

Les ondes mécaniques et les ondes lumineuses

Les ondes mécaniques

www.pc1.ma

Définition:

L'onde mécanique est la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel élastique sans transport de la matière.

- L'onde est transversale si la déformation du milieu matériel est perpendiculaire à la direction de sa propagation
- L'onde est longitudinale si la déformation du milieu matériel est parallèle à la direction de sa propagation.

Vitesse de propagation d'une onde:

La vitesse de propagation d'une onde (nommée célérité) est égale à la distance parcourue au temps mis à la parcourir.

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad \text{en (m/s)}$$

Cas de propagation d'une onde le long d'une corde tendue:

La vitesse de propagation d'une onde le long d'une corde est donnée par la relation suivante:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \text{avec : } \mu = \frac{m}{L}$$

T: tension de la corde en (N).

μ : masse linéaire de la corde en (kg/m)

Notion de retard temporel:

Chaque point M du milieu de propagation répète le mouvement de la source S avec un retard temporel : $\tau = \frac{SM}{v}$

v : célérité de propagation de l'onde.

Relation entre l'élongation d'un point M du milieu de propagation et celle de la source S : $y_M(t) = y_S\left(t - \frac{SM}{v}\right)$

L'ondes mécaniques progressives:

C'est une série d'ébranlements identiques résultant d'une vibration entretenue de la source des ondes.

Exemple de l'onde mécanique progressive le long d'une corde :

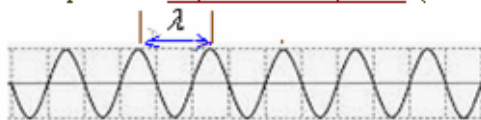
La longueur d'onde:

La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde pendant une période T du mouvement de la source.

$$\lambda = v.T = \frac{v}{\nu}$$

λ : Longueur d'onde (m) v : vitesse de propagation de l'onde (m/s) ν : fréquence de l'onde progressive = fréquence de la source (Hz)

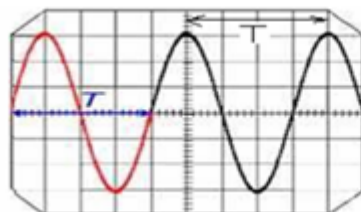
- La longueur de l'onde représente la périodicité spatiale (Elle est égale à la distance entre deux crêtes successives)



Aspect du milieu de propagation
à un instant donné

- La période T représente la périodicité temporelle (on la détermine à partir de la variation de l'élongation en fonction du temps)

Exemple:



Sensibilité horizontale : 2ms/div

T : est représentée par 4 divisions

donc la période $T = 2\text{ms/div} \times 4\text{div} = 8\text{ms}$

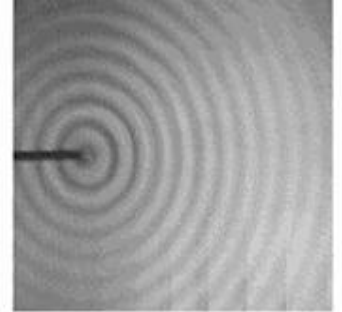
$$\text{La fréquence : } \nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{8 \cdot 10^{-3}} = 125\text{Hz}$$

Exemples des ondes mécaniques progressives :► Les ondes mécaniques progressives à la surface de l'eau:

Dans une cuve à onde par une source vibrante ou une plaque vibrante on obtient les résultats suivant:



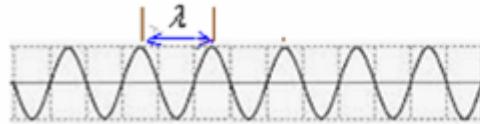
onde rectiligne



Onde circulaire

Dans ces deux cas il s'agit d'une onde **mécanique transversale**.

► **L'onde mécanique progressive le long d'une corde:**



Onde mécanique transversale.

Remarque:

A l'œil nu on ne peut pas suivre le mouvement de l'onde progressive.

En utilisant le stroboscope :

- Si la fréquence du stroboscope est égale à celle du mouvement de l'onde progressive on obtient **l'immobilité apparente**.
- Si sa fréquence est légèrement supérieure à celle du mouvement de l'onde progressive on obtient un mouvement **apparent ralenti dans le sens contraire** du mouvement (et dans le même sens du mouvement si elle est légèrement inférieure à celle du mouvement de l'onde progressive).

Les Ondes sonores et les ondes ultrasonores:

Les ondes sonores:

Les ondes sonores sont des ondes mécaniques périodiques longitudinales résultant de la compression et la dilatation des constituants du milieu de propagation.

Les ondes ultrasonores:

Les ondes **ultrasonores** sont des **ondes sonores** dont la fréquence est supérieure à 20kHz, ils sont inaudibles et se réfléchissent partiellement sur un obstacle.

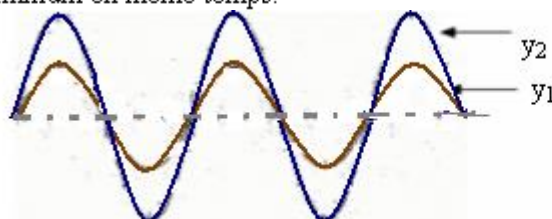
Par conséquent les ondes ultrasonores sont des ondes mécaniques longitudinales.

Remarque: les ondes sonores et les ondes ultrasonores ne se propagent pas dans le vide.

Comparaison du mouvement de deux points du milieu de propagation:

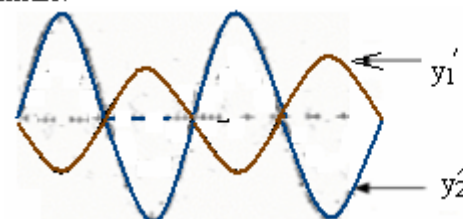
- Deux points M et M' du milieu de propagation vibrent **en phase** si la distance qui les sépare est un multiple entier de la longueur d'onde λ . $MM' = k\lambda$ avec $k \in \mathbb{N}^*$
- Deux points M et M' du milieu de propagation vibrent **en opposition de phase** si la distance qui les sépare est un nombre impair de la demi-longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$. $MM' = (2k'+1)\frac{\lambda}{2}$ avec $k' \in \mathbb{N}$

Remarque: Deux fonctions sinusoïdales sont dites **en phase** si elles s'annulent en même temps et elles atteignent leur maximum et leur minimum en même temps.



y_1 et y_2 sont en phase.

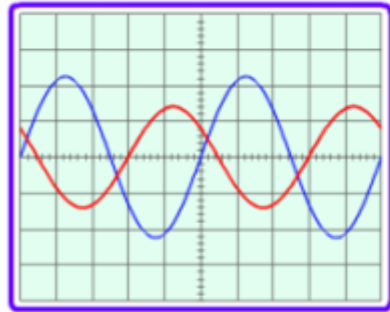
Deux fonctions sinusoïdales sont dites **en opposition de phase** si elles s'annulent en même temps mais l'une est maximale quand l'autre est minimale.



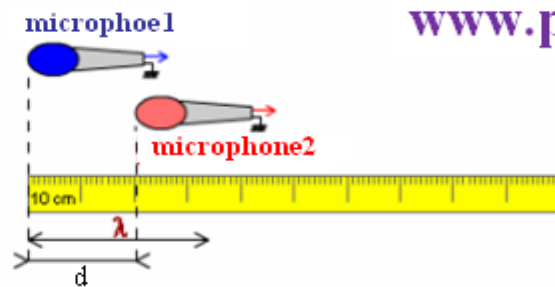
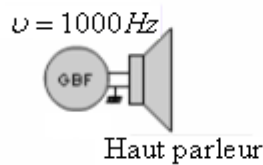
y_1' et y_2' sont en opposition de phase.

Détermination de la vitesse de propagation du son dans l'air:

Pour déterminer la vitesse de propagation du son émis par un haut-parleur dans l'air on utilise le montage suivant:



$s = 0,2 \text{ ms/div}$



Après avoir activé le haut parleur on visualise sur l'écran de l'oscilloscope le signal correspondant à chacun des deux microphones M_1 et M_2 .

Au début les deux microphones sont placés côte à côte face au haut parleur et à la même distance de lui, les deux signaux correspondant à M_1 et à M_2 sont en phase.

On laisse le microphone M_1 à sa place et on déplace le microphone M_2 lentement et parallèlement à l'axe du haut-parleur, jusqu'à obtenir à nouveau les deux courbes en phase pour la 1^{ère} fois pour une distance « d » donnée, cette distance $d = \lambda$ et pour la 2^{ème} fois pour une distance $d = 2\lambda$ et pour la 3^{ème} fois pour une distance $d = 3\lambda$..etc.....

L'expérience a montré que M_1 et à M_2 sont en phase pour la 1^{ère} fois pour la distance $d = 34 \text{ cm}$ donc $\lambda = 34 \text{ cm}$

On a: $T = 0,2 \text{ ms/div} \times 5 \text{ div} = 10^{-3} \text{ s}$

La vitesse de propagation de l'onde sonore émise par le haut parleur:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{0,34 \text{ m}}{10^{-3} \text{ s}} = 340 \text{ m/s}$$

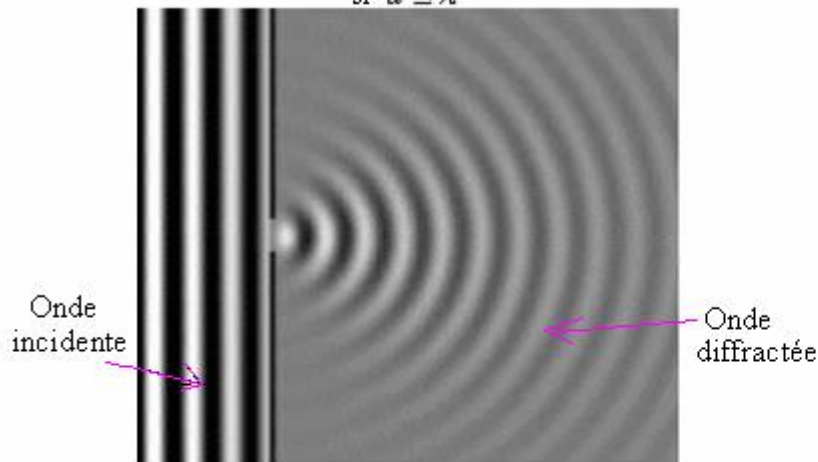
Phénomène de diffraction:

La diffraction est un phénomène qui caractérise des ondes, il se produit lorsque l'onde passe à travers une ouverture de largeur « a » inférieure ou égale à la longueur d'onde $a \leq \lambda$.

Onde diffractée à la surface de l'eau:

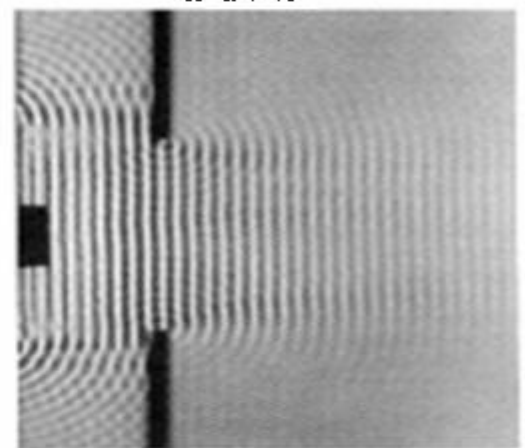
On utilise une cuve à onde muni d'une plaque vibrante devant laquelle on place un diaphragme comportant une ouverture de largeur "a".

si $a \leq \lambda$



On obtient la diffraction

si $a > \lambda$



pas de diffraction

L'onde incidente et l'onde diffractée ont la même longueur d'onde et même vitesse de propagation et même fréquence.

Phénomène de dispersion:

Définition:

Un milieu est dispersif pour les ondes si la vitesse de propagation des ondes dans ce milieu dépend de leur fréquence.

L'expérience montre que la vitesse de propagation de l'onde à la surface de l'eau change de valeur lorsqu'on fait varier la fréquence de vibration de la source.

Donc l'eau est un milieu dispersif

Remarque : L'air n'est pas un milieu dispersif (car la vitesse de propagation du son dans l'air est 340 m/s ; elle ne dépend pas de la fréquence de l'onde émise par un haut parleur lié avec un générateur GBF lorsqu'on fait varier sa fréquence).

-La corde n'est pas un milieu dispersif : car d'après la relation $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ avec : $\mu = \frac{m}{L}$, la vitesse ne dépend que de la

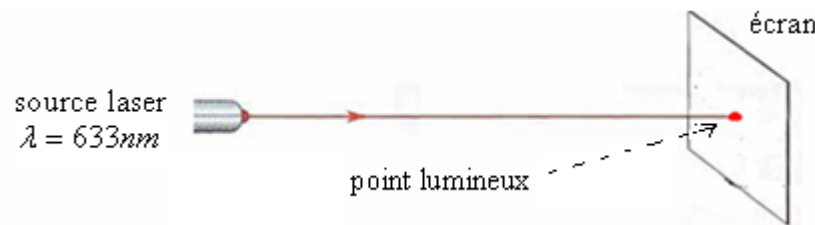
tension de la corde, de sa masse et de sa longueur et ne dépend pas de la fréquence de la source.

Les ondes lumineuses

Diffraction de la lumière:

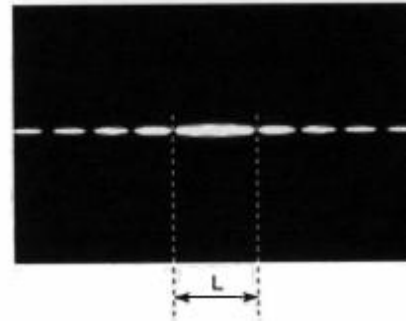
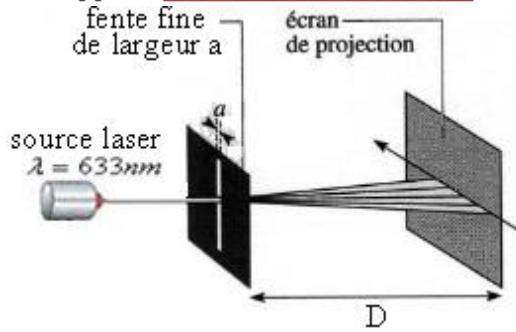
Expérience:

En envoyant à l'aide d'une source laser un faisceau lumineux étroit de longueur d'onde $\lambda = 633nm$ sur un écran, on obtient un point lumineux sur l'écran.



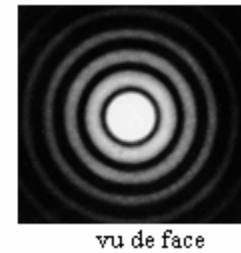
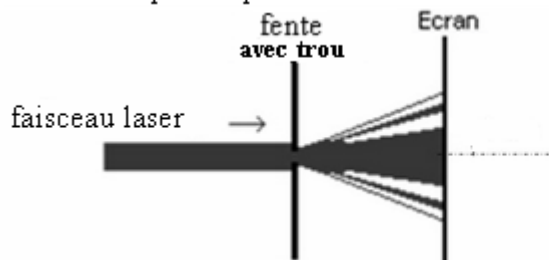
En intercalant entre l'écran et la source laser une plaque portant une fente de largeur "a" on observe sur l'écran de projection situé à une distance "D" de la fente une tâche centrale plus large entourée de part et d'autre par des tâches secondaires moins larges et moins brillantes.

Ce phénomène s'appelle diffraction de la lumière.



Remarque: En remplaçant la fente par un obstacle très fin (un cheveu) on obtient les mêmes résultats que ceux trouvés précédemment.

En utilisant une plaque contenant un trou circulaire, on obtient une tâche lumineuse circulaire entourée d'anneaux concentriques d'intensité de plus en plus faible.



On constate expérimentalement que :

- La largeur "L" de la tâche centrale augmente lorsque la largeur de la fente diminue.
- La largeur "L" de la tâche centrale augmente avec la longueur de l'onde lumineuse et avec la distance D.

Conclusion:

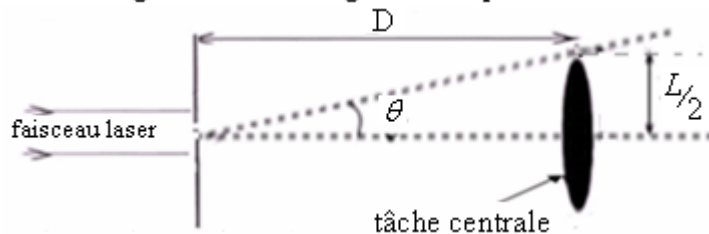
Le phénomène de diffraction montre que la lumière a un aspect ondulatoire.

La lumière peut donc être caractérisée comme toutes les ondes, par sa célérité, sa fréquence et sa longueur d'onde.

Etude de la diffraction d'un faisceau laser par une fente:

L'écart angulaire:

L'écart angulaire θ est l'angle sous lequel on voit la moitié de la tâche centrale depuis la fente de diffraction.



À partir de la figure on a : $\tan \theta = \frac{L/2}{D}$

Pour les angles petits tel que: $\theta \leq 15^\circ$ (en rad) $\tan \theta \approx \theta$, on peut écrire avec approximation :

donc la relation précédente s'écrit : (1) $\theta = \frac{L}{2D}$

Relation entre l'écart angulaire et la largeur de la fente:

Expérimentalement on constate que : (2) $\theta = \frac{\lambda}{a}$

Expression de la largeur de la fente:

D'après les relations (1) et (2) on a: $\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D} \Rightarrow L = \frac{2\lambda D}{a}$

La largeur de la tâche augmente avec l'augmentation de D et celle de la longueur d'onde et elle diminue avec l'augmentation de la largeur (a) de la fente, ce qui est en accord avec les résultats de l'expérience.

Remarque: Dans le cas de diffraction par un trou circulaire de diamètre a , l'écart angulaire est donné par la relation suivante: $\theta = \frac{1,22 \cdot \lambda}{a}$

Dans le cas de la diffraction par un fil de diamètre d , l'écart angulaire est donné par la relation suivante: $\theta = \frac{\lambda}{d}$

Caractéristiques des ondes lumineuses :

La lumière est une onde électromagnétique:

La lumière est une onde électromagnétique qui se propage dans les milieux transparents et dans le vide.

La vitesse de propagation de la lumière dans le vide (et dans l'air) est : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. (on l'appelle célérité)

Lumière monochromatique et lumière polychromatique:

Lumière monochromatique :

Toute radiation lumineuse ayant une seule couleur est dite monochromatique. Elle est caractérisée par sa fréquence ν qui ne change pas avec le milieu de propagation.

Exemple : Le laser est une source de lumière monochromatique c'est-à-dire composée d'une seule radiation.

La longueur d'onde d'une lumière monochromatique dépend du milieu de propagation $\lambda = \frac{v}{\nu}$

La vitesse de propagation de la lumière dépend du milieu de propagation.

Remarque: La vitesse de propagation de la lumière dans le vide est : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, par conséquent la relation précédente si le

milieu de propagation est le vide s'écrit: $\lambda_o = \frac{c}{\nu}$ λ_o : est la longueur de l'onde lumineuse dans le vide

Lumière blanche (ou lumière visible)

La lumière blanche est une lumière polychromatique composée de plusieurs radiations monochromatiques

Le mot polychromatique signifie « composée de plusieurs couleurs ».

Exemples : la lumière du soleil, celle de la lampe à incandescence ou de la bougie

Le domaine de la lumière blanche (visible) est. $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$. à l'extérieur de ce domaine la lumière est invisible

- pour : $\lambda > 800 \text{ nm}$ domaine de l'infrarouge.

- pour : $\lambda < 400 \text{ nm}$ domaine de l'ultraviolet.

Indice de réfraction d'un milieu transparent :

Chaque milieu transparent est caractérisé par son indice de réfraction qui est donné par la relation suivante:

$$n = \frac{c}{v} \quad (a)$$

n : indice de réfraction d'un milieu

c : célérité de la lumière dans le vide.

v : vitesse de propagation de la lumière dans le milieu

Remarque:

Dans le vide on a

$$c = \lambda_o \nu \quad (1)$$

Or dans un milieu donné:

$$v = \lambda \nu \quad (2)$$

En divisant (1) par (2) c'est-à-dire : et en remplaçant dans la relation (a) elle devient :

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

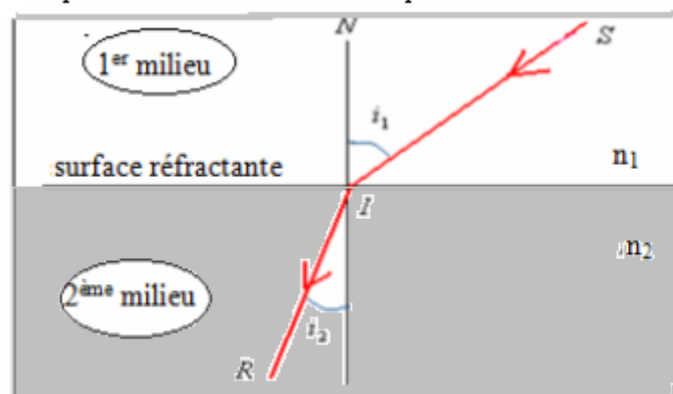
n : indice de réfraction d'un milieu

λ : longueur d'onde de la lumière dans le milieu

λ_o : longueur d'onde de la lumière dans le vide.

Réfraction de la lumière :

La réfraction de la lumière est le changement de direction que subit un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un milieu transparent à un autre milieu transparent.



SI: rayon incident

IR: rayon réfracté

I: point d'incidence.

IN: la normale au point d'incidence

n_1 : indice de réfraction du 1^{er} milieu .

n_2 : indice de réfraction du 2^{ème} milieu .

i_1 : angle d'incidence angle de réfraction

i_2 : angle de réfraction .

Loi de Descartes de réfraction de la lumière:

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$

2^{ème} loi de réfraction

Remarque:

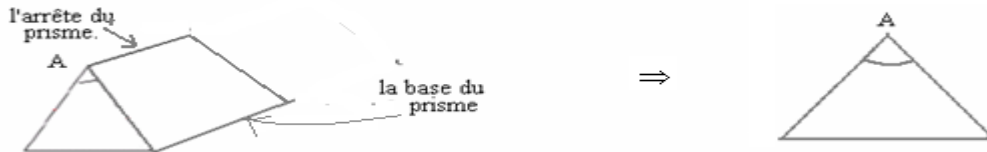
Lorsque la lumière passe d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent ($n_2 > n_1$), le rayon réfracté s'approche de la normale.

Lorsque la lumière passe d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent ($n_2 < n_1$), le rayon réfracté s'écarte de la normale.

Dispersion de la lumière:

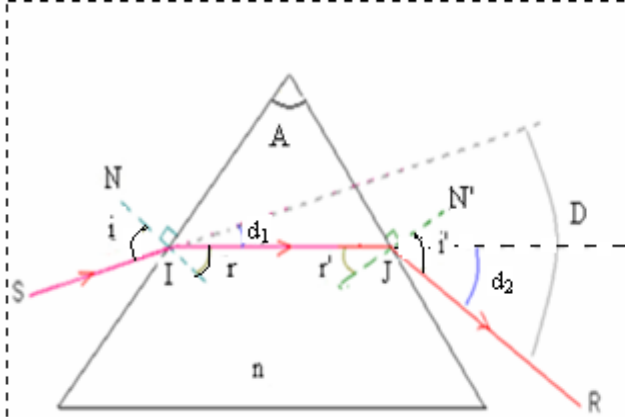
Le prisme:

Le prisme est un milieu transparent et homogène limité par deux faces planes non parallèles, la face opposée à l'arête est la base du prisme.



Trajet d'un faisceau lumineux à travers le prisme:

On envoie un faisceau de lumière monochromatique sur la face d'un prisme, on constate que le faisceau subit une réfraction sur la première face puis sur la deuxième face puis dévie vers la base du prisme.



i : angle d'incidence sur la première face.
 I : point d'incidence sur la première face.
 NI : la normale en I à la première face du prisme.
 r : angle de réfraction sur la première face.
 r' : angle d'incidence sur la deuxième face.
 i' : angle de réfraction sur la deuxième face.
 J : point d'incidence sur la deuxième face.
 $N'J$: la normale en J à la deuxième face du prisme.
 A : angle du prisme.
 n : indice de réfraction du prisme.
 D : angle de déviation.

3) Les relations du prisme:

- Dans le triangle AIJ on a : $A + (\frac{\pi}{2} - r) + (\frac{\pi}{2} - r') = \pi \Rightarrow A - r - r' = 0$ donc : $A = r + r'$

En appliquant la loi de réfraction sur la première face du prisme:

$$\sin i = n \sin r$$

En appliquant la loi de réfraction sur la deuxième face du prisme:

$$n \sin r' = \sin i'$$

L'angle de déviation:

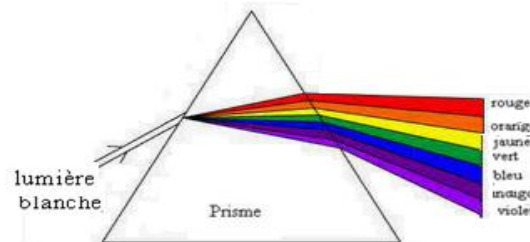
$$D = d_1 + d_2 = (i - r) + (i' - r') = i + i' - (r + r') = i + i' - A \quad \text{donc:} \quad D = i + i' - A$$

Dispersion de la lumière par un prisme:

Expérience:

En envoyant un faisceau de lumière blanche sur la première face d'un prisme, on obtient le spectre de la lumière blanche qui se compose des couleurs suivantes: rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet.

Le prisme sépare les couleurs en les réfractant différemment cette décomposition de la lumière s'appelle dispersion de la lumière blanche.



Dispersion de la lumière blanche par un prisme

Interprétation:

La lumière blanche est composée d'un ensemble de lumières colorées appelées radiations.

La dispersion de la lumière blanche par est due au fait que l'indice de réfraction du prisme dépend de la fréquence de l'onde lumineuse qui le traverse. L'indice de réfraction d'un prisme est une fonction décroissante de la longueur de l'onde comme l'indique la relation de Cauchy :

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

λ : La longueur de l'onde lumineuse
 a et b sont des constantes

Par conséquent chaque radiation va subir une déviation différente par le prisme ce qui entraîne la dispersion de la lumière.

Donc le prisme est un milieu dispersif.