

2.5.1 Forces de volume et forces de surface :

Comme tout problème de mécanique, la résolution d'un problème de mécanique des fluides passe par la définition du système matériel S, particules de fluide à l'intérieur d'une surface fermée limitant S. À ce système on applique les principes et théorèmes généraux de mécanique et thermodynamique :

- principe de la conservation de la masse.
- principe fondamental de la dynamique.
- principe de la conservation de l'énergie.

2.5.2 Notion De Pression Et Force De Pression.

Plongeons un corps solide dans un liquide au repos (à l'équilibre). Supposons que M est un point de la surface d'un solide (S) et soit dS un élément de surface entourant le point M. On note \vec{n} la normale à ds et dirigée du liquide vers le corps S (l'action du liquide sur le solide). Il existe une force élémentaire, notée \vec{dF} , exercée par le fluide sur l'élément de surface ds telle que :

$$\vec{dF} = P \cdot ds \cdot \vec{n}$$

Avec :

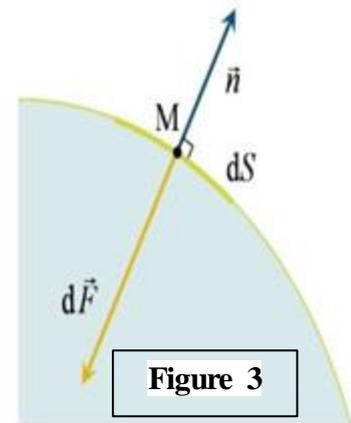


Figure 3

- dF la force de pression en Newton, normale (perpendiculaire) à la
- p la pression en Pascal (Pa) qui est une grandeur scalaire positive.

La pression p est définie par :
$$P = \frac{\|\vec{dF}\|}{ds}$$

2.5.2.1 Unité De Pression P.

La pression est une grandeur proportionnelle à l'intensité de la force F et inversement proportionnelle à la surface S sur laquelle s'exerce cette force.
$$P = \frac{F}{S}$$

- F en newtons N.
- S en m^2 .
- p en $N \cdot m^{-2}$ ou en pascals (Pa).

Autres unités de la pression.

- 1bar=105Pa.
- 1atmosphère (1atm)=1,013x105Pa≈105Pa.
- 1atmosphère (1atm)=76cmHg

Remarque :

La pression n'est pas une grandeur vectorielle, mais une grandeur scalaire.

2.5.3 Relation Fondamentale De La Statique Des Fluides.

La relation fondamentale de la statique des fluides est établie dans le cas d'un fluide placé dans le champ de pesanteur (uniforme).

Grâce à ces pressions, on peut définir :

- la **flottabilité** d'un navire par exemple. Le principe d'Archimède
- En **biologie**, la pression hydrostatique est la pression exercée par le fluide intravasculaire (le **plasma** sanguin) ou le liquide extravasculaire sur la **paroi** du **vaisseau sanguin**.

2.5.3.1 Énoncé du principe fondamental de l'hydrostatique.

Considérons 2 points **A** et **B** appartenant à un liquide au repos. La différence de pression en ces deux points est numériquement égale au poids d'une colonne de ce liquide ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance entre ces deux plans horizontaux contenant A et B.

L'équation de la statique s'écrit :

$$\vec{F}_A + \vec{F}_B + m\vec{g} = 0 \rightarrow F_B - F_A - m \cdot g = 0.$$

$$\frac{F_A}{S} - \frac{F_B}{S} - \frac{mg}{S} = 0 \rightarrow \frac{F_A}{S} - \frac{F_B}{S} - \frac{\rho \cdot V \cdot g}{S} = 0.$$

$$\rightarrow \frac{F_A}{S} - \frac{F_B}{S} - \frac{\rho \cdot S \cdot h \cdot g}{S} = 0 \rightarrow P_B - P_A - \rho \cdot h \cdot g = 0.$$

$$\rightarrow \mathbf{P_B - P_A = \rho \cdot h \cdot g} \rightarrow \mathbf{\Delta P = \rho \cdot h \cdot g}$$

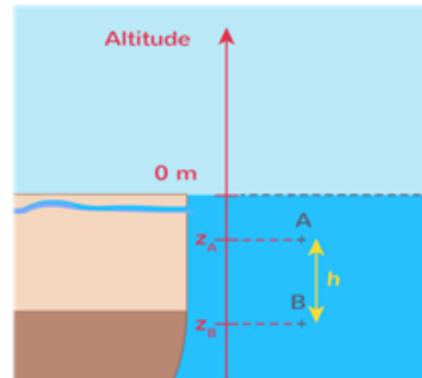


Figure 04

ρ : Est la masse volumique du fluide en ($\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$).

h : Est la dénivellation entre les deux points **A** et **B** en (**m**).

g : Est l'accélération de la pesanteur (**9,81 N/kg**).

$\Delta P = P_B - P_A$: Est la différence de pression en (**Pa**).

2.5.3.2 Transmission des pressions dans les liquides.

2.5.3.2.1 Théorème de Pascal.

Toute variation de pression en un point d'un liquide incompressible au repos est transmise intégralement à tous les autres points du liquide

2.5.3.2.2 Applications du principe fondamental.

La pression est la même en tous les points situés à un même niveau horizontal d'un même fluide au repos :

2.5.3.2.3 Principe de la presse hydraulique.

On exerce une force F_1 sur le piston de surface S_1 , la pression p_1 transmise au liquide est

$$P_1 = \frac{F_1}{S_1}$$

Selon le principe de Pascal, le fluide transmet intégralement en tout point les variations de pression donc la pression p_1 est intégralement transmise au piston de surface S_2 . En effet :

$$P_1 = P_2 \rightarrow \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \rightarrow F_2 = F_1 \times \frac{S_2}{S_1}$$

→**Conclusion** : Si la surface S_2 est beaucoup plus grande que la surface S_1 , il sera possible de soulever des charges importantes, en appliquant une force F_1 de faible valeur.

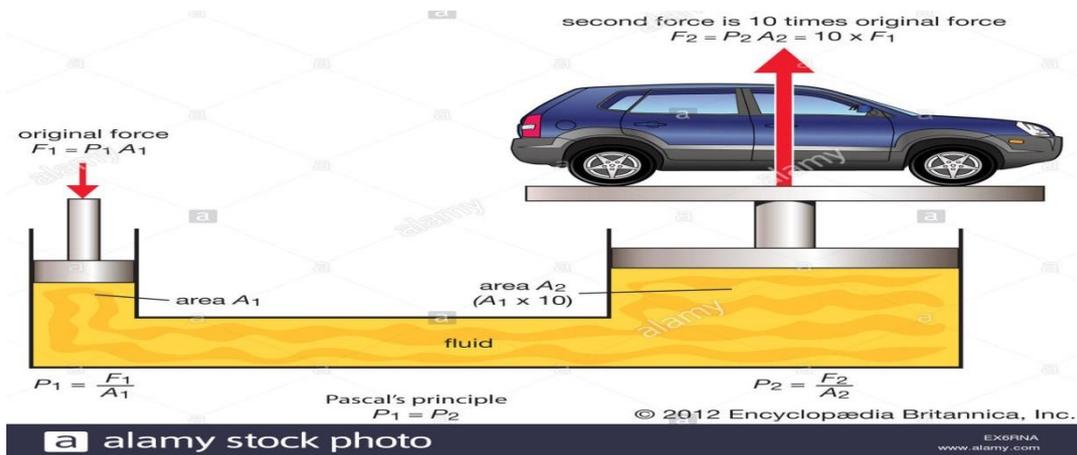


Figure 05

2.5.3.2.4 Surface libre d'un liquide.

La surface libre, surface entre le liquide et l'air est une surface plane et horizontale.

$$\begin{cases} P_B - P_A = \rho \cdot h \cdot g \\ P_B = P_A \end{cases} \rightarrow \rho \cdot h \cdot g = 0 \rightarrow h = 0 \text{ car } g \neq 0 \text{ et } \rho \neq 0.$$

D'où A et B dans le même plan horizontal.

2.5.3.2.5 Surface de séparation entre deux liquides non miscibles.

La surface de séparation entre deux liquides non miscibles est **plane** et **horizontale**.

Dans le fluide I : $P_B - P_A = \rho_I \cdot g \cdot h.$

Dans le fluide II : $P_B - P_A = \rho_{II} \cdot g \cdot h.$

D'où $\rho_I \cdot g \cdot h = \rho_{II} \cdot g \cdot h \rightarrow g \cdot h (\rho_{II} - \rho_I) = 0.$

Or $g \neq 0$ et $(\rho_{II} - \rho_I) \neq 0 \rightarrow h = 0$

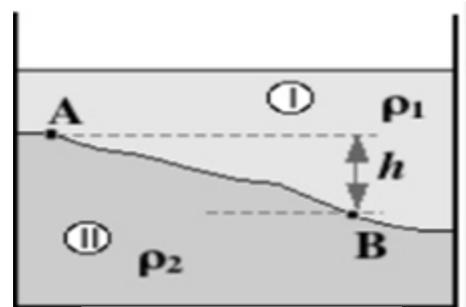


Figure 07

2.5.3.2.6 Vases communicants (contenant plusieurs liquides non miscibles).

Les points A et B sont dans le plan contenant la surface de séparation des deux liquides est un plan horizontal on a donc : $P_B = P_C = P_{atm}$

le fluide I : $P_B - P_{atm} = \rho_I \cdot g \cdot h$.

le fluide II : $P_A - P_{atm} = \rho_{II} \cdot g \cdot h'$.

D'où : $\rho_I \cdot h = \rho_{II} \cdot h'$

Au-dessus du plan horizontal de la surface de séparation des deux liquides les hauteurs sont inversement proportionnelles aux masses volumiques.

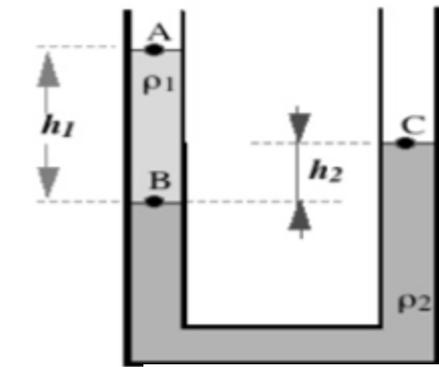


Figure 08

2.5.4 Théorème D'ARCHIMÈDE.

Tout corps solide complètement plongé dans un liquide au repos subit de la part de ce liquide un ensemble de forces pressantes dont la résultante est définie par les 4 éléments suivants :

- ✓ Direction : verticale.
- ✓ Sens : vers le haut.
- ✓ Point d'application : situé sur la vertical contenant le centre de gravité du liquide déplacé, ce point d'application est appelé centre de poussée.
- ✓ Module : égal au poids du liquide déplacé $F = \pi = \rho_{Liquide} \cdot V_{immergé} \cdot g$

Démonstration.

Pour expliquer le principe de la **poussée d'Archimède** nous allons prendre un exemple très simple.

Si vous prenez un ballon et que vous le plongez dans l'eau en gardant tes mains sur le ballon, vous ressentez une force qui essaye de faire remonter le ballon à la surface : cette force est la **poussée d'Archimède F ou π** .

2.5.4.1 Condition de flottaison et d'immersion.

Nous avons les informations suivantes : ρ_{solide} la masse volumique du solide, V_{solide} le volume du solide, $V_{immergé}$ le volume immergé du solide et $\rho_{Liquide}$ la masse volumique du liquide.

2.5.4.2 Corps immergés mais touche le fond.

Les forces extérieures qui agissent sur le corps sont : Son poids P, la poussée d'Archimède π et la réaction aux appuis R :

$$\text{À l'équilibre statique } \rightarrow \sum \vec{F} = \vec{0} \rightarrow \vec{P} + \vec{\pi} + \vec{R} = \vec{0}.$$

$$\text{par projection sur l'axe : } P = \pi + R$$

$$\begin{cases} P = \pi + R \\ \rho_{corp} \cdot V_{corp} \cdot g = \rho_{fluide} \cdot V_{immergé} \cdot g + R \end{cases} \rightarrow V_{corp} = V_{immergé}$$

$$\text{D'où } \rightarrow \rho_{corp} = \rho_{fluide} + \frac{R}{V_{corps} \cdot g}$$

Conclusion : pour que le solide soit complètement immergé et touche le fond, il faut que:

$$\rho_{corp} > \rho_{fluide}$$

2.5.4.3 Condition d'immersion (restant entre deux couches liquides).

À l'équilibre statique $\rightarrow \sum \vec{F} = \vec{0} \rightarrow \vec{P} + \vec{\pi} = \vec{0}$.

par projection sur l'axe : $P = \pi$

$$\begin{cases} P = \pi \\ \rho_{corp} \cdot V_{corp} = \rho_{fluide} \cdot V_{immergé} \end{cases}$$

Conclusion : pour que le solide soit immergé et reste entre deux couches liquides, il faut que

$$\rightarrow \rho_{corp} = \rho_{fluide}$$

2.5.4.4 Condition de flottaison .

À l'équilibre statique $\rightarrow \sum \vec{F} = \vec{0} \rightarrow \vec{P} + \vec{\pi} = \vec{0}$.

par projection sur l'axe : $P = \pi$

ρ_{corp} : Masse volumique du solide.

V_{corp} : Volume de solide.

$$\text{Or : } \begin{cases} p = m_{corp} \cdot g \\ \pi = m_{immergé} \cdot g \end{cases} \rightarrow \begin{cases} m_{corp} = \rho_{corp} \cdot V_{corp} \\ m_{immergé} = \rho_{fluide} \cdot V_{immergé} \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} p = \rho_{corp} \cdot V_{corp} \cdot g \\ \pi = \rho_{fluide} \cdot V_{immergé} \cdot g \end{cases} \text{ en note que } \begin{cases} P = \pi \\ \rho_{corp} \cdot V_{corp} = \rho_{fluide} \cdot V_{immergé} \end{cases} \rightarrow$$

$$V_{corp} = V_{immergé}$$

Conclusion : Pour que le solide Flotte, il faut que $\rho_{corp} < \rho_{fluide}$.

2.6 Hydrodynamique (Dynamique des fluides idéals incompressibles).

La dynamique des fluides est la science qui s'intéresse au comportement des fluides « généralement l'eau » en mouvement.

On considère que les fluides étudiés sont parfaits et incompressibles (On ne tiendra pas compte des effets de viscosité $\mu = 0$ et $\rho = \text{cte}$).

2.6.1 Généralités sur l'écoulement des fluides.

2.6.1.1 Écoulement laminaire.

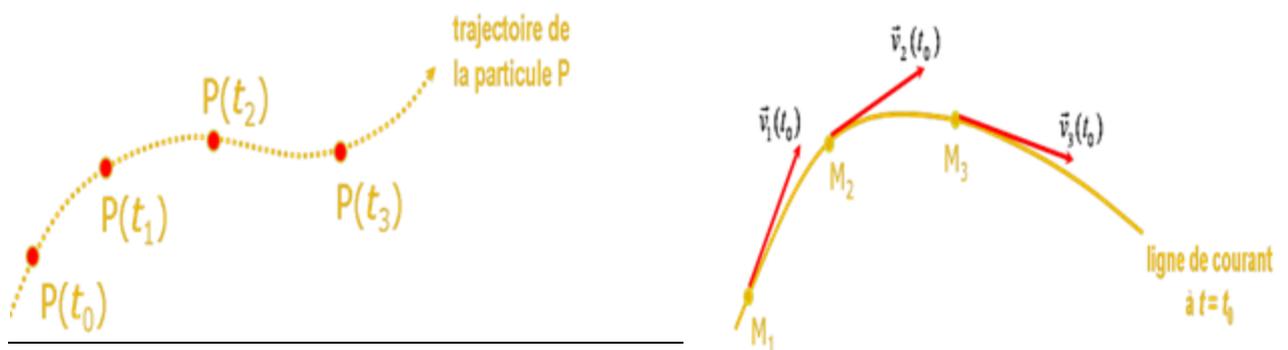
Écoulement rectiligne, le fluide s'écoule en filets parallèles à l'axe de la conduite, sans mélange.



Écoulement laminaire

2.6.1.2 Ligne de courant :

Sont les lignes suivies par un petit volume du fluide qui s'écoule, ou se sont la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide.

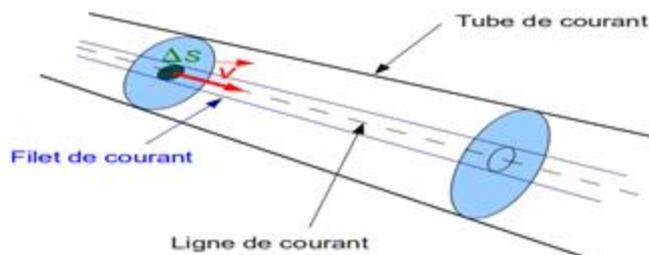


2.6.1.3 Tube de courant :

Ensemble de lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée.

2.6.1.4 Filet de courant :

Tube de courant s'appuyant sur un petit élément de surface ΔS .



Remarque : Dans ce cours, nous étudions seulement le régime laminaire

Résumé : notre fluide est :

- Fluide parfait,
- Fluide incompressible,
- Régime permanent, stationnaire. Tube de courant : engendré par les lignes de courant s'appuyant sur 2 surfaces fermées S1 et S2.

2.6.2 Débit Le (Q).

C'est le rapport de la quantité de fluide qui traverse une section S par unité de temps.

2.6.2.1 Le Débit massique :

$$Q_m \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right] = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

2.6.2.2 Le Débit volumique :

$$Q_v \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

❖ Le débit volumique peut également être exprimé en fonction de la **section S** et de la **vitesse v** (car le volume $V = S \cdot L$ et la vitesse $v = \frac{L}{\Delta t}$).

$$Q_v \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{S \times l}{\Delta t} = S \times \frac{l}{\Delta t} = S \times v$$

Attention: à ne pas confondre V (le Volume) et v (la vitesse)!!

Comme $m = \rho \times V$, les débits massique et volumique sont reliés par la relation :

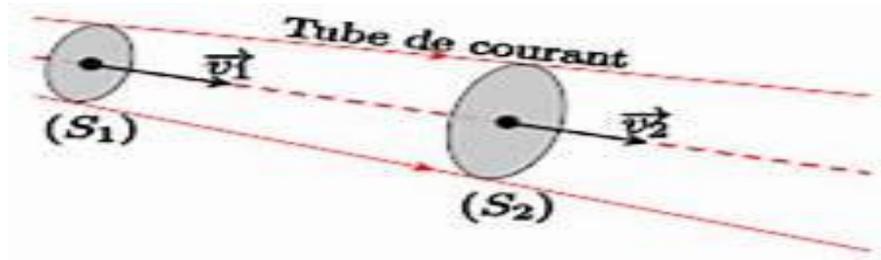
$$Q_s \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right] = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta \rho \times V}{\Delta t} = \frac{\Delta \rho \times S \times l}{\Delta t} = \rho \times S \times \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

$$Q_s \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right] = \rho \times S \times v \rightarrow Q_s \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right] = \rho \times Q_v \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$\rightarrow Q_m = \rho \times Q_v$$

2.6.3 Equation de continuité (Conservation du débit).

Le long d'un tube de courant, le débit volumique d'un fluide incompressible se conserve.



Puisque le fluide est incompressible $\rho = \text{cte}$:

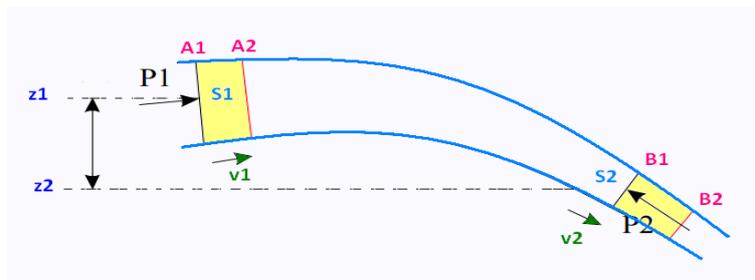
tout le fluide qui entre dans le tube par la section d'entrée S_1 en sort par la section de sortie S_2 , donc le débit sera conservé (constant) le long d'un tube de courant.

2.6.4 Théorème de BERNOULLI.

Soit un écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible dans une conduite. Les deux sections S_1 et S_2 délimitent à l'instant t une certaine masse de fluide. Les caractéristiques du fluide à l'instant t sont :

- En S_1 ; v_1 ; P_1 ; ρ et Z_1
- En S_2 ; v_2 ; P_2 ; ρ et Z_2

A l'instant $(t + dt)$, cette masse se déplace et se trouve entre deux sections S_1 et S_2 . On a donc $dm = dm_1 = dm_2$.



Appliquons le théorème de l'énergie cinétique à dm : $\Delta E_C(dm) = \sum W(F)_{1 \rightarrow 2}$

- La variation de l'énergie cinétique : $\Delta E_C(dm) = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot (v_2^2 - v_1^2)$.
- Travail de force de pesanteur : $W_p = (Z_1 - Z_2) \cdot g \cdot dm$.
- Travail des forces intérieures est nul car le fluide est parfait ($\mu = 0$).
- Travail des forces de pression : sur S_1 : $W_{P_1} = F_{P_1} \cdot x_1 = P_1 \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot dt$
sur S_2 : $W_{P_2} = F_{P_2} \cdot x_2 = P_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot dt$

$$\left(\frac{1}{2} \cdot dm \cdot (v_2^2 - v_1^2) = P_1 \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot dt + P_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot dt + (Z_1 - Z_2) \cdot g \cdot dm\right) \rightarrow \times \rho$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot dm \cdot (v_2^2 - v_1^2) = P_1 \cdot \rho \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot dt + P_2 \cdot \rho \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot dt + (Z_1 - Z_2) \cdot \rho \cdot g \cdot dm$$

Or, d'après l'équation de conservation du débit : $dm = \rho \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot dt = \rho \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot dt$.

$$\text{Donc : } \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot dm \cdot (v_2^2 - v_1^2) = P_1 \cdot dm - P_2 \cdot dm + (Z_1 - Z_2) \cdot \rho \cdot g \cdot dm$$

$$P_1 + Z_1 \cdot \rho \cdot g + \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} = P_2 + Z_1 \cdot \rho \cdot g + \rho \cdot \frac{v_2^2}{2}$$

- L'équation de Bernoulli prédit qu'une **augmentation de la vitesse** en un point d'une ligne de courant s'accompagne d'une **diminution de la pression** en ce même point.
- Si $v = 0$ On obtient finalement l'équation la relation fondamentale de l'hydrostatique **RHF** : $\rho g Z + P = \text{cte}$
- **Conclusion** : Dans un fluide en mouvement, la pression ne dépend pas seulement de l'altitude du point considéré mais également de la vitesse de l'écoulement en ce point.

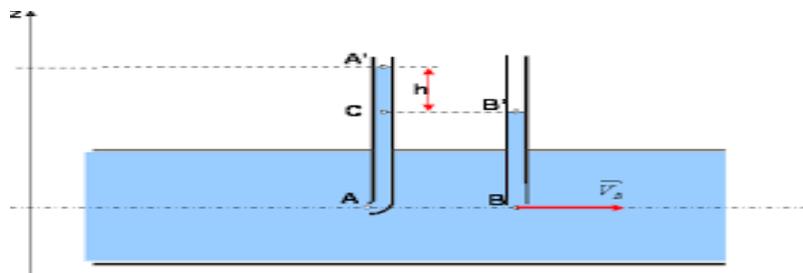
Pour appliquer l'équation de Bernoulli, il faut:

- ❖ Fluide **parfait** (non visqueux, sans frottement) .
- ❖ Fluide **incompressible** (masse volumique ρ constante).
- ❖ Écoulement **permanent** (vitesse constante en chaque point).
- ❖ Écoulement **laminaire** (mouvement de translation, sans turbulence)

2.6.4.1 Applications de l'équation de Bernoulli.

2.6.4.1.1 Tube de Pitot :

Le tube de Pitot (physicien français Henri Pitot 1695-1771).est un est l'appareil le plus couramment utilisé pour mesure de vitesse des fluides en le reliant à la différence de pression d'un manomètre à liquide. Il notamment utilisé pour aéronautique. Comme la montre la figure ci-dessous



Appliquons le théorème de Bernoulli, entre les deux points (1) et (2), on obtient :

$$P_A + Z_1 \cdot \rho \cdot g + \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} = P_B + Z_1 \cdot \rho \cdot g + \rho \cdot \frac{v_2^2}{2}$$

On a : $Z_1 = Z_1$ (même niveau). Et $v_A = 0$ (point d'arrêt)

Alors :

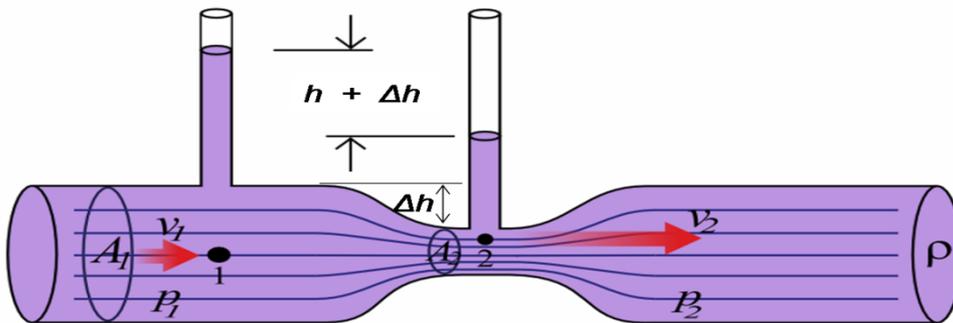
$$P_A = P_B + \rho \cdot \frac{v_2^2}{2} \rightarrow \rho \cdot \frac{v_2^2}{2} = P_A - P_B \rightarrow v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_A - P_B)}{\rho}}$$

L'équation hydrostatique entre 1 et 2 : $P_A - P_B = \rho \cdot h \cdot g$

$$\text{Ce qui donne : } v_2 = \sqrt{2h \cdot g} .$$

2.6.4.1.2 Tube de Venturi :

Le tube de venturi est formé d'un conduit de section principale S_A (dite entrée convergente) et une sortie divergente de section S_B . La vitesse d'un fluide augmente dans le col (étranglement) donc sa pression y diminue : Comme la montre la figure ci-dessous



➤ L'équation de Bernoulli entre 1 et 2 est:

$$P_1 + Z_1 \cdot \rho \cdot g + \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} = P_2 + Z_1 \cdot \rho \cdot g + \rho \cdot \frac{v_2^2}{2}.$$

On a :

$$Z_1 = Z_1 \text{ (même niveau).}$$

Équation de continuité :

$$Q_{V_1} = Q_{V_2} \rightarrow S_1 \times v_1 = S_2 \times v_2$$

L'équation hydrostatique entre 1 et 2 : $P_1 - P_2 = \rho \cdot h \cdot g \rightarrow \Delta P = \rho \cdot h \cdot g$

En combinant ces équations, on obtient une équation de la vitesse à la section d'étranglement :

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot g}{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}}$$

Chapitre 4. Notion sur la cristallographiques

2.7 Introduction :

Nous avons étudié dans le chapitre précédent que la matière existe sous la forme de trois états, solide, liquide et gazeux. Et l'état dans lequel se trouve la matière dépend des liens entre ses Espèces chimiques (atomes, molécules et ions) qui existent entre eux.

Les gaz et les liquides représentent ce que l'on appelle des Fluides. Ils sont déformables sous l'action de forces très faibles, de sorte qu'ils prennent la forme du récipient qui les contient. Les solides ont une forme propre, leur déformation exige des forces importantes. Ces derniers peuvent exister sous deux états différents :

- **Etat solide cristallin** : optimisation des interactions entre les constituants élémentaires ; on a un **arrangement régulier et périodique**.
- **Etat solide amorphe** : **pas de régularité** (exemple : le verre).

On classifie les cristaux selon la nature des interactions entre les constituants élémentaires :

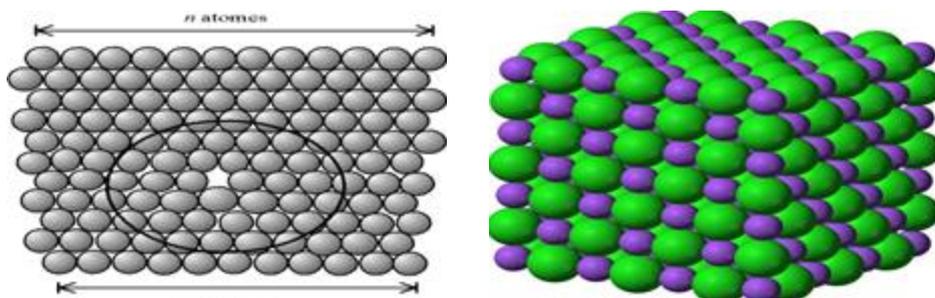
- Cristaux métalliques.
- Cristaux ioniques.
- Cristaux covalents.
- Cristaux moléculaires.

2.8 Définition de la Cristallographie :

La cristallographie est la science des cristaux, elle est la plus puissante pour étudier la structure de la matière cristalline à l'échelle atomique. Elle s'appuie sur le phénomène physique de diffraction des ondes électromagnétiques (rayons X), des neutrons ou des électrons. Grâce aux informations qu'elle apporte, la cristallographie est indispensable à de nombreuses disciplines, de la physique à la chimie, en passant par la biologie, et permet la conception de matériaux aux propriétés maîtrisées. Voici l'exemple du fonctionnement d'un diffractomètre à rayons X.

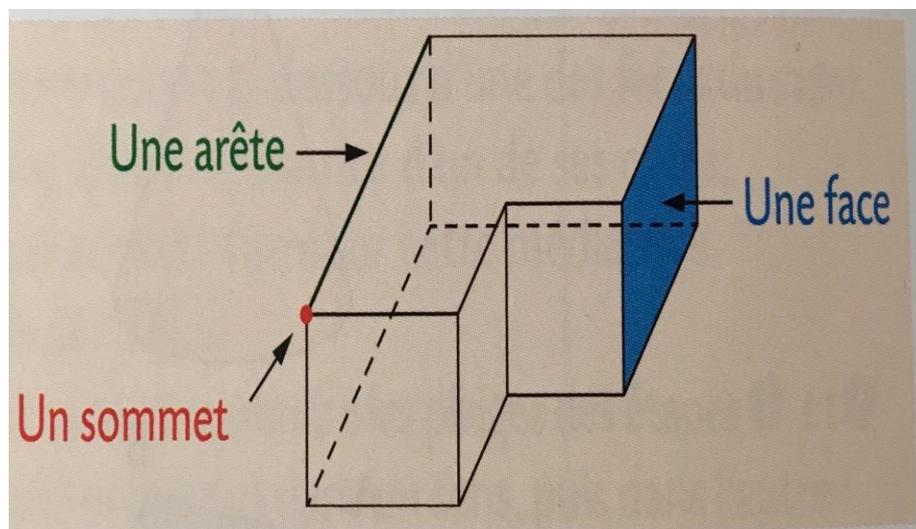
2.9 Définition d'un cristal :

Cristal : est un terme usuel pour désigner la forme la plus ordonnée et régulières de la matière solide, bien que cet usage diffère quelque peu de la définition scientifique de ce mot. Selon l'Union internationale de cristallographie, tout solide dont le spectre de **diffraction** est essentiellement discret est un **cristal**. Par exemple, dans le cas du sel de table (NaCl),

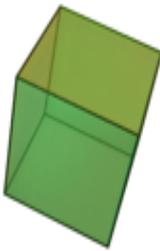
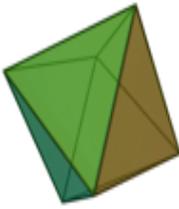


2.10 Définition d'un polyèdre :

Un polyèdre est un solide dont les faces sont des polygones. Les côtés de ces polygones sont des arêtes. Les côtés sont délimités par des points que l'on appelle les sommets.



Les cinq polyèdres réguliers convexes (solides de Platon) sont : le tétraèdre, l'hexaèdre (ou cube), l'octaèdre, le dodécaèdre et l'icosaèdre. Comme le montre la figure ci-dessous.

Les cinq polyèdres réguliers convexes (solides de Platon)				
Tétraèdre	Hexaèdre ou Cube	Octaèdre	Dodécaèdre	Icosaèdre
				

2.11 Maille, motif, Nœud, réseau et structure cristalline :

2.11.1 Maille :

La maille est le plus petit parallélépipède ou (unité de volume) qui contient toutes les informations de structure et de symétrie pour construire par translation la structure macroscopique du réseau. Donc Un réseau cristallin d'un solide est composé d'un nombre infini de mailles élémentaires à l'intérieur desquelles les atomes sont disposés dans un ordre bien défini.

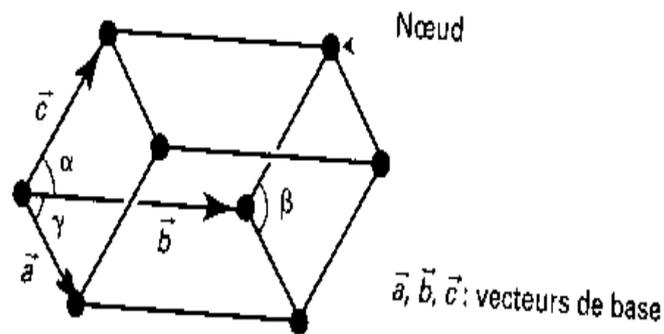
2.11.2 Motif :

C'est la **reproduction** indéfiniment et régulièrement des atomes, molécules ou ions dans le cristal, donc il suffit de déterminer le contenu d'une seule maille en remplaçant les différents nœuds par les vraies entités qui constituent l'ensemble régulier de motifs le motif de la maille. Exemple 01 : Dans le métal cuivre, le motif est constitué par un seul atome de cuivre. Dans O_3 , le motif est constitué par les ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} .



2.11.3 Nœud :

Il correspond au sommet d'un parallélépipède construit à partir des trois vecteurs de base ou c'est la position occupée par un atome dans la maille.



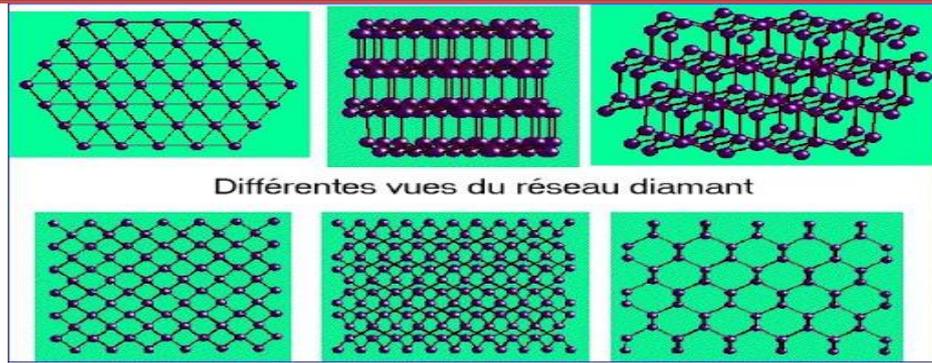
Remarque :

Contrairement au motif le nœud n'a pas de réalité physique.

La rangée du réseau est un ensemble de nœuds alignés, c'est une droite passant par des nœuds du réseau. La distance qui sépare deux nœuds consécutifs d'une rangée est appelée période ou paramètre de rangée.

2.11.4 Réseau :

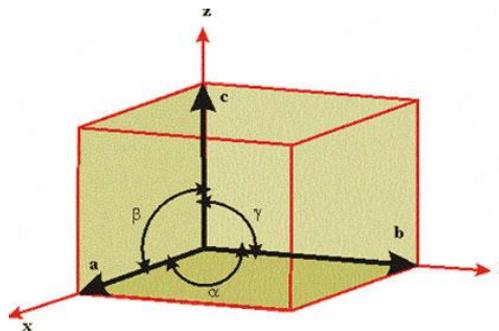
Ensemble des points correspondant aux centres des constituants élémentaires de l'édifice cristallin. Le réseau est théoriquement infini.



2.11.5 Maille élémentaire :

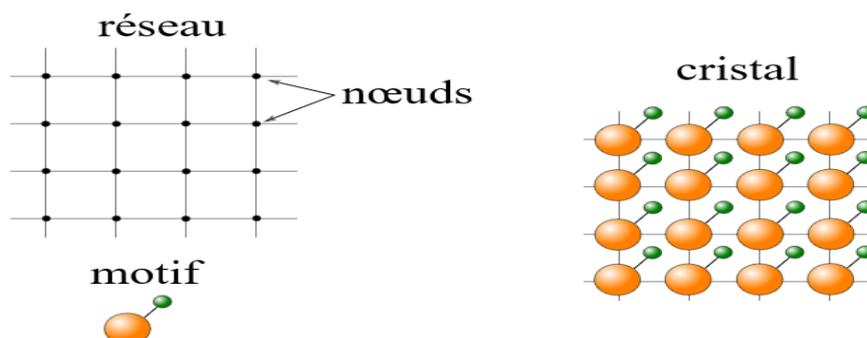
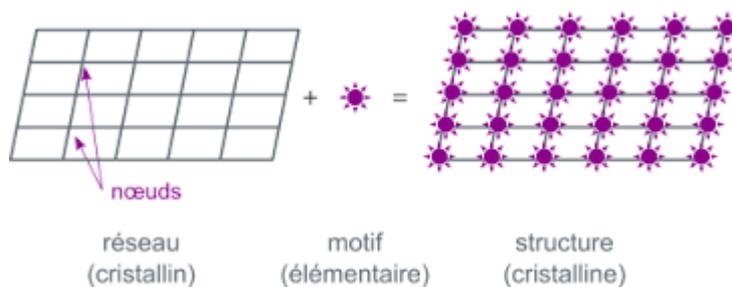
Ainsi pour le décrire, on choisit une unité structurale qui le reproduit par translation. Cette unité c'est la maille élémentaire. On distingue la maille simple ou primitive et la maille multiple

C'est l'unité structurale qui est reproduit par translation, on l'appel **maille élémentaire**.



En conclusion:

$$\text{Structure cristalline} = \text{Réseau cristallin} + \text{motif}$$



Exemple :

2.11.5.1 Réseau cubique simple :

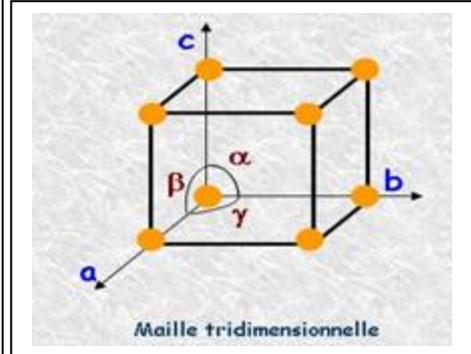
$$\vec{a} = a\vec{i}, \vec{b} = b\vec{j}, \vec{c} = c\vec{k} .$$

$(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ Dessine un cube de côté a . C'est la maille du réseau.

Un point quelconque M est défini par le vecteur $\vec{OM} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c}$ avec $m, n, p \in \mathbb{Z}$

Le réseau est l'ensemble de ces points M .

On a un atome sur chaque sommet ; Motif = $(0, 0, 0)$



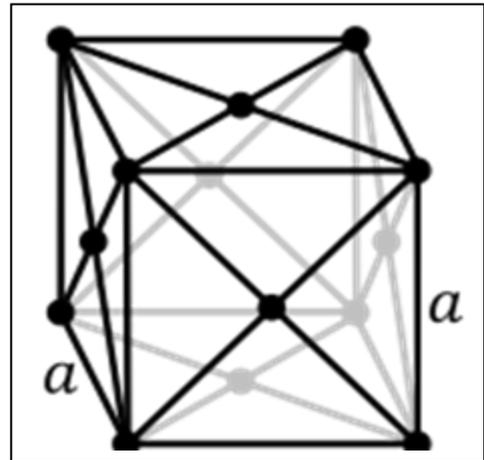
2.11.5.2 Réseau cubique faces centrées :

Maille cubique de côté a , les constituants élémentaires sont sur les huit sommets et au centre de chacune des six faces.

Motif : 1 sommet $(0, 0, 0)$, 3 centres des faces $(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, 0)$, $(\frac{a}{2}, 0, \frac{a}{2})$, $(0, \frac{a}{2}, \frac{a}{2})$.

Nombre d'atomes qui appartiennent en propre à la maille , est le nombre d'atomes du motif.

Si un constituant élémentaire appartient à N mailles, il ne compte que pour $\frac{1}{N}$ dans le calcul N_{propre} .



Exemple :

Réseau cubique simple : $8 \text{ sommets} \times \frac{1}{8} = 1$ (chaque sommet appartient à 8 mailles).

Réseau cubique faces centrées : $8 \text{ sommets} \times \frac{1}{8} + 6 \text{ centres} \times \frac{1}{2} = 4$.

Coordinance :

Nombre de plus proches voisins d'un constituant élémentaire donné.

Exemple :

Réseau cubique simple, Coordinance = 6 pour tous les constituants élémentaires.

Réseau cubique faces centrées Coordinance = 12 (pour tous aussi).

Compacité :

On assimile les constituants élémentaires à des sphères de rayon R :

$$\chi = \frac{\text{Volume occupé par les constituants élémentaires}}{\text{Volume du réseau}} = \frac{N_{propre} \cdot \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot R^3}{\text{Volume du réseau}}$$

Masse volumique :

$$\rho = \frac{N_{propre} \cdot m_{CE}}{V_{maille}} = \frac{N_{propre} \cdot M_{CE}}{V_{maille}} = \frac{N_{propre} \cdot M}{N_A \cdot V_{maille}}$$

2.12 Les systèmes cristallins :

Il existe **7 systèmes cristallins**. Bravais (1848) a montré qu'il y avait en fait 14 systèmes cristallins et tous les cristaux appartiennent à ces systèmes :

On distingue 7 systèmes cristallins :

Tableau 2 : les 7 éléments cristallins, leurs paramètres géométriques et leurs éléments de symétrie

Système	Longueurs des côtés	des Angles	Éléments de symétrie*
Système cubique	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	3A4 4A3 6A2 3M 6M' C
Système hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	A6 3A'2 3A''2 M 3M' 6M'' C
Système quadratique	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	A4 2A'2 2A''2 2M' 2M'' M C
Système rhomboédrique	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	A3 3A'2 3M' C
Système orthorhombique	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	A2 A'2 A''2 M M' M'' C
Système monoclinique	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma \neq 90^\circ$	A2 M C
Système triclinique	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	C

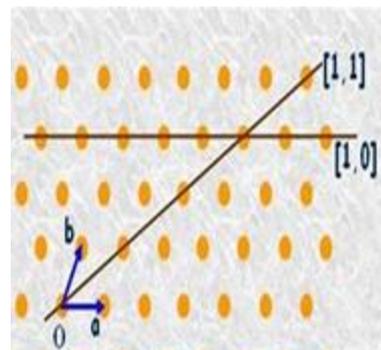
2.13 . Indices de Miller (Directions-rangées- et plans dans un cristal) :

La meilleure façon de déterminer les plans dans un cristal, C'est d'utiliser les indices de Miller.

2.13.1 Les rangées réticulaires :

On appelle rangée réticulaire (ou direction cristallographique) toute droite passant par deux nœuds du réseau. Comme cela est décrit sur le schéma suivant.

elles sont des droites passant par deux nœuds



. est portée par les vecteurs primitifs \vec{a} , \vec{b} et \vec{c} . est portée par le vecteur :

$$\vec{R} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c} \quad u, v, w \in \mathbb{Z}$$

Se note $[uvw]$. (indices entre des crochets, sans virgules de séparation). Les indices négatifs sont surlignés \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} .

2.13.2 Plan réticulaire (plan cristallin) :

Un plan réticulaire est un plan passant par trois nœuds non colinéaires du réseau. Une famille de plans réticulaires est un ensemble de plans parallèles et équidistants qui passent par tous les nœuds du réseau. Elle est notée (hkl) où h , k et l sont des entiers relatifs, premiers entre eux, dits indices de Miller. Ces indices sont ceux du plan de la famille le plus proche de l'origine, qui coupe les axes ox , oy et oz respectivement en $p=a/h$, $q=b/k$ et $r=c/l$.

Chapitre 5 : Notions d'analyse spectrale.

3.1 Analyse spectrale UV-visible, infra-rouge :

3.1.1 Spectroscopie UV-Visible :

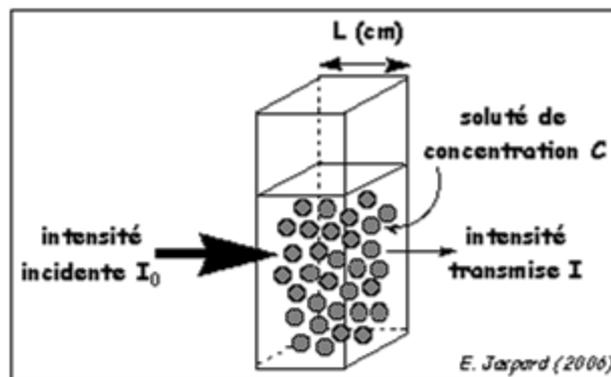
3.1.1.1 Utilisation du spectrophotomètre :

L'objectif de la spectroscopie UV-visible est de réaliser un dosage par étalonnage d'une espèce chimique (méthode non destructive).

La spectroscopie UV-visible utilise des longueurs d'onde allant de 200 nm à 800 nm par absorption.

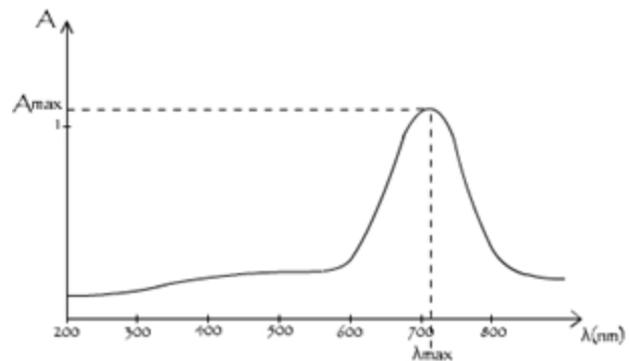
On définit l'absorbance par :

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \text{ sans unité ou en dB}$$



- **réglage du blanc** : On réalise le réglage du blanc (ou du zéro) pour s'affranchir des causes d'absorption dans la cuve du spectrophotomètre qui ne proviennent pas de la solution chimique à étudier.
- **recherche du maximum d'absorption**

On règle le spectrophotomètre au maximum d'absorption pour obtenir un maximum de précision lors du dosage



3.1.1.2 La loi de Beer-Lambert

Définition

La loi de Beer-Lambert est définie par :

$$A = K \cdot C = \epsilon_{\lambda} \cdot L \cdot C$$

ϵ_{λ} : en $L \cdot mol^{-1} \cdot m^{-1}$

→ coefficient d'extinction ou d'absorption molaire

L en m

→ épaisseur de la cuve

C en $mol \cdot L^{-1}$

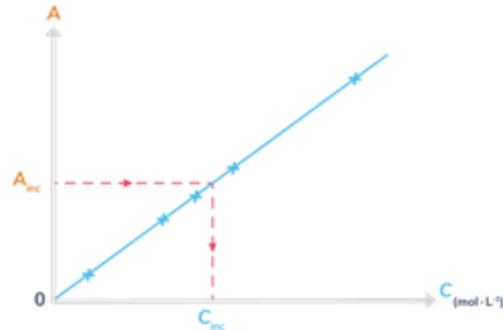
→ concentration molaire

- **Conditions de validité :**

- 1- lumière monochromatique .
- 2- solution homogène et pas trop concentrée $CC < 0.1 \text{ mol. L}^{-1}$.
- 3- soluté ne doit pas réaliser de réaction sous l'effet de la lumière incidente.

➤ **Application au titrage :**

Avec la courbe d'étalonnage du spectrophotomètre, il est possible d'en déduire une concentration molaire



3.1.1.3 Rappel synthèse soustractive et matière colorée :

➤ **Les liaisons conjuguées :**

Lorsque le nombre de liaisons conjuguées augmente alors la longueur d'onde au maximum d'absorption augmente

A partir de 7 liaisons conjuguées sans discontinuer la matière est colorée par synthèse soustractive

3.1.2 Spectroscopie IR

- En spectroscopie infrarouge, on n'observe pas la transition des électrons comme dans le cas de la [spectroscopie ultraviolet / visible](#), **mais l'énergie associée à la vibration des liaisons chimiques.**
- Quand on soumet une molécule à une radiation infrarouge, la structure moléculaire vibrent pour cela La spectroscopie infrarouge permet de déterminer la présence de groupes caractéristiques :
 - 1- les distances interatomiques : **vibrations de valence ou d'élongation.**
 - 2- les angles de valence : **vibrations de déformation.**
- En spectroscopie infrarouge, on effectue donc un balayage de fréquence (comprises entre 4000 cm^{-1} et 625 cm^{-1}).
- Lorsque la fréquence de la radiation infrarouge est **égale** à la fréquence de résonance de la liaison, **il y a absorption de l'énergie lumineuse et amplification des vibrations.**
- On peut montrer que la fréquence de vibration entre deux atomes dépend de la force de la liaison qui les unit et de leur masse atomique respective (m_1 et m_2) selon la loi de Hooke (qui décrit les mouvements d'un ressort) :

Références

Chapitre Grandeurs Physique Et incertitudes.

1. Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques, J.R. Taylor, Editions Dunod, 2000.
2. J.Taylor Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques Paris, Dunod, 2000.
3. Bailly, Francis, and Giuseppe Longo. "Incomplétude et incertitude en Mathématiques et en Physique." actes du colloque en mémoire de Gilles Châtelet, Paris, Juin. 2001.

Chapitre optique Géométrique.

1. Optique géométrique. Amer Paru en décembre 2005
2. Interférences, diffraction, polarisation, cours et exercices corrigés Optique géométrique Alexandre April 2017
3. Balland , B. (2007). Optique géométrique: Imagerie et instruments. PPUR presses polytechniques.
4. lien :DIUE2015tc-rn-Cours-Jeudi-12-Nov-DIU-TC-CG
5. lien pdf_LP315_II

Chapitre Notion sur la cristallographiques

1. Symétrie et structure : cristallographie du solide, Jacques Angenault, Vuibert
2. Introduction à la chimie du solide, Lesley Smart et Elaine Moore, Dunod
3. "Cristallographie géométrique et radiocristallographie", Jean-Jacques Rousseau, Dunod
4. Chimie des Solides, Jean-Francis Marucco, EDP Sciences.

Chapitre Notions d'analyse spectrale.

1. Biémont, É. (2008). Spectroscopie moléculaire: Structures moléculaires et analyse spectrale. De Boeck Supérieur.
2. Preumont, A. (1990). Vibrations aléatoires et analyse spectrale. PPUR presses polytechniques.

Table des Matières

Chapitre 1 : Rappel mathématique	1
1.1 GRANDEURS PHYSIQUES ET INCERTITUDES.....	2
1.1.1 Décrire un phénomène physique.....	2
1.1.2 Système d'unités.....	2
1.1.3 Equation aux dimensions.....	2
1.2 Calcul d'erreurs.....	3
1.2.1 Complément mathématique.....	3
1.2.1.1 Dérivée d'une fonction.....	3
1.2.1.2 Opérations sur les dérivées.....	4
1.2.1.3 Dérivée logarithmique.....	4
1.2.1.4 Différentielle totale.....	4
1.2.2 Mesures et précisions sur les grandeurs mesurées.....	4
1.2.2.1 Erreur absolue et incertitude absolue.....	4
1.2.2.2 L'erreur absolue et la différentielle totale.....	5
1.2.2.3 Erreur relative et incertitude relative.....	5
1.2.3 La mesure et les chiffres significatifs.....	5
1.2.3.1 Définition.....	6
1.2.3.2 Calcul et chiffres significatifs.....	6
1.2.3.2.1 Multiplication et division.....	6
1.2.3.2.2 Addition et soustraction.....	6
Le résultat de la mesure ou du calcul doit avoir le <i>même nombre de chiffres après la virgule que celui de l'incertitude absolue</i>	6
2 Chapitre 2 : OPTIQUE.....	7
2.1 Les ondes électromagnétiques.....	8
2.1.1 Introduction.....	8
2.1.2 Nature de la lumière.....	8
2.1.2.1 Caractéristiques d'une onde électromagnétique.....	8
2.1.2.2 Domaine de la lumière visible.....	8
2.1.2.3 Courbe de sensibilité de l'œil.....	9
2.1.2.4 Sources de la lumière.....	9

2.1.2.4.1	Lumière monochromatique.....	9
2.1.2.4.2	Lumière polychromatique.....	9
2.1.2.5	Rayons lumineux. Faisceaux lumineux.....	10
2.1.2.5.1	Rayons.....	10
2.1.2.5.2	Faisceaux.....	10
2.1.2.6	Indice de réfraction absolu d'un milieu transparent :.....	10
2.1.2.6.1	Théorie corpusculaire de la lumière.....	10
2.1.2.6.2	Propriétés du photon.....	11
2.1.2.6.3	Diamètre apparent d'un objet.....	11
2.2	Optique Géométrique.....	11
2.2.1	Principes de l'optique géométrique et propagation de la lumière.....	11
2.2.1.1	Principe de Fermat :.....	11
2.2.1.2	Principe de retour inverse :.....	11
2.2.1.3	Propagation.....	12
2.2.2	Réfraction.....	12
2.2.2.1	Lois de Snell-Descartes.....	12
2.2.2.2	Applications de la réflexion totale :.....	13
2.2.2.2.1	Fibre optique.....	13
2.2.2.3	Aspect énergétique de la réflexion et de la réfraction.....	13
2.2.2.3.1	La lumière transporte de l'énergie.....	13
2.2.2.3.1.1	Coefficient de réflexion :.....	13
2.2.2.3.1.2	Coefficient de transmission :.....	13
2.2.2.3.1.3	Loi de conservation de l'énergie :.....	14
2.2.2.3.1.4	Formule de Fresnel (sous incidence normale) :.....	14
2.2.2.4	DIOPTRE PLAN.....	14
2.2.2.4.1	Image donnée par un dioptré plan.....	14
2.2.2.4.2	Lames à faces parallèles.....	15
2.2.2.4.3	LE PRISME.....	16
2.2.2.4.3.1	Définitions.....	16
2.2.2.4.3.2	Formules du prisme.....	16
2.2.2.4.3.3	Application : mesure de l'indice de réfraction d'un milieu.....	18
2.2.2.5	Dioptrés sphériques.....	18
2.2.2.5.1	Définition.....	18
2.2.2.5.2	Relation de position pour un dioptré sphérique.....	19

2.2.2.5.3	Convention des signes :.....	19
2.2.2.5.4	Vergence (convergence) d'un dioptre sphérique.....	20
2.2.2.6	Les lentilles sphériques minces.....	20
2.2.2.6.1	Lentille sphérique.	20
2.2.2.6.2	Éléments géométriques.....	21
2.2.2.6.3	Classification des lentilles. On distingue :.....	21
2.2.2.6.4	Lentilles convergentes.....	22
2.2.2.6.4.1	Foyers. Plans focaux. Distance focale.....	22
2.2.2.6.4.2	Formule des lentilles convergentes.....	23
2.2.2.6.4.3	Applications des lentilles convergentes.....	24
2.2.2.6.5	Lentilles divergentes.	24
2.2.2.6.5.1	Foyers. Plans focaux. Distance focale.....	24
2.2.2.6.5.2	Vergence d'une lentille- lentilles accolées.....	25
2.2.2.6.6	Théorème des vergences :.....	25
2.2.3	Réflexion.....	26
2.2.3.1	Image d'un objet donnée par un miroir plan.	26
2.2.3.2	Eléments du miroir sphérique.	26
2.2.3.2.1	Relation fondamentale (de positions) des miroirs sphériques.	27
2.2.4	Instruments d'optique :.....	28
2.2.4.1	L'œil :.....	28
2.2.4.1.1	Description :.....	28
2.2.4.1.2	Modélisation de l'œil :.....	29
2.2.4.1.3	Champ de vision :.....	29
2.2.4.1.4	Les défauts de l'œil.....	29
2.2.4.2	La loupe et le microscope optique.....	30
2.2.4.2.1	Formation des images par le biais d'une loupe :.....	30
2.2.4.2.2	Grossissement et puissance d'une loupe :.....	31
Chapitre3: Mécanique des fluides		32
2.3	Mécanique des fluides.....	33
2.4	Définition et Caractéristiques d'un fluide.....	33
2.4.1	Définition	33
2.4.2	Caractéristiques et propriétés des fluides.....	33
2.4.2.1	La masse volumique ρ (pas uniquement pour les fluides).....	33
2.4.2.2	Effets de la température.....	34

2.4.2.3	Densité.....	34
2.4.2.4	Poids volumique ρ	34
2.4.2.5	Volume massique v	34
2.4.2.6	La compressibilité des fluides.....	34
2.4.2.7	La viscosité.....	35
2.4.2.7.1	Mise en évidence expérimentale (aspect macroscopique).....	35
2.5	Hydrostatique (Statique des fluides ou Fluides au repos).....	36
2.5.1	Forces de volume et forces de surface :.....	36
2.5.2	Notion De Pression Et Force De Pression.	37
2.5.2.1	Unité De Pression P.....	37
2.5.3	Relation Fondamentale De La Statique Des Fluides.....	37
2.5.3.1	Énoncé du principe fondamental de l'hydrostatique.....	38
2.5.3.2	Transmission des pressions dans les liquides.....	38
2.5.3.2.1	Théorème de Pascal.....	38
2.5.3.2.2	Applications du principe fondamental.....	38
2.5.3.2.3	Principe de la presse hydraulique.....	38
2.5.3.2.4	Surface libre d'un liquide.....	39
2.5.3.2.5	Surface de séparation entre deux liquides non miscibles.....	39
2.5.3.2.6	Vases communicants (contenant plusieurs liquides non miscibles).....	40
2.5.4	Théorème D'ARCHIMÈDE.....	40
2.5.4.1	Condition de flottaison et d'immersion.....	40
2.5.4.2	Corps immergés mais touche le fond.....	40
2.5.4.3	Condition d'immersion (restant entre deux couches liquides).....	41
2.5.4.4	Condition de flottaison	41
2.6	Hydrodynamique (Dynamique des fluides idéals incompressibles).....	41
2.6.1	Généralités sur l'écoulement des fluides.	42
2.6.1.1	Écoulement laminaire.....	42
2.6.1.2	Ligne de courant :.....	42
2.6.1.3	Tube de courant :.....	42
2.6.1.4	Filet de courant :.....	42
2.6.2	Débit $Le (Q)$	43
2.6.2.1	Le Débit massique :.....	43
2.6.2.2	Le Débit volumique :.....	43
2.6.3	Equation de continuité (Conservation du débit).....	44

2.6.4	Théorème de BERNOULLI.....	44
2.6.4.1	Applications de l'équation de Bernoulli.....	45
2.6.4.1.1	Tube de Pitot :.....	45
2.6.4.1.2	Tube de Venturi :.....	46
Chapitre 4. Notion sur la cristallographiques		47
2.7	Introduction :.....	48
2.8	Définition de la Cristallographie :.....	48
2.9	Définition d'un cristal :.....	48
2.10	Définition d'un polyèdre :.....	49
2.11	Maille, motif, Nœud, réseau et structure cristalline :.....	49
2.11.1	Maille :.....	49
2.11.2	Motif :.....	50
2.11.3	Nœud :.....	50
2.11.4	Réseau :.....	50
2.11.5	Maille élémentaire :.....	51
2.11.5.1	Réseau cubique simple :.....	52
2.11.5.2	Réseau cubique faces centrées :.....	52
2.12	Les systèmes cristallins :.....	53
2.13	. Indices de Miller (Directions-rangées- et plans dans un cristal) :.....	53
2.13.1	Les rangées réticulaires :.....	53
2.13.2	Plan réticulaire (plan cristallin) :.....	54
Chapitre 5 : Notions d'analyse spectrale.		55
3.1	Analyse spectrale UV-visible, infra-rouge :.....	56
3.1.1	Spectroscopie UV-Visible :.....	56
3.1.1.1	Utilisation du spectrophotomètre :.....	56
3.1.1.2	La loi de Beer-Lambert.....	56
3.1.1.3	Rappel synthèse soustractive et matière colorée :.....	57
3.1.2	Spectroscopie IR	57
Références		58
Table des Matières.....		59