

- La lumière : modèles et applications -

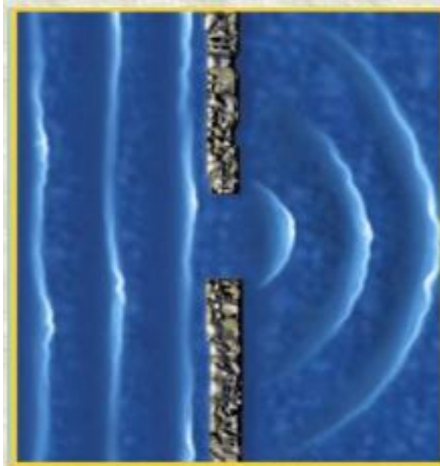
<i>Notions et contenus</i>	<i>Capacités exigibles</i>
Rayonnement électromagnétique : modèles ondulatoire et particulaire de la lumière - Domaines spectraux du rayonnement électromagnétique.	- Citer des ordres de grandeur de longueurs d'onde associées aux différents domaines spectraux du rayonnement électromagnétique (ondes radio, micro-ondes, rayonnements infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et gamma). - Citer des applications scientifiques et techniques des différents domaines spectraux de rayonnement électromagnétique.
- Photon : énergie, loi de Planck-Einstein - Effet photoélectrique et photoionisation.	- Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique et l'effet photoionisant à l'aide du modèle particulaire de la lumière.
Réflexion, réfraction - Notion de rayon lumineux dans le modèle de l'optique géométrique. Indice optique d'un milieu transparent.	- Définir le modèle de l'optique géométrique et en indiquer les limites.
- Réflexion, réfraction des ondes lumineuses. - Lois de Snell-Descartes.	- Établir la condition de réflexion totale.
- Rais sismiques. Généralisation des lois de Snell-Descartes aux ondes sismiques de volume.	- Appliquer les lois de la réflexion et de la réfraction à l'étude de la propagation des ondes sismiques de volume dans la Terre.



I- La dualité onde-particule de la lumière

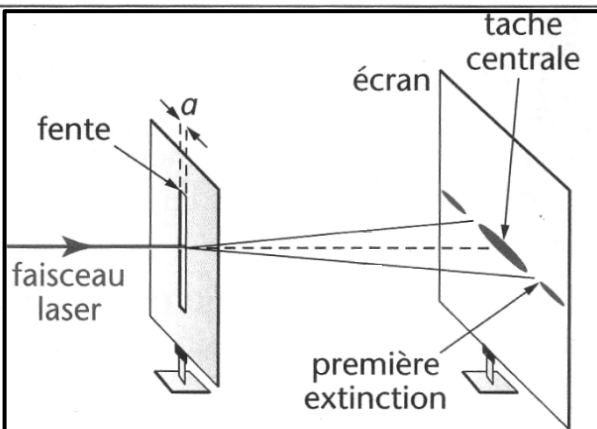
2 modèles sont nécessaires pour interpréter la totalité des phénomènes physiques mettant en jeu la lumière

1) Théorie ONDULATOIRE de la lumière



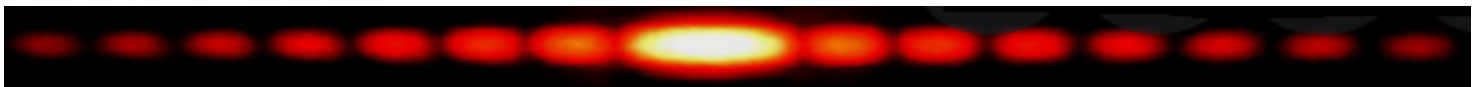
Doc 1 : Onde périodique à la surface de l'eau passant par une petite ouverture

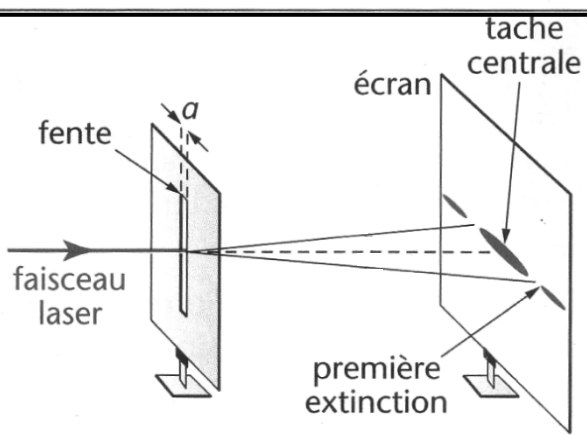
L'onde émerge de l'ouverture en atteignant des zones qui étaient « cachées » par l'obstacle : ce phénomène s'appelle la DIFFRACTION et il est caractéristique... de la propagation d'une onde.



Doc 2 : Lumière laser passant par une petite ouverture

Le même phénomène de diffraction est observé dans le Doc 2 mettant en jeu la lumière : c'est pourquoi la lumière peut être considérée comme une ONDE.

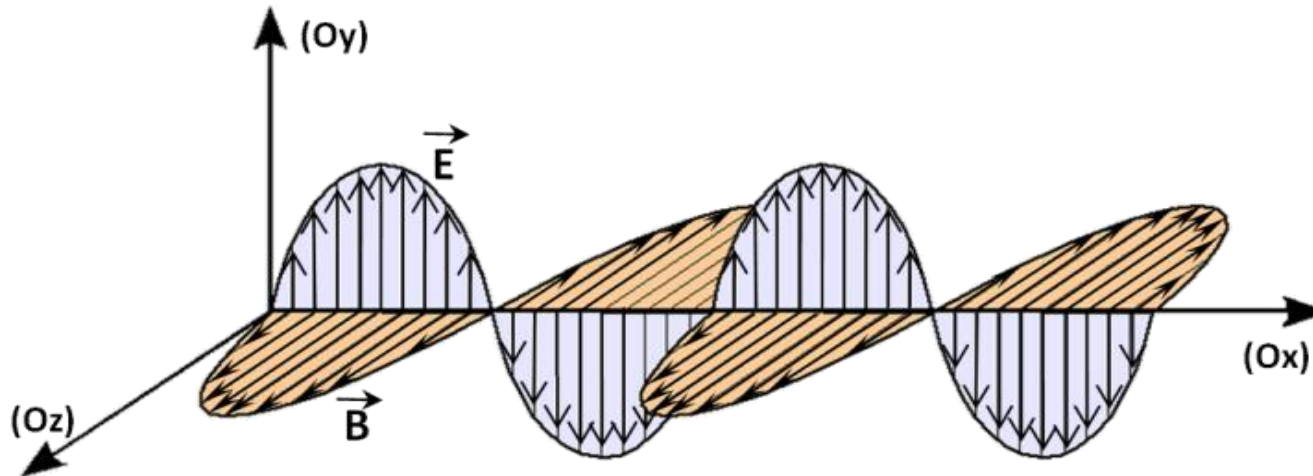




Doc 2 : Lumière laser passant par une petite ouverture

Le **même phénomène de diffraction** est observé dans le *Doc 2* mettant en jeu la lumière : c'est pourquoi **la lumière peut être considérée comme une ONDE.**

☛ La lumière : quel type d'ONDES ?



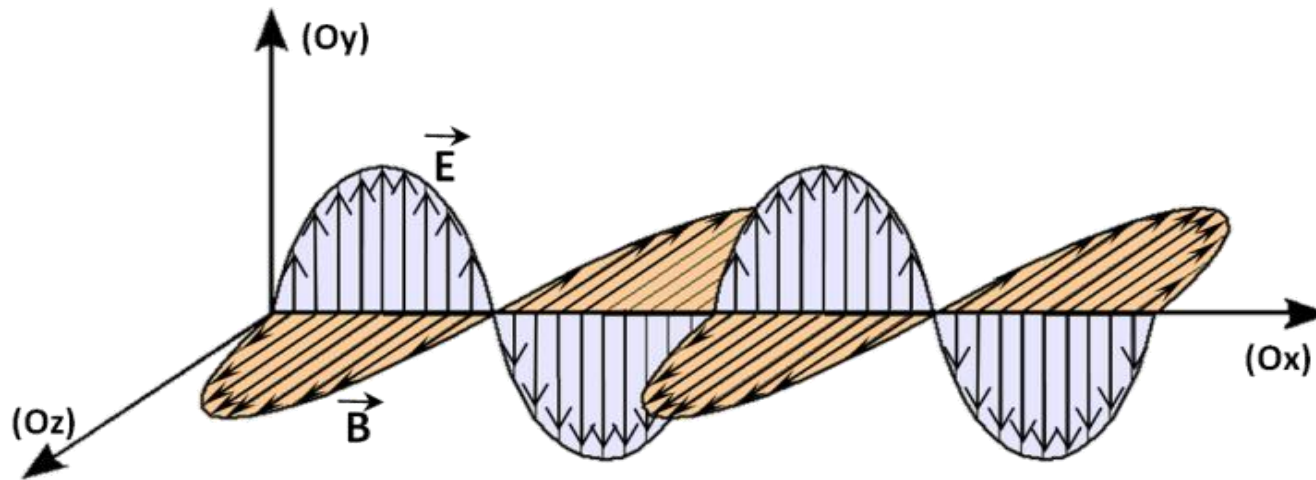
(Ox) = direction de propagation de l'onde lumineuse.

(Ox, Oy) = plan de propagation du champ $\vec{E}$.

(Ox, Oz) = plan de propagation du champ $\vec{B}$.

La lumière appartient à la catégorie des **ondes électromagnétiques** (propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique orthogonaux entre eux et à la direction de propagation de l'onde lumineuse).

☛ La lumière : quel type d'ONDES ?



(Ox) = direction de propagation de l'onde lumineuse.

(Ox,Oy) = plan de propagation du champ $\vec{E}$.

(Ox,Oz) = plan de propagation du champ $\vec{B}$.

La lumière appartient à la catégorie des **ondes électromagnétiques** (propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique orthogonaux entre eux et à la direction de propagation de l'onde lumineuse).

⇒ Caractéristiques :

- Lumière = onde **NON MECANIQUE** car elle peut se propager dans le vide.
- Lumière = onde **PERIODIQUE** caractérisée par une **longueur d'onde λ** , une **période temporelle T** , une **fréquence ν** et une **célérité v** telles que :

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

(m.s⁻¹) (m) (s)

ou

$$v = \lambda \times \nu$$

(m) (m.s⁻¹) (Hz)

⇒ Caractéristiques :

- Lumière = onde **NON MECANIQUE** car elle peut se propager dans le vide.
- Lumière = onde **PERIODIQUE** caractérisée par une **longueur d'onde λ** , une **période temporelle T** , une **fréquence ν** et une **célérité v** telles que :

$$v = \frac{\lambda \text{ (m)}}{T \text{ (s)}} \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$$

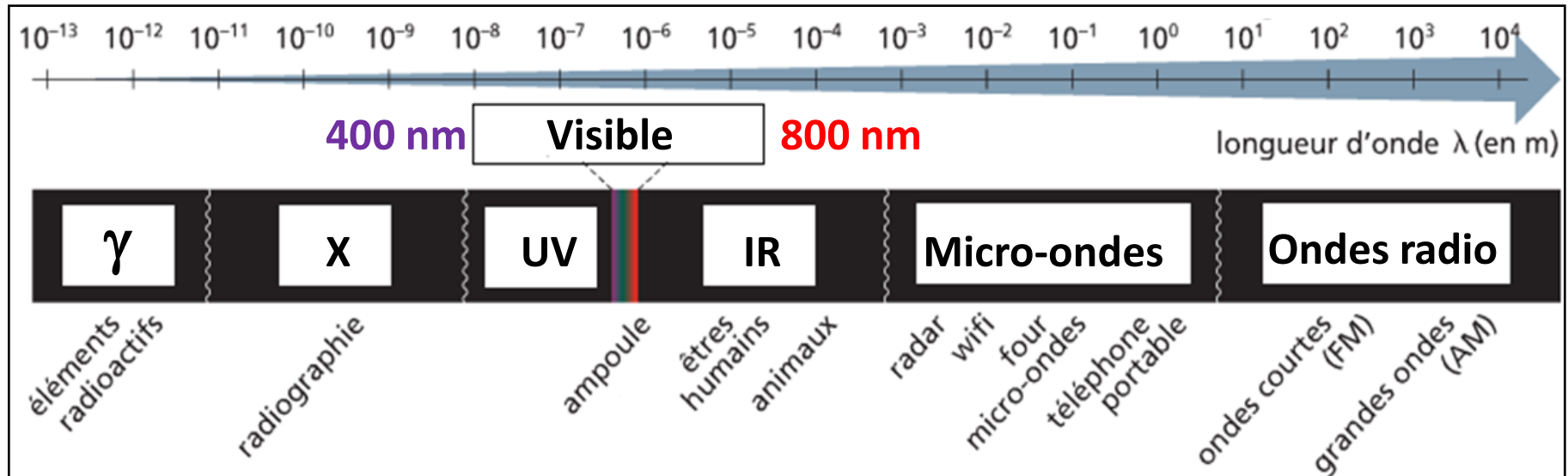
ou

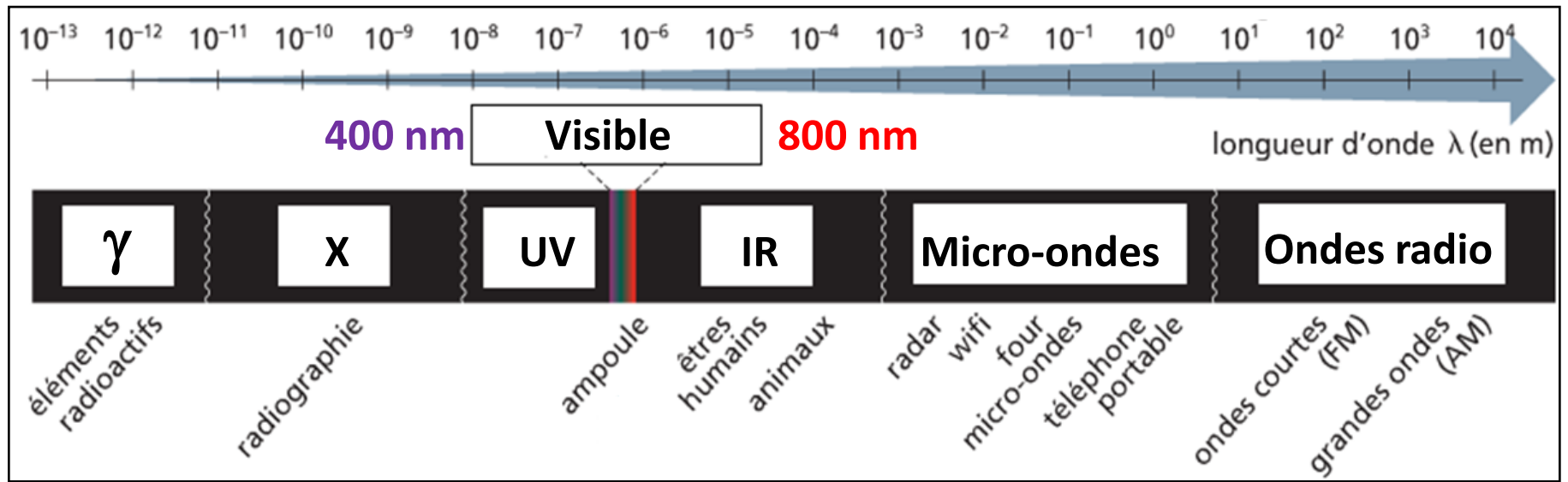
$$v = \lambda \times \nu \text{ (m.s}^{-1}\text{) (Hz)}$$

⇒ Ordre de grandeur à connaître :

Dans le vide et dans l'air, la célérité de la lumière vaut **$c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$**

On donne des **noms différents aux rayonnements électromagnétiques** selon leur longueur d'onde dans le vide





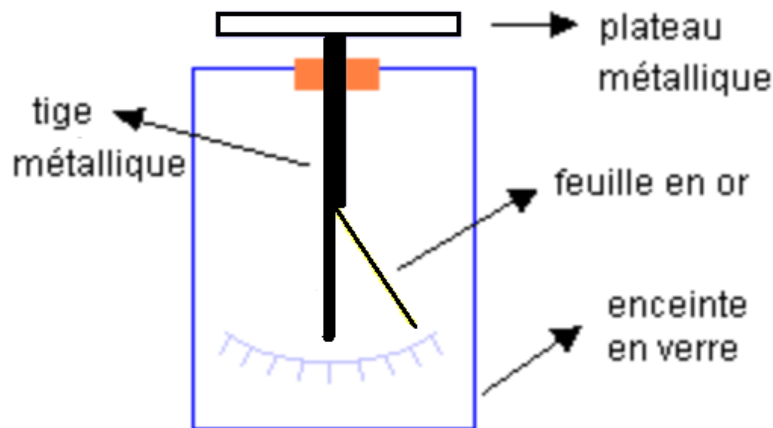
2) Théorie PARTICULAIRE de la lumière

a/ 1^{ère} approche : l'effet photoélectrique

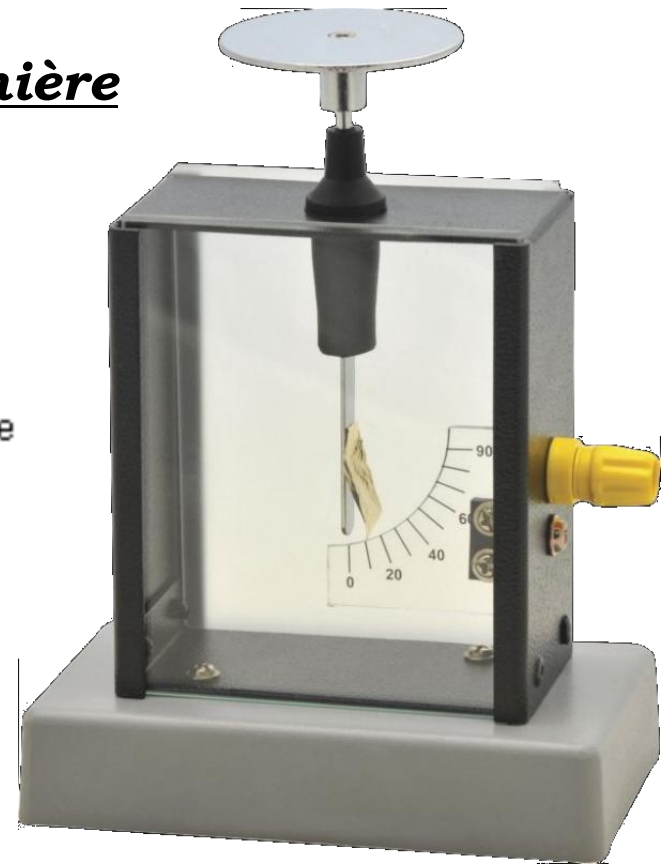


Heinrich HERTZ
(1857 ; 1894)

L'électroscope

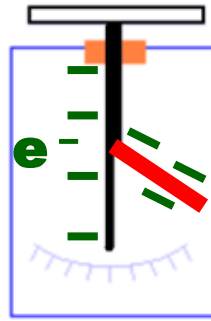


<https://youtu.be/HkCrkdtK7GQ>



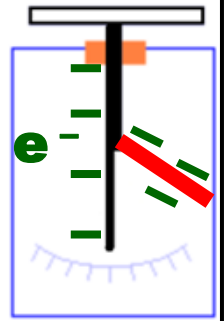
➡ Etape ① : une plaque de zinc est fixée sur le plateau de l'électroscope puis mise en contact avec un bâton d'ébonite préalablement chargé négativement par frottement.

La feuille d'or demeure **écartée** car des **électrons** sont présents sur la tige et sur la feuille d'or qui vont donc se **repousser**



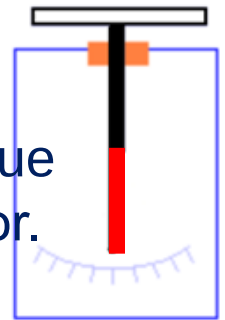
➡ Etape ② : on éclaire la plaque de zinc précédente par de la *lumière blanche*.

La feuille d'or demeure **écartée** quelle que soit la durée d'éclairement et quelle que soit l'intensité de la lumière : cela prouve que les électrons sont **toujours présents** sur la tige et sur la feuille d'or.



➡ Etape ③ : on éclaire la plaque de zinc précédente par un *rayonnement UV*.

La feuille d'or **revient se coller** à la tige verticale : cela prouve que les électrons ne sont plus **présents** sur la tige ni sur la feuille d'or. Le rayonnement UV a permis **d'extraire** les électrons du métal

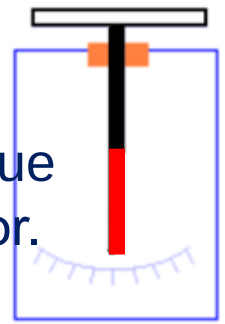


☛ Qu'est ce que l'EFFET PHOTOELECTRIQUE ? C'est l'**émission d'électrons par un métal** soumis à un rayonnement électromagnétique.

Ce rayonnement **apporte l'énergie nécessaire pour arracher les électrons** aux atomes de métal.

➔ Etape ③ : on éclaire la plaque de zinc précédente par un rayonnement UV.

La feuille d'or **revient se coller** à la tige verticale : cela prouve que les électrons ne sont plus **présents** sur la tige ni sur la feuille d'or. Le rayonnement UV a permis **d'extraire** les électrons du métal



☛ Qu'est ce que l'EFFET PHOTOELECTRIQUE ? C'est l'**émission d'électrons par un métal** soumis à un rayonnement électromagnétique

Ce rayonnement **apporte l'énergie nécessaire pour arracher les électrons** aux atomes de métal.



Pourquoi la théorie ONDULATOIRE ne permet-elle pas d'expliquer cette expérience ?

Rappel : Définition d'une onde
Phénomène de propagation d'une perturbation sans transport de matière mais avec **transport d'énergie**

N'importe quelle onde électromagnétique devrait permettre aux électrons d'accumuler progressivement assez d'énergie pour être arrachés, **ce qui n'est pas le cas !**

Pourquoi la théorie
ONDULATOIRE ne permet-
elle pas d'expliquer cette
expérience ?

N'importe quelle onde électroma-
gnétique devrait permettre aux é-
lectrons d'accumuler progressive-
ment assez d'énergie pour être ar-
rachés, ce qui n'est pas le cas !

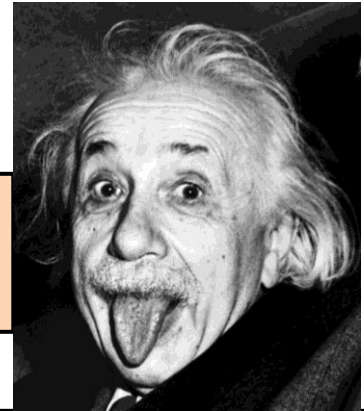
b/ Interprétation : le modèle du photon

Modèle particulaire

+

Quantification des énergies

Albert EINSTEIN
(1879 ; 1955)



☛ Le modèle du PHOTON :

Un rayonnement lumineux de **fréquence** ν est un ensemble de PHOTONS :

- particules de **MASSE nulle** et de **CHARGE nulle**
- se déplaçant *dans le vide* à la célérité $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- transportant chacun une énergie

(en Joule)

$$E_{\text{photon}} = h \times \nu$$

Constante de Planck
($6,62.10^{-34} \text{ J.s}$)

(en Hertz)

(relation de
Planck-Einstein)

- particules de **MASSE nulle** et de **CHARGE nulle**
- se déplaçant **dans le vide** à la célérité $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- transportant chacun une énergie $E_{\text{photon}} = h \times \nu$
 - (en Joule) — h : Constante de Planck ($6,62.10^{-34} \text{ J.s}$)
 - ν : (relation de Planck-Einstein) (en Hertz)

➡ Retour sur l'effet photoélectrique :

TRAVAIL d'EXTRACTION W_e = Energie minimale nécessaire pour arracher un électron à la surface d'un métal

- Si $E_{\text{photon}} < W_e$: on n'observe pas d'effet photoélectrique
- Si $E_{\text{photon}} \geq W_e$: on observe l'effet photoélectrique

$$E_{\text{photon}} = W_e + E_C \quad (\text{en Joule})$$

CONSEQUENCE : le photon doit avoir une **fréquence MINIMALE** (= **fréquence SEUIL**) ou une **longueur d'onde MAXIMALE** (= **longueur d'onde SEUIL**)

✂ - Pour le zinc, $W_e = 4,31 \text{ eV}$. En déduire la longueur d'onde seuil λ_{seuil} du zinc.

Si le photon apporte juste l'énergie nécessaire pour arracher l'e⁻, alors $E_C = 0$:

$$E_{\text{photon}} = W_e \leftrightarrow h \times \nu_{\text{seuil}} = W_e \leftrightarrow h \times \frac{c}{\lambda_{\text{seuil}}} = W_e \leftrightarrow \lambda_{\text{seuil}} = \frac{h \times c}{W_e}$$

☞ - Pour le zinc, $W_e = 4,31 \text{ eV}$. En déduire la longueur d'onde seuil λ_{seuil} du zinc.

Si le photon apporte juste l'énergie nécessaire pour arracher l' e^- , alors $E_c = 0$:

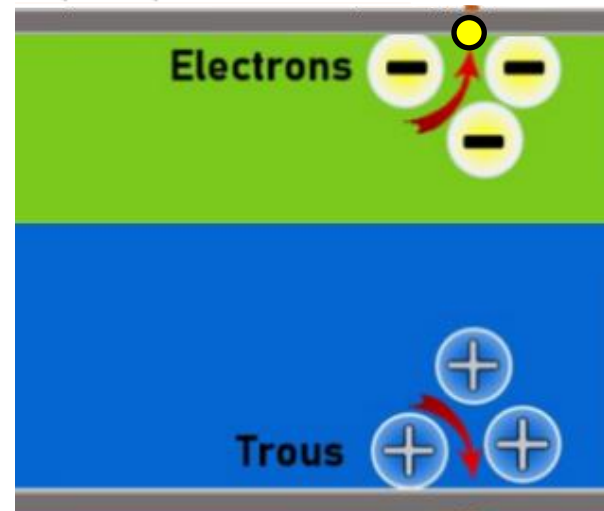
$$E_{\text{photon}} = W_e \leftrightarrow h \times \nu_{\text{seuil}} = W_e \leftrightarrow h \times \frac{c}{\lambda_{\text{seuil}}} = W_e \leftrightarrow \lambda_{\text{seuil}} = \frac{h \times c}{W_e}$$

$$\underline{AN} \rightarrow \lambda_{\text{seuil}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3,00 \cdot 10^8}{4,31 \times 1,60 \cdot 10^{-19}} \quad \text{soit } \lambda_{\text{seuil}} = 2,89 \cdot 10^{-7} \text{ m} = \underline{289 \text{ nm}}$$

L'effet photoélectrique n'est observé que si $\lambda_{\text{photon}} \leq 289 \text{ nm}$, justifiant l'utilisation de la **lumière UV**.

c/ Autres interactions lumière - matière

Lumière



LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

La PHOTOIONISATION de l'atmosphère

L'ionosphère d'une planète est une couche de son atmosphère caractérisée par une ionisation partielle des gaz : dans le cas de la Terre, elle se situe entre environ 60 et 1000 km d'altitude. C'est le rayonnement ultraviolet solaire qui est à l'origine des ions présents dans l'ionosphère ; **les molécules comme le dioxygène, le diazote ou le monoxyde d'azote absorbent l'énergie des photons dont l'énergie est supérieure à leur énergie d'ionisation. Ces molécules sont alors amputées d'un électron et se transforment en ions**, cette ionisation ne concernant qu'une molécule sur 1000 de l'ionosphère : on trouve ainsi une centaine d'ions et autant d'électrons qui coexistent dans chaque cm^3 de cette couche de l'atmosphère.

✂- Donner la formule des molécules subissant la photoionisation dans le texte ci-dessus ainsi que celle des composés obtenus après photoionisation.

O_2 devient **O_2^+** ; **N_2** devient **N_2^+** ; **NO** devient **NO^+** ...

II- Description géométrique de la propagation d'une onde lumineuse

Milieu
TRANSPARENT

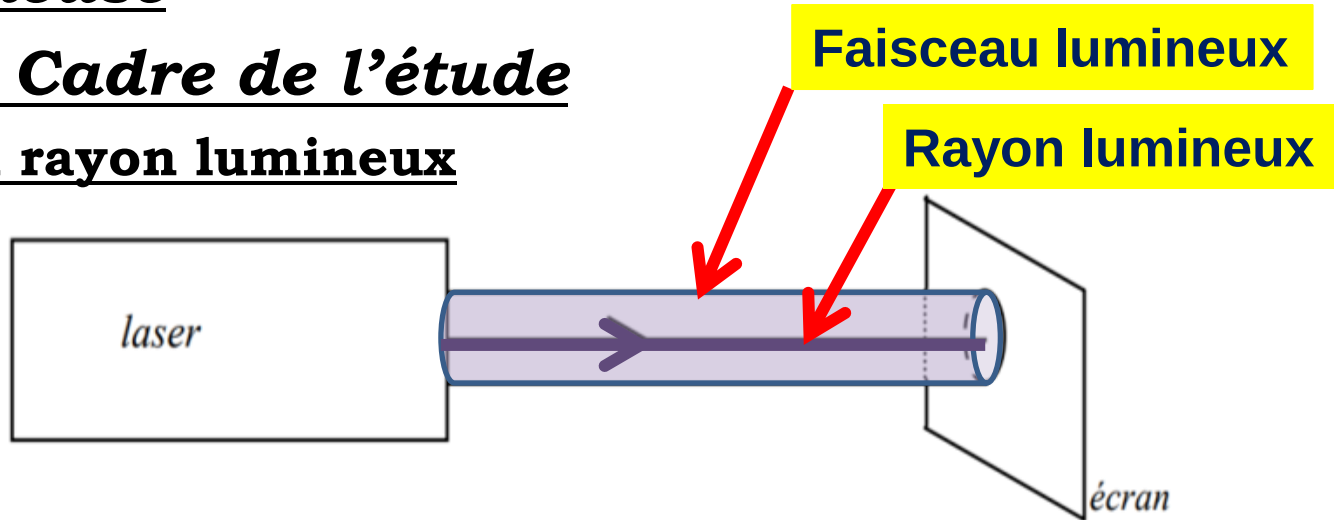
Milieu
HOMOGENE

Milieu
ISOTROPE

II- Description géométrique de la propagation d'une onde lumineuse

1) Cadre de l'étude

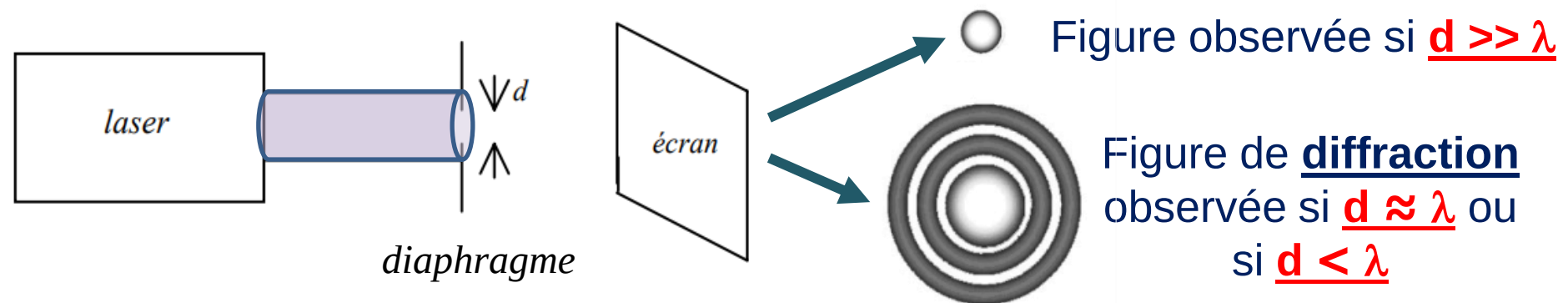
a/ Modèle du rayon lumineux



☛ Quelle différence y a-t-il entre un RAYON lumineux et un FAISCEAU lumineux ?

Un **RAYON LUMINEUX** est l'**idéalisation d'un faisceau lumineux dont le diamètre tendrait vers zéro**. On le représente par une ligne qui suit le trajet de la lumière et qui est orientée dans le sens de propagation de celle-ci.

Problème qui se pose si on souhaite isoler un rayon lumineux



1) Cadre de l'étude

a/ Modèle du rayon lumineux

☛ Quelle différence y a-t-il entre un RAYON lumineux et un FAISCEAU lumineux ?

Un **RAYON LUMINEUX** est **l'idéalisation d'un faisceau lumineux dont le diamètre tendrait vers zéro**. On le représente par une ligne qui suit le trajet de la lumière et qui est orientée dans le sens de propagation de celle-ci.

Approximation de l'optique géométrique : on néglige le caractère ondulatoire de la lumière



☛ Domaine de validité de l'approximation : Elle n'est valable que si **les dimensions du problème** (taille d'une fente, d'un obstacle ...) sont **très grandes** devant **la longueur d'onde λ** de la lumière utilisée.

☛ Propriétés des rayons lumineux dans l'Approximation de l'optique géométrique :

- Les rayons lumineux sont **indépendants les uns des autres** ;
- Principe de Fermat : pour aller d'un point A à un point B, **la lumière emprunte le chemin correspondant à la durée minimale**.

a/ Modèle du rayon lumineux

Approximation de l'optique géométrique : on néglige le caractère ondulatoire de la lumière



☛ Domaine de validité de l'approximation : Elle n'est valable que si **les dimensions du problème** (taille d'une fente, d'un obstacle ...) sont **très grandes**.. devant **la longueur d'onde λ** de la lumière utilisée.

☛ Propriétés des rayons lumineux dans l'Approximation de l'optique géométrique :

- Les rayons lumineux sont **indépendants les uns des autres** ;
- Principe de Fermat : pour aller d'un point A à un point B, **la lumière emprunte le chemin correspondant à la durée minimale**.
- Principe de retour inverse de la lumière : **la trajectoire** suivie par la lumière pour aller d'un point A à un point B **est la même** que celle pour aller du point B au point A

✂- Quelle est la forme de la trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu transparent, homogène et isotrope ? La lumière se propage de façon **rectiligne**, en accord avec le principe de Fermat.

☛ Propriétés des rayons lumineux dans l'approximation de l'optique géométrique :

- Les rayons lumineux sont **indépendants les uns des autres** ;
- Principe de Fermat : pour aller d'un point A à un point B, **la lumière emprunte le chemin correspondant à la durée minimale**.
- Principe de retour inverse de la lumière : **la trajectoire** suivie par la lumière pour aller d'un point A à un point B **est la même** que celle pour aller du point B au point A

✂- Quelle est la forme de la trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu transparent, homogène et isotrope ? La lumière se propage de façon **rectiligne**, en accord avec le principe de Fermat.

b/ L'indice optique (ou indice de réfraction)

La célérité d'une onde lumineuse :

- **peut dépendre de sa fréquence** : milieu DISPERSIF ;
- **est généralement différente dans deux milieux différents**.

☛ Indice optique d'un milieu pour une radiation monochromatique :

Noté par la lettre « **n** », c'est le rapport de la célérité **c** de la lumière dans le vide par la célérité **v** de la lumière dans le milieu.

$$n_{(\emptyset)} = \frac{c(m.s^{-1})}{v(m.s^{-1})}$$

b/ L'indice optique (ou indice de réfraction)

La célérité d'une onde lumineuse :

- *peut dépendre de sa fréquence* : milieu DISPERSIF ;
- *est généralement différente dans deux milieux différents.*

☛ Indice optique d'un milieu pour une radiation monochromatique :

Noté par la lettre « **n** », c'est le rapport de la célérité **c** de la lumière dans le vide par la célérité **v** de la lumière dans le milieu.

$$n = \frac{c(\text{m.s}^{-1})}{v(\text{m.s}^{-1})}$$



- L'indice optique d'un milieu est **toujours supérieur ou égal à 1** :
 $n(\text{air sec}) = 1,0003$; $n(\text{eau liquide}) = 1,33$; $n(\text{verre}) = 1,5 \dots$
- Un milieu 1 est dit **plus réfringent** qu'un milieu 2 si $n_1 > n_2$.

✂ - La fréquence ν d'une onde ne dépend pas du milieu de propagation, exprimer la longueur d'onde λ d'une onde lumineuse dans un milieu d'indice **n** en fonction de sa longueur d'onde dans le vide λ_0 .

La fréquence ν de la lumière est la même dans le vide et dans le milieu d'indice n

Dans le vide : $\nu = \frac{c}{\lambda_0}$

Dans le milieu d'indice n : $\nu = \frac{v}{\lambda}$

☛ Indice optique d'un milieu pour une radiation monochromatique :

Noté par la lettre « **n** », c'est le rapport de la célérité **c** de la lumière dans le vide par la célérité **v** de la lumière dans le milieu.

$$n = \frac{c(\text{m.s}^{-1})}{v(\text{m.s}^{-1})}$$



- L'indice optique d'un milieu est **toujours supérieur ou égal à 1** :
 $n(\text{air sec}) = 1,0003$; $n(\text{eau liquide}) = 1,33$; $n(\text{verre}) = 1,5 \dots$
- Un milieu 1 est dit **plus réfringent** qu'un milieu 2 si $n_1 > n_2$.

☛ La fréquence ν d'une onde ne dépend pas du milieu de propagation, exprimer la longueur d'onde λ d'une onde lumineuse dans un milieu d'indice **n** en fonction de sa longueur d'onde dans le vide λ_0 .

La fréquence ν de la lumière est la même dans le vide et dans le milieu d'indice n

Dans le vide : $\nu = \frac{c}{\lambda_0}$

Dans le milieu d'indice n : $\nu = \frac{v}{\lambda}$

On en déduit donc que : $\frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \lambda_0 \times \frac{v}{c} \Leftrightarrow \boxed{\lambda = \frac{\lambda_0}{n}}$

Dans le vide : $v = \frac{c}{\lambda_0}$

Dans le milieu d'indice n : $v = \frac{v}{\lambda}$

On en déduit donc que : $\frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \lambda_0 \times \frac{v}{c} \Leftrightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

2) Lois de Snell-Descartes

L'angle d'incidence i_1

Milieu 1

Le rayon incident

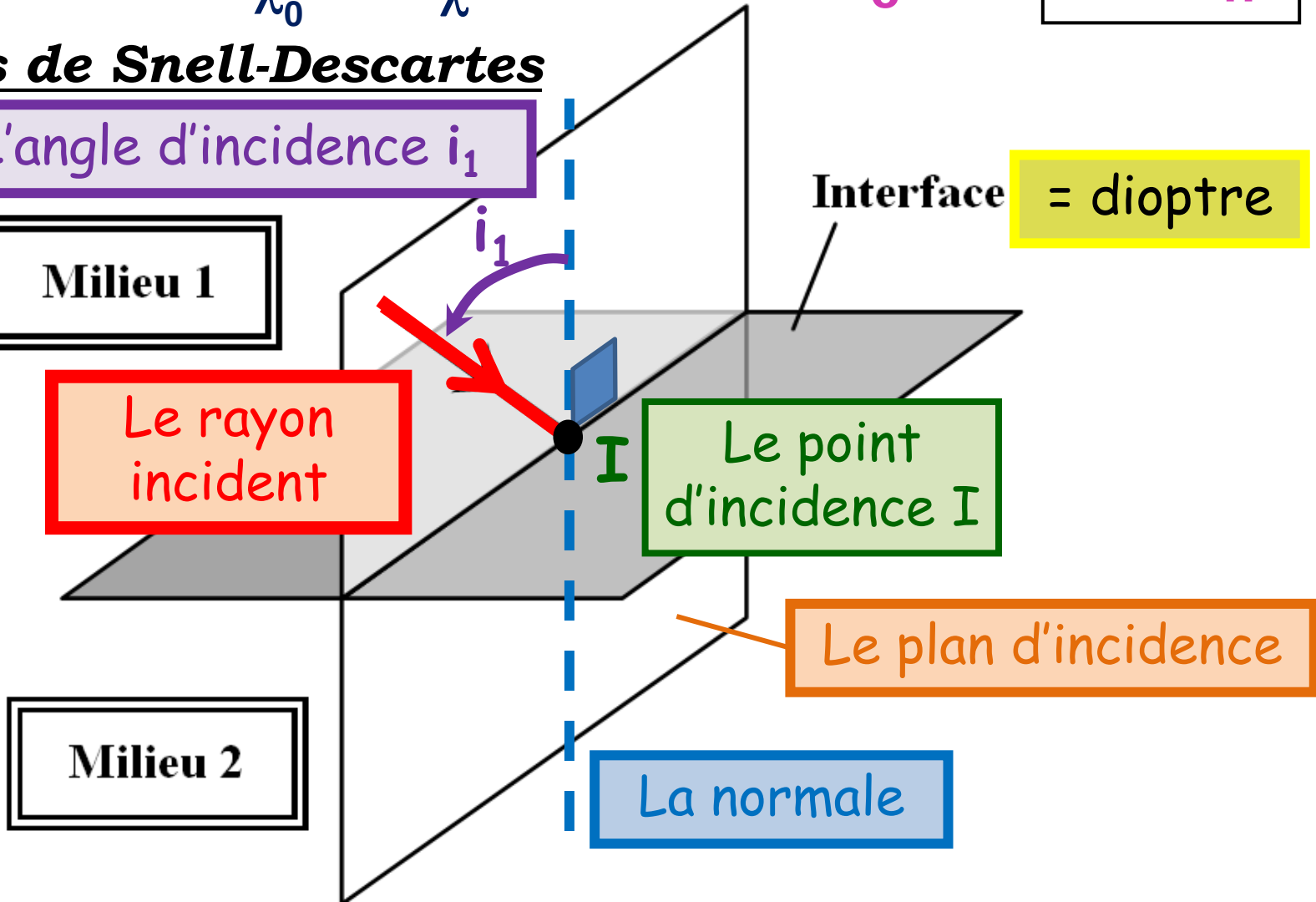
Le point d'incidence I

Interface = dioptre

Le plan d'incidence

Milieu 2

La normale



2) Lois de Snell-Descartes

a/ Réflexion de la lumière

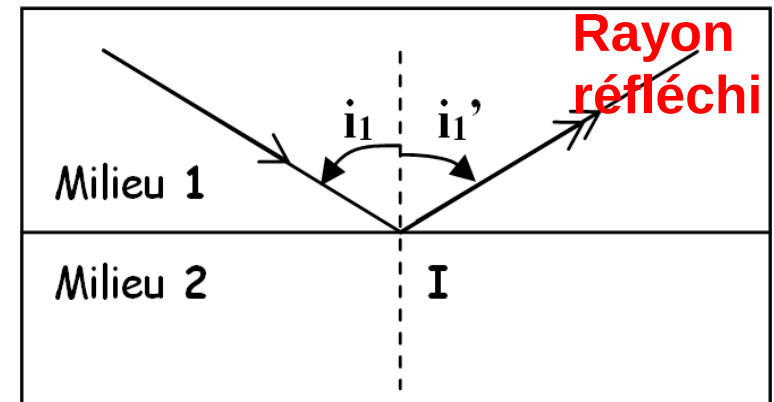
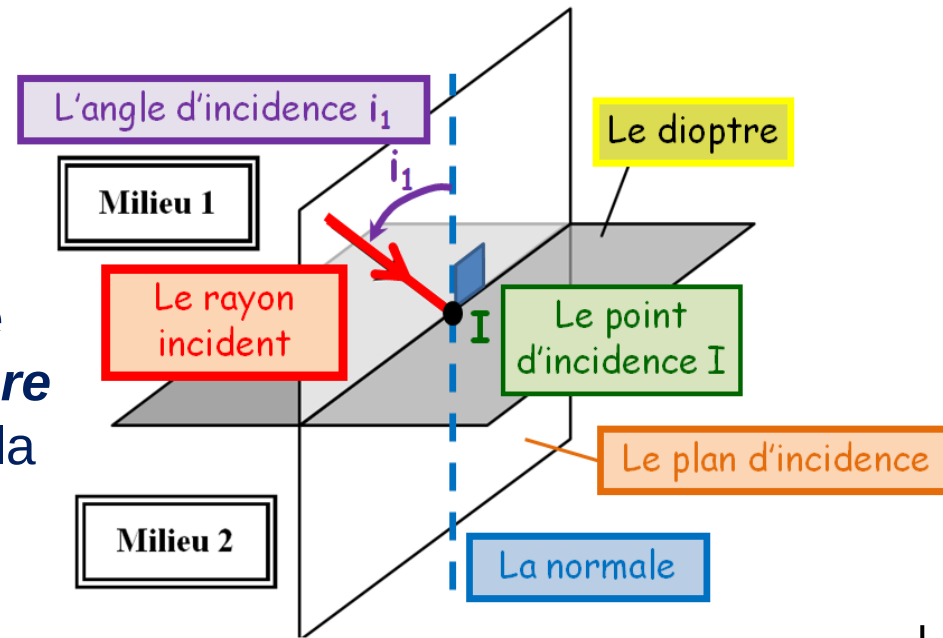
☛ Définition :

Le phénomène de **REFLEXION** est le phénomène au cours duquel *la lumière change brutalement de direction* à la rencontre du dioptre, *tout en restant dans le même milieu*.

☛ Lois de Snell-Descartes sur la réflexion :

- Le rayon réfléchi appartient **au plan d'incidence**.
- L'angle de réflexion i_1' (orienté entre la normale et le rayon réfléchi) est égal à **l'opposé** de l'angle d'incidence i_1 (orienté entre la normale et le rayon incident)

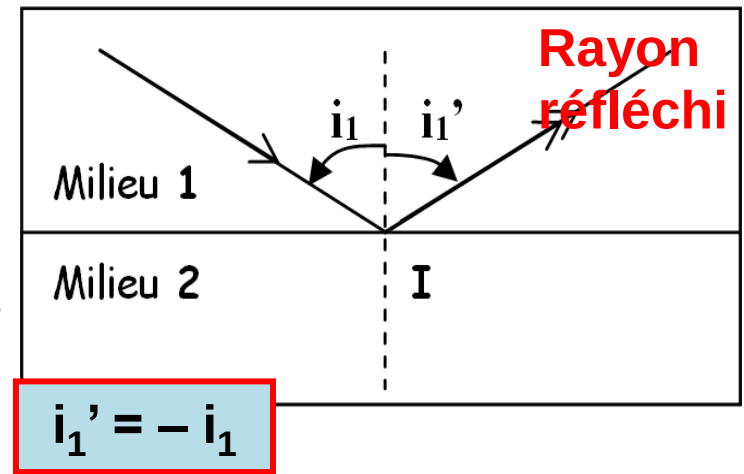
$$i_1' = -i_1$$



Simplification avec des angles NON ORIENTES (tous positifs) : $i_1' = i_1$.

☛ Lois de Snell-Descartes sur la réflexion :

- Le rayon réfléchi appartient **au plan d'incidence**.
- L'angle de réflexion i_1' (orienté entre la normale et le rayon réfléchi) est égal à **l'opposé** de l'angle d'incidence i_1 (orienté entre la normale et le rayon incident)



b/ Réfraction de la lumière

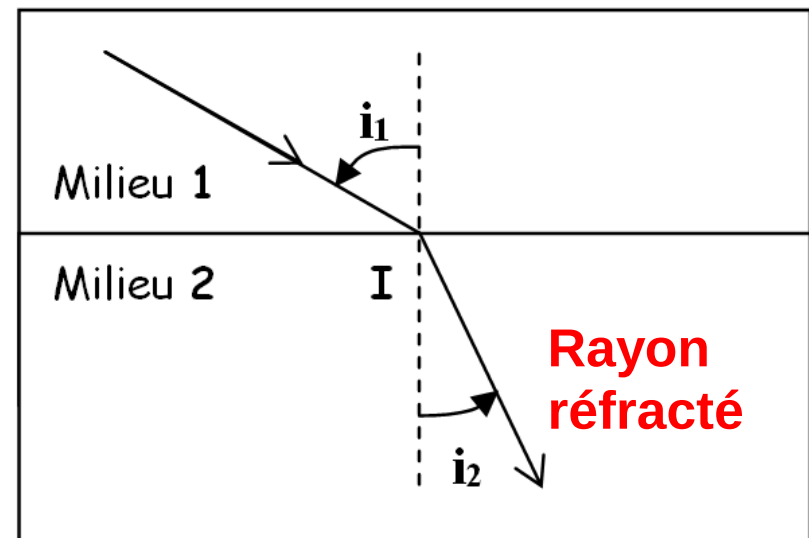
☛ Définition :

Le phénomène de REFRACTION est le phénomène au cours duquel *la lumière change brutalement de direction à la rencontre du dioptre, lorsqu'elle change de milieu.*

☛ Lois de Snell-Descartes sur la réfraction :

- Le rayon réfracté appartient **au plan d'incidence**.
- L'angle de réfraction i_2 (orienté entre la normale et le rayon réfracté) est relié à l'angle d'incidence i_1 par la relation :

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

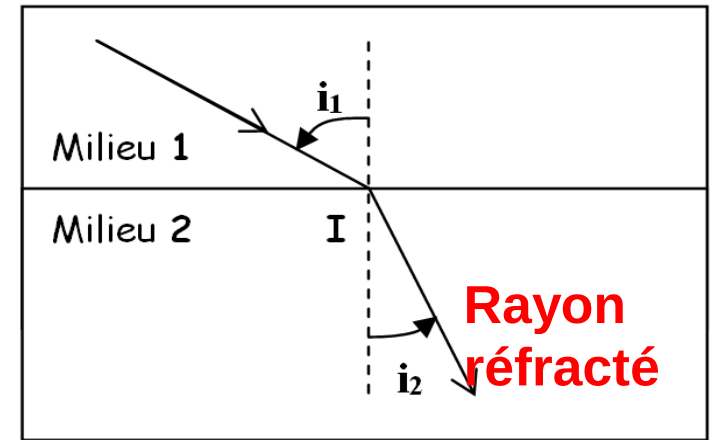


b/ Réfraction de la lumière

☛ Lois de Snell-Descartes sur la réfraction :

- Le rayon réfracté appartient **au plan d'incidence**.
- L'angle de réfraction i_2 (orienté entre la normale et le rayon réfracté) est relié à l'angle d'incidence i_1 par la relation :

$$\boxed{n_1 \times \sin i_1 = n_2 \times \sin i_2} \quad (n_1 \text{ et } n_2 = \text{indices optiques des milieux 1 et 2})$$



☞ - Que vaut l'angle de réfraction pour un rayon incident perpendiculaire au dioptre ?

$$\text{On a : } i_1 = 0^\circ \Leftrightarrow n_1 \times \sin 0 = 0 \Leftrightarrow n_2 \times \sin i_2 = 0 \Leftrightarrow \sin i_2 = 0$$

$i_2 = 0^\circ$ (le rayon traverse le dioptre sans être dévié)

Milieu 1

Milieu 2

☞ - Sur les figures illustrant la définition, quel milieu est le plus réfringent ?

Figure de gauche : $n_1 \times \sin i_1 = n_2 \times \sin i_2 \Leftrightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin i_2}{\sin i_1} < 1$ car $i_2 < i_1$

On a donc : $n_1 < n_2 \Rightarrow$ Milieu 2 le plus réfringent

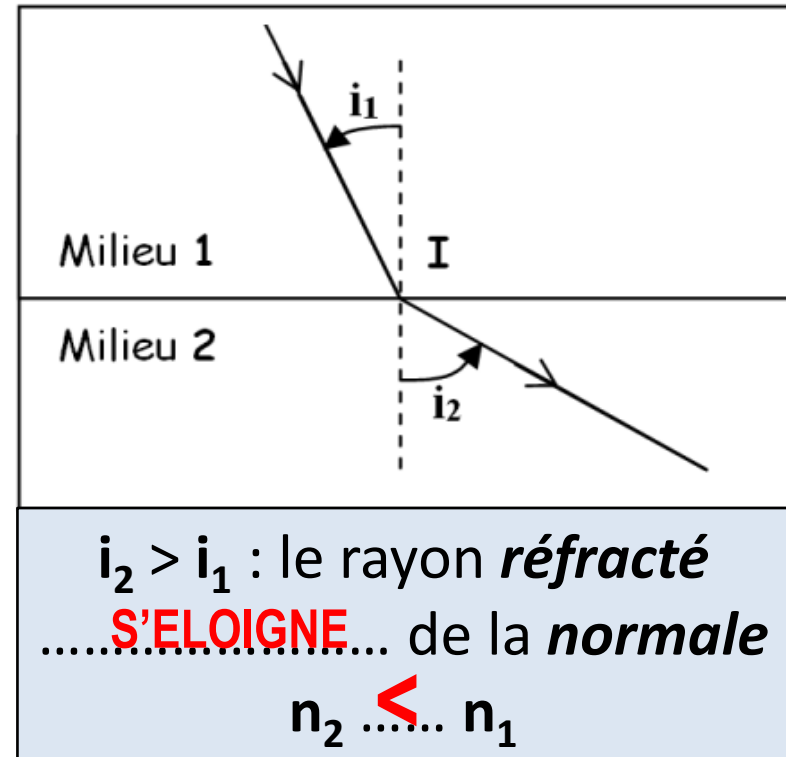
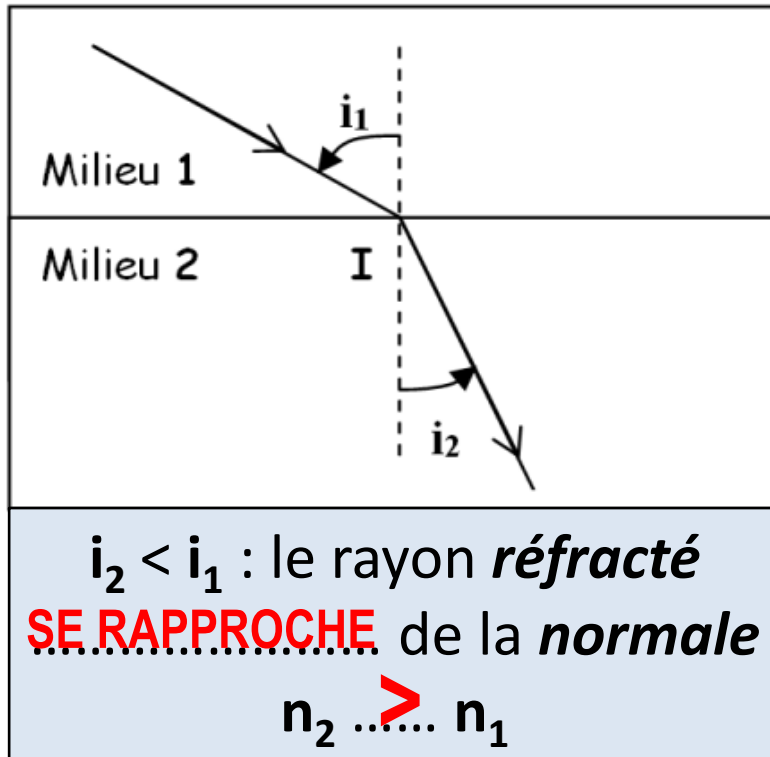
🦋 - Que vaut l'angle de réfraction pour un rayon incident perpendiculaire au dioptre ?

On a : $i_1 = 0^\circ \Leftrightarrow n_1 \times \sin 0 = 0 \Leftrightarrow n_2 \times \sin i_2 = 0 \Leftrightarrow \sin i_2 = 0$

$i_2 = 0^\circ$ (le rayon traverse le dioptre sans être dévié)

Milieu 1

Milieu 2



🦋 - Sur les figures illustrant la définition, quel milieu est le plus réfringent ?

Figure de gauche : $n_1 \times \sin i_1 = n_2 \times \sin i_2 \Leftrightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin i_2}{\sin i_1} < 1$ car $i_2 < i_1$

On a donc : $n_1 < n_2 \Rightarrow$ Milieu 2 le plus réfringent

Figure de droite : **le contraire !**

🔍 - Sur les figures illustrant la définition, quel milieu est le plus réfringent ?

$i_2 < i_1$: le rayon **réfracté**
SE RAPPROCHE de la **normale**
 $n_2 > n_1$

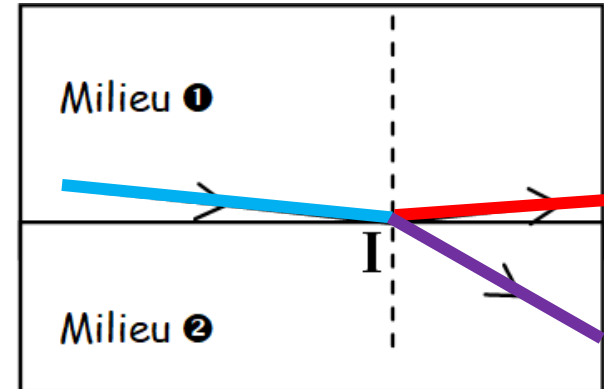
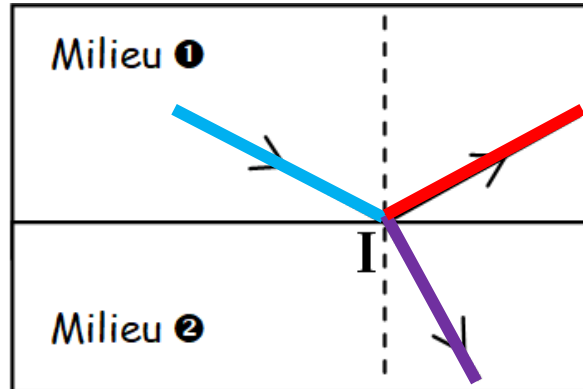
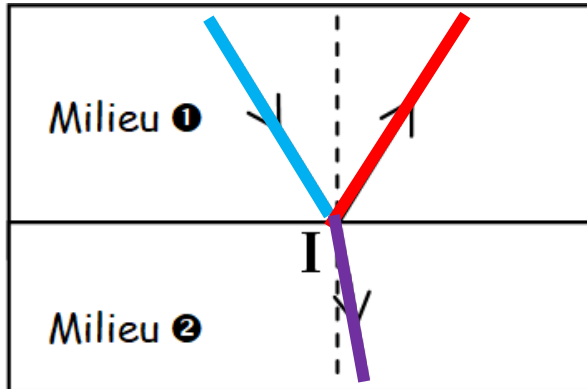
$i_2 > i_1$: le rayon **réfracté**
S'ELOIGNE de la **normale**
 $n_2 < n_1$

Figure de gauche : $n_1 \times \sin i_1 = n_2 \times \sin i_2 \Leftrightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin i_2}{\sin i_1} < 1$ car $i_2 < i_1$

On a donc : $n_1 < n_2 \Rightarrow$ Milieu 2 le plus réfringent

Figure de droite : **le contraire !**

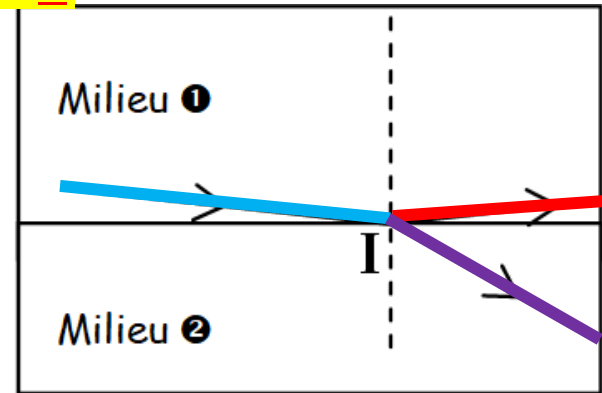
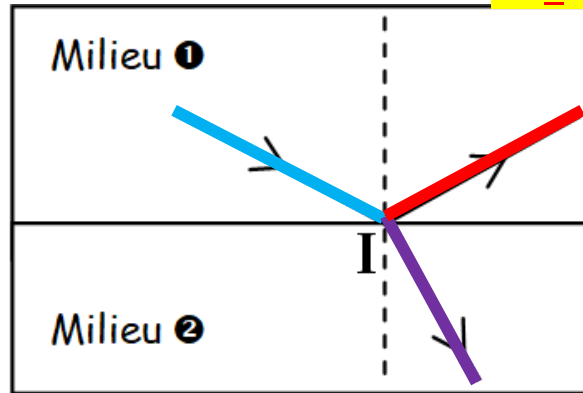
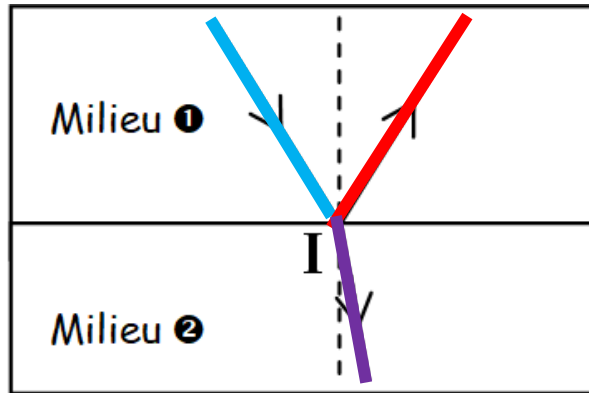
🔑 Quel(s) phénomène(s) observe-t-on quand $n_2 > n_1$?



Le **rayon incident** subit toujours les deux phénomènes :

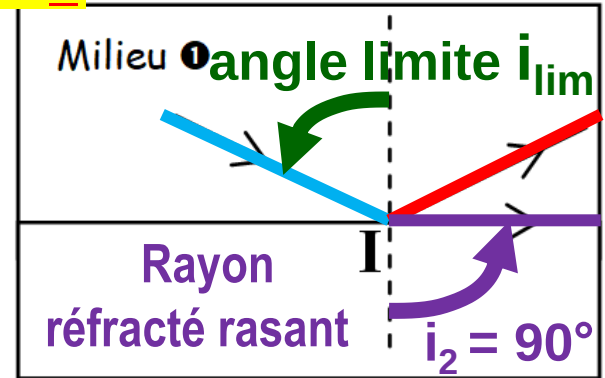
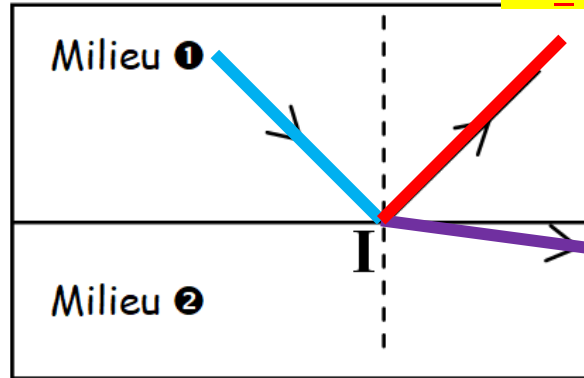
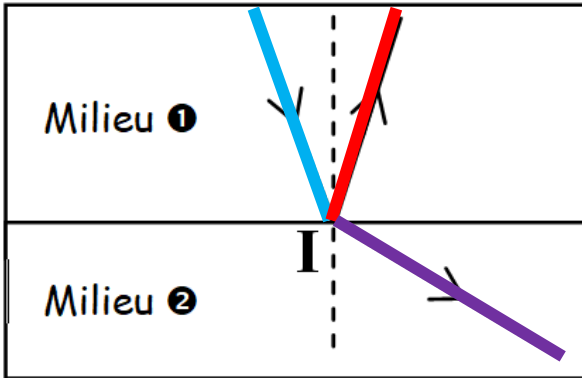
REFLEXION et **REFRACTION**

☛ Quel(s) phénomène(s) observe-t-on quand $n_2 > n_1$?



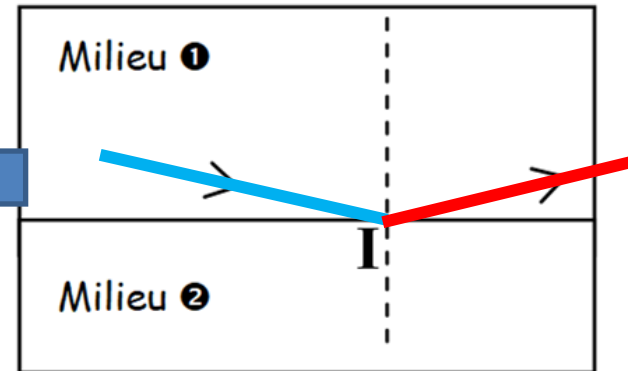
Le **rayon incident** subit toujours les deux phénomènes : **REFLEXION** et **REFRACTION**

☛ Quel(s) phénomène(s) observe-t-on quand $n_2 < n_1$?

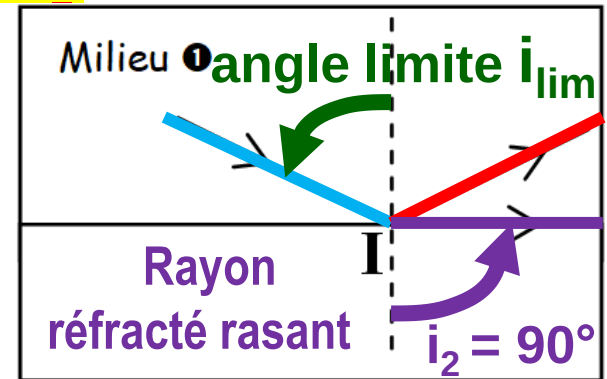
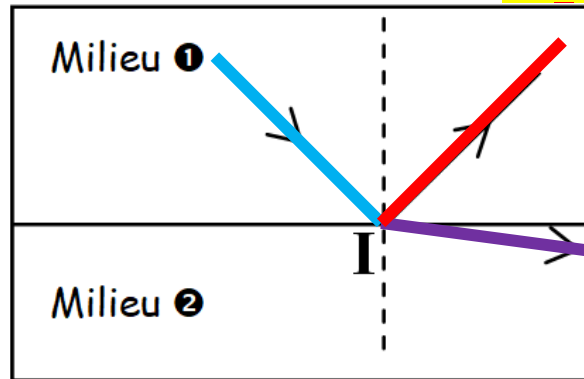
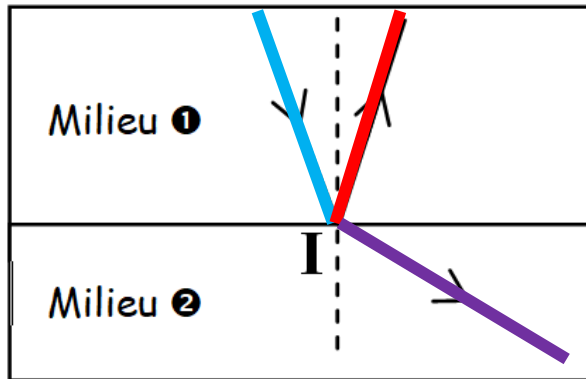


4^{ème} Figure : le **rayon incident** ne subit que le phénomène de **REFLEXION**. On parle de **REFLEXION TOTALE**. C'est le cas si :

- le rayon réfracté évolue dans un **milieu moins réfringent** que le rayon incident ($n_2 < n_1$) ;



☛ Quel(s) phénomène(s) observe-t-on quand $n_2 < n_1$?



4^{ème} Figure : le **rayon incident** ne subit que le phénomène de **REFLEXION**. On parle de **REFLEXION TOTALE**. C'est le cas si :

- le rayon réfracté évolue dans un *milieu moins réfringent* que le rayon incident ($n_2 < n_1$) ;

- l'angle d'incidence dépasse une valeur limite (appelée « **angle limite i_{lim}** ») pour laquelle l'angle réfracté vaut $i_2 = 90^\circ$ (**3^{ème} Figure**)

$$n_1 \times \sin(i_{lim}) = n_2 \times \underbrace{\sin(90^\circ)}_1 \Leftrightarrow \sin(i_{lim}) = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Leftrightarrow i_{lim} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

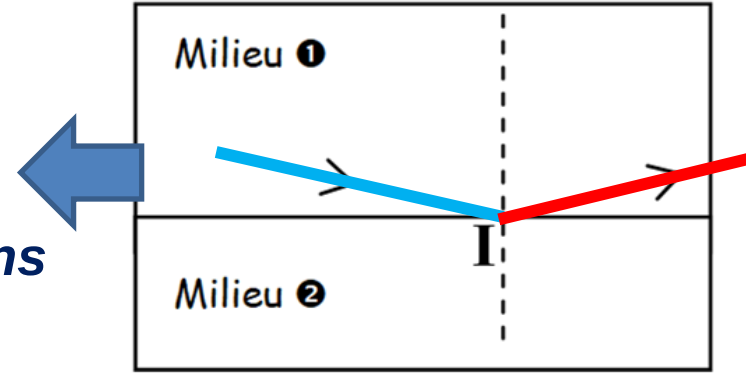
4^{ème} Figure : le **rayon incident** ne subit que le phénomène de **REFLEXION**. On parle de **REFLEXION TOTALE**. C'est le cas si :

- le rayon réfracté évolue dans un *milieu moins réfringent* que le rayon incident ($n_2 < n_1$) ;

- l'angle d'incidence dépasse une valeur limite (appelée « **angle limite i_{lim}** ») pour laquelle l'angle réfracté vaut $i_2 = 90^\circ$ (**3^{ème} Figure**)

$$n_1 \times \sin(i_{lim}) = n_2 \times \underbrace{\sin(90^\circ)}_1 \Leftrightarrow \sin(i_{lim}) = \frac{n_2}{n_1}$$

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



✂ - Application numérique : $n(\text{air}) = 1,00$; $n(\text{eau}) = 1,33$. Que vaut i_{lim} ?

Eau = milieu 1 et Air = milieu 2 pour que $n_2 < n_1$

$$\text{A.N. : } i_{lim} = \arcsin\left(\frac{1,00}{1,33}\right)$$

$$\text{Soit } \underline{i_{lim} = 49^\circ}$$



Le phénomène de réflexion totale est exploité dans la fibre optique.

✂ - Application numérique : $n(\text{eau}) = 1,33$; $n(\text{air}) = 1,0$. Que vaut i_{lim} ?

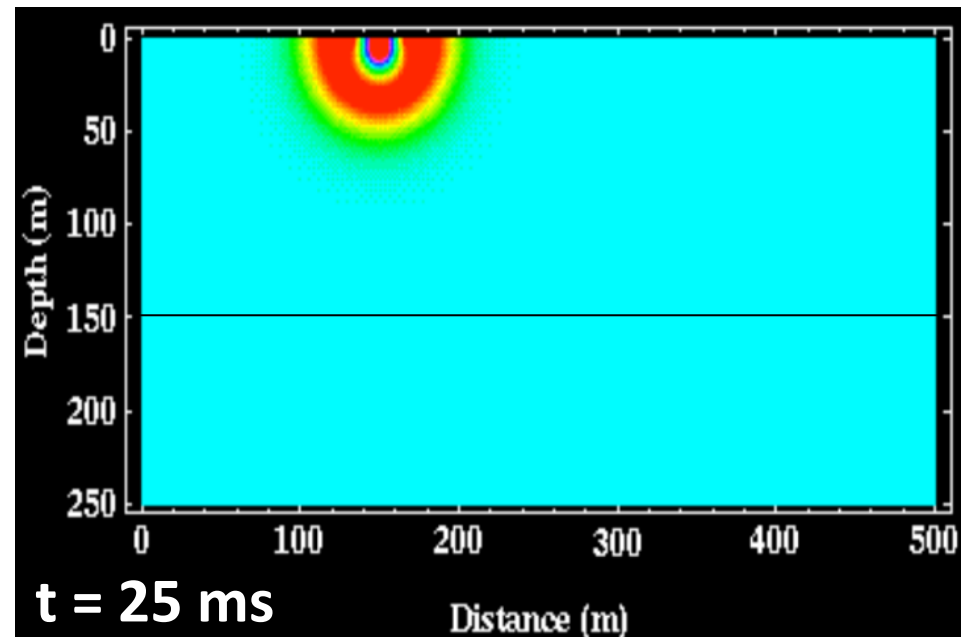
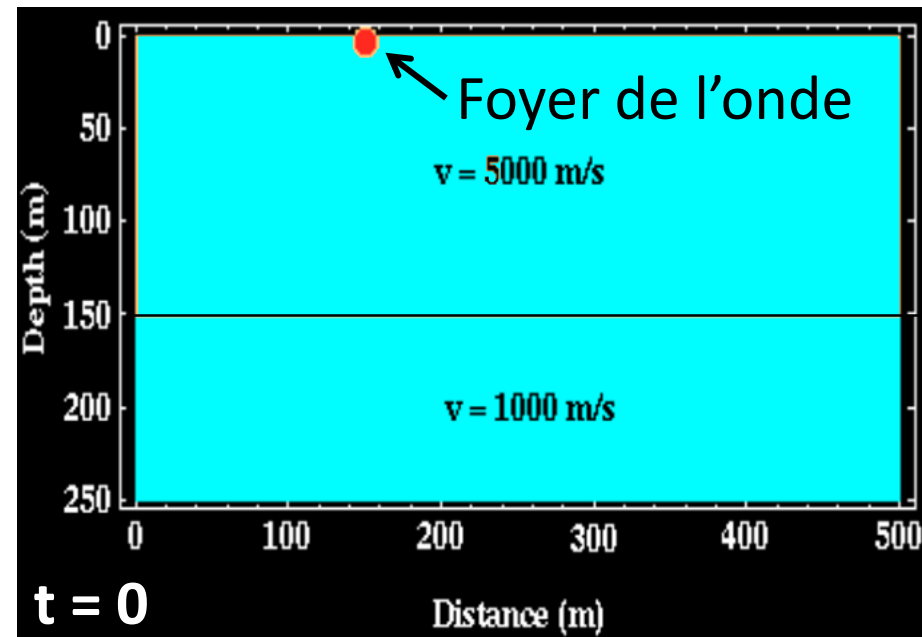
Eau = milieu 1 et Air = milieu 2 pour que $n_2 < n_1$

$$\text{A.N. : } i_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{1,00}{1,33}\right) \quad \text{Soit } \underline{i_{\text{lim}} = 49^\circ}$$

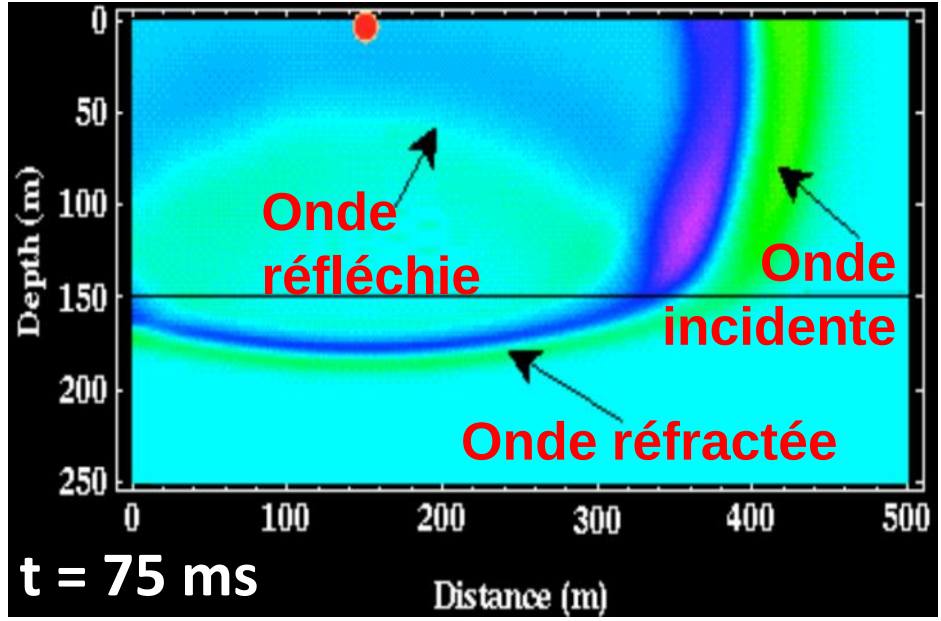
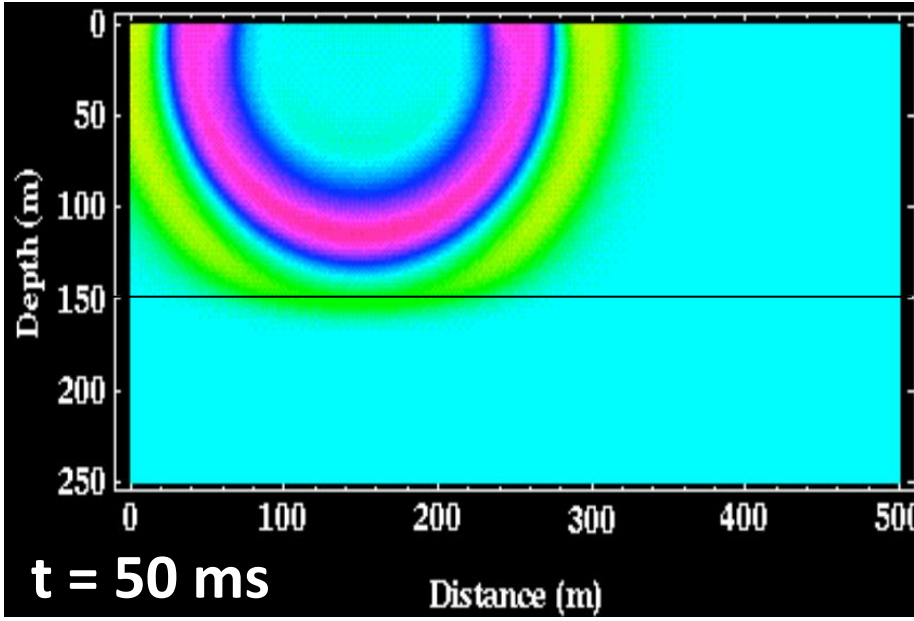
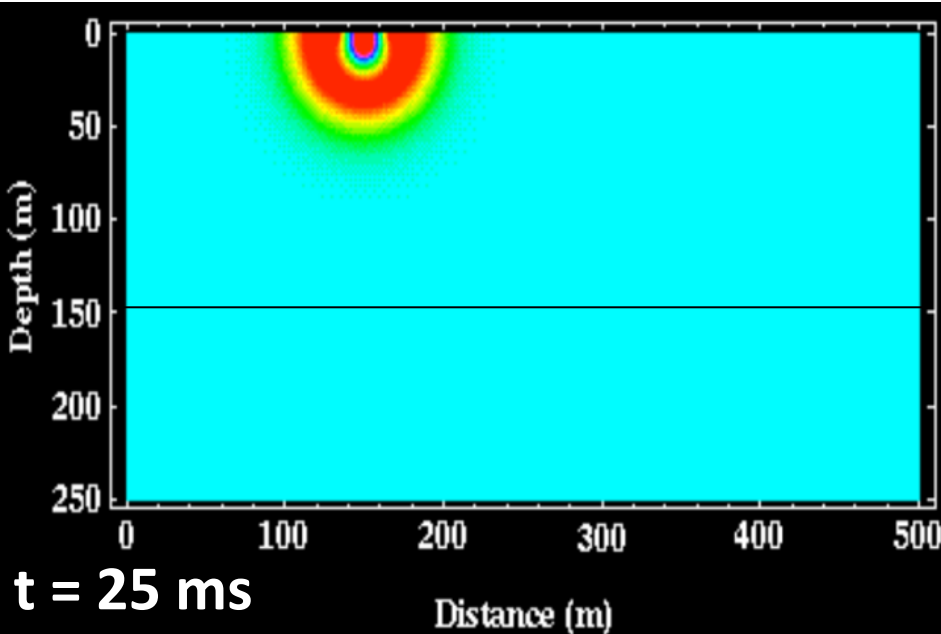
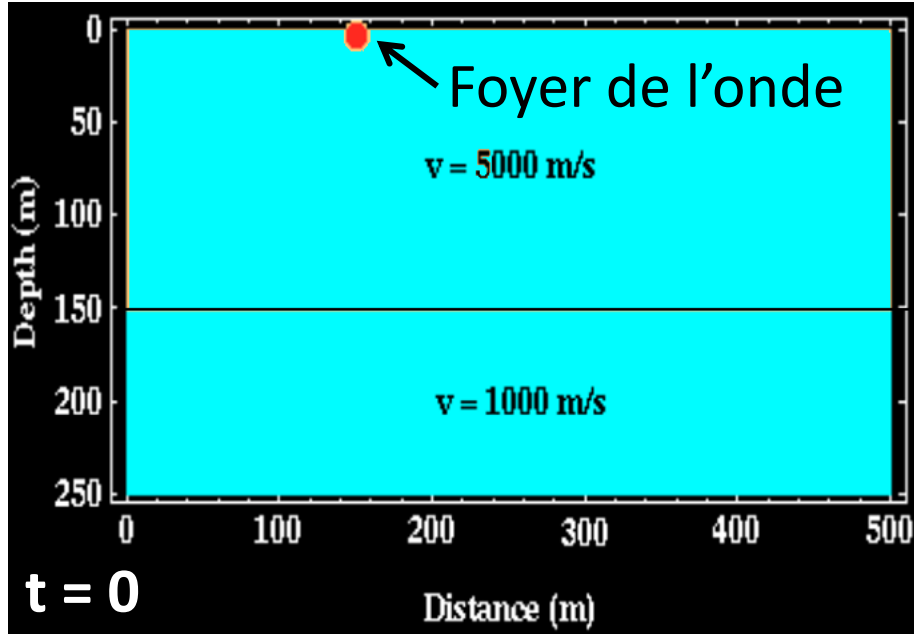
c/ Généralisation des lois de Snell-Descartes aux ondes sismiques de volume

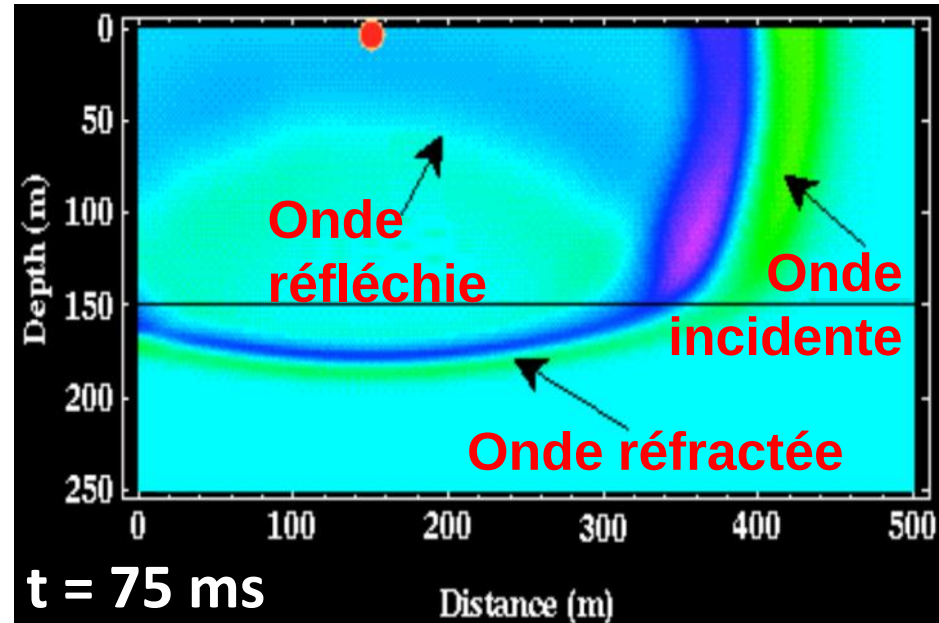
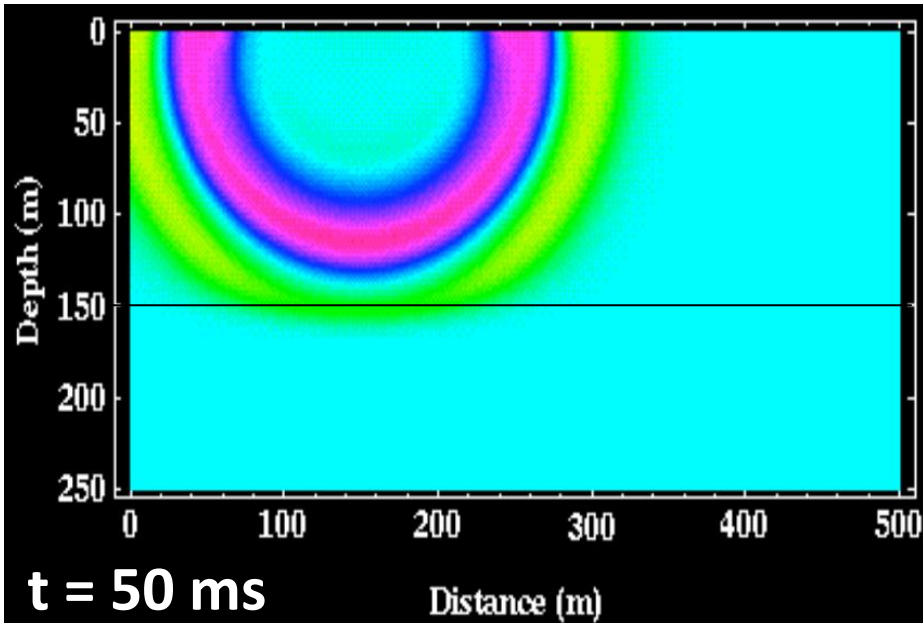
Une onde sismique qui évolue dans un premier milieu puis dans un second milieu **se comporte comme un rayon lumineux** :

- ▶ Phénomène de REFLEXION et de REFRACTION
- ▶ Lois de Snell-Descartes applicables



c/ Généralisation des lois de Snell-Descartes aux ondes sismiques de volume



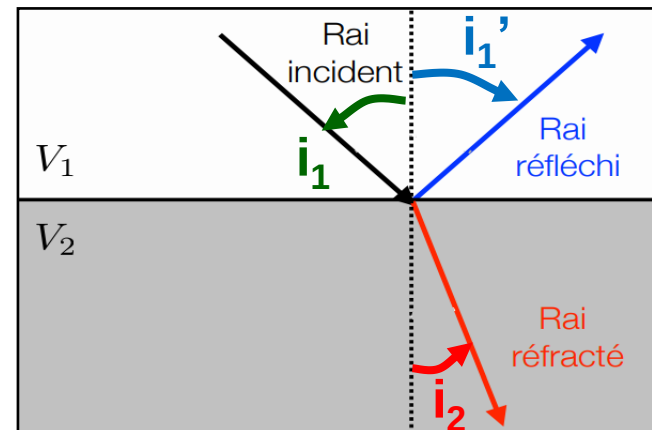


✦ Notion de RAI SISMIQUE :

Vecteur matérialisant la **direction** de propagation de l'onde sismique depuis le foyer.

✦ Loi de Snell-Descartes sur la REFLEXION :

- Le rai réfléchi appartient **au plan d'incidence**.
- L'angle de réflexion i_1' est égal à l'**opposé** de l'angle d'incidence i_1 : $i_1' = -i_1$



✦ Loi de Snell-Descartes sur la REFRACTION :

- Le rai réfracté appartient **au plan d'incidence**.

$$\frac{\sin(i_1)}{v_1} = \frac{\sin(i_2)}{v_2}$$

$v_1 < v_2$
on a
les

Loi de Snell-Descartes sur la REFLEXION :

- Le rai réfléchi appartient **au plan d'incidence**.
- L'angle de réflexion i_1' est égal à l'**opposé** de l'angle d'incidence i_1 :

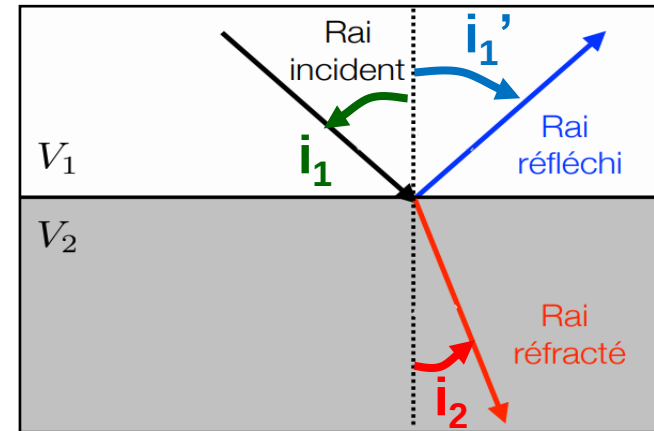
$$i_1' = -i_1$$

Loi de Snell-Descartes sur la REFRACTION :

- Le rai réfracté appartient **au plan d'incidence**.
- La relation $n_1 \times \sin i_1 = n_2 \times \sin i_2$ devient :

$$\frac{\sin(i_1)}{v_1} = \frac{\sin(i_2)}{v_2}$$

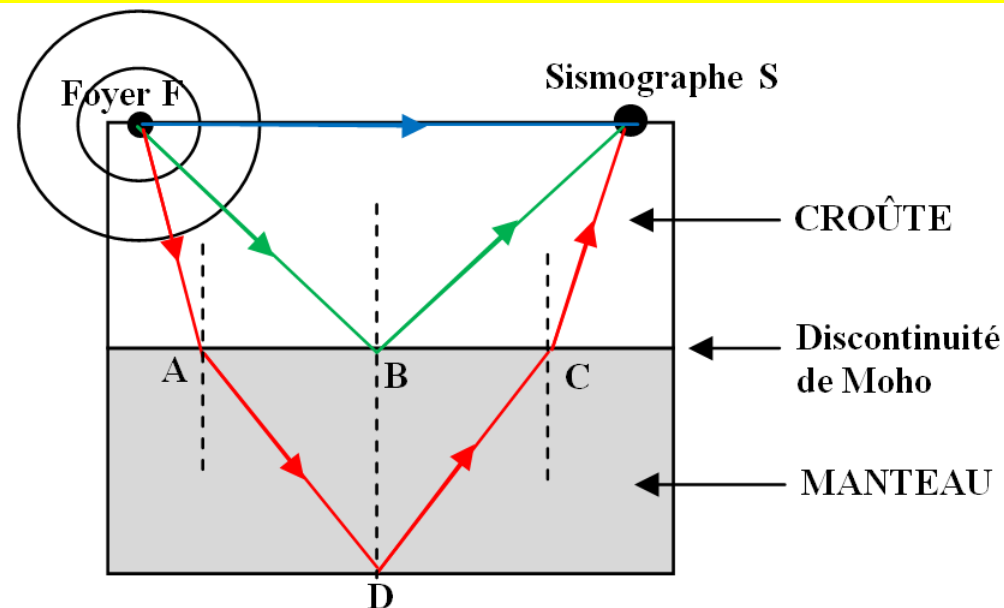
v_1 et v_2 = célérités des ondes sismiques dans les milieux 1 et 2



Application : la « discontinuité de Mohorovicic » ou « Moho »

🔍 - Quel(s) phénomène(s) observe-t-on pour les trajets ci-dessous ?

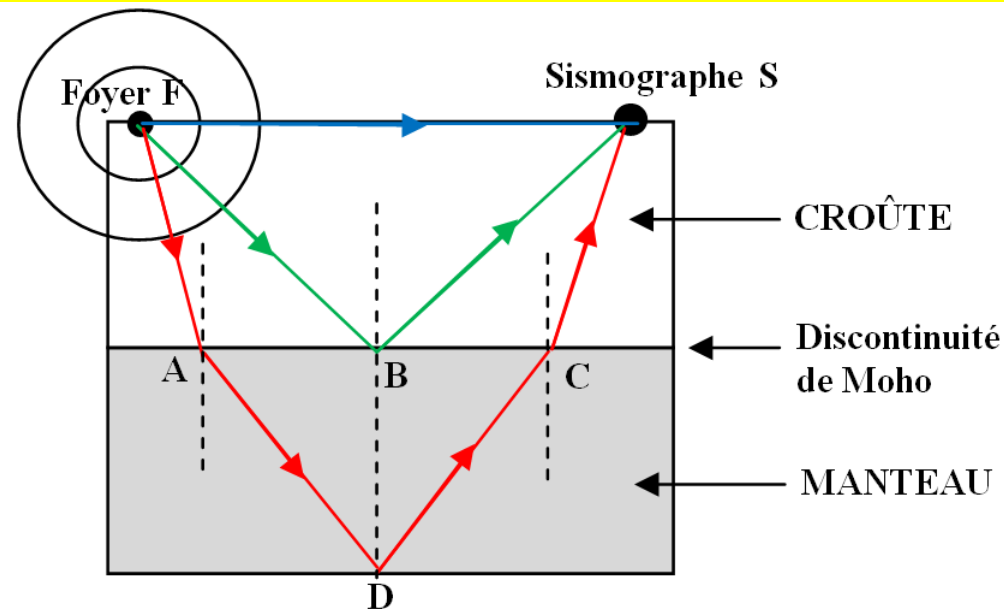
- Trajet **FS** : Trajet direct
- Trajet **FBS** : Réflexion en B
- Trajet **FADCS** : Réfraction en A
Réflexion en D
Réfraction en C



Application : la « discontinuité de Mohorovicic » ou « Moho »

🔗 - Quel(s) phénomène(s) observe-t-on pour les trajets ci-dessous ?

- Trajet **FS** : Trajet direct
- Trajet **FBS** : Réflexion en B
- Trajet **FADCS** : Réfraction en A
Réflexion en D
Réfraction en C



🔗 - Dans la croûte terrestre, les ondes P se propagent à $v_C = 6,0 \text{ km.s}^{-1}$ et dans le manteau supérieur, elles se propagent à $v_M = 8,0 \text{ km.s}^{-1}$. Justifier la manière dont est dévié le rai au point A.

$$\frac{\sin(i_{\text{incidence}})}{v_C} = \frac{\sin(i_{\text{réfraction}})}{v_M} \Leftrightarrow \frac{\sin(i_{\text{réfraction}})}{\sin(i_{\text{incidence}})} = \frac{v_M}{v_C} > 1 \text{ car } v_M > v_C$$

Donc : $\sin(i_{\text{réfraction}}) > \sin(i_{\text{incidence}})$, soit $i_{\text{réfraction}} > i_{\text{incidence}}$

➡ Le rayon réfracté s'éloigne de la normale

🔗 - Le train d'ondes P qui se réfléchit en B met $\Delta t = 12,7 \text{ s}$ pour être détecté par le sismographe. En déduire l'épaisseur e de la croûte terrestre (Donnée : $FS = 40 \text{ km}$).

Application : la « discontinuité de Mohorovicic » ou « Moho »

✂- Dans la croûte, les ondes P se propagent à $v_C = 6,0 \text{ km.s}^{-1}$ et dans le manteau, elles se propagent à $v_M = 8,0 \text{ km.s}^{-1}$. Justifier la manière dont est dévié le rai en A.

$$\frac{\sin(i_{\text{incidence}})}{v_C} = \frac{\sin(i_{\text{réfraction}})}{v_M} \Leftrightarrow \frac{\sin(i_{\text{réfraction}})}{\sin(i_{\text{incidence}})} = \frac{v_M}{v_C} > 1 \text{ car } v_M > v_C$$

Donc : $\sin(i_{\text{réfraction}}) > \sin(i_{\text{incidence}})$, soit $i_{\text{réfraction}} > i_{\text{incidence}}$

➡ Le rayon réfracté s'éloigne de la normale

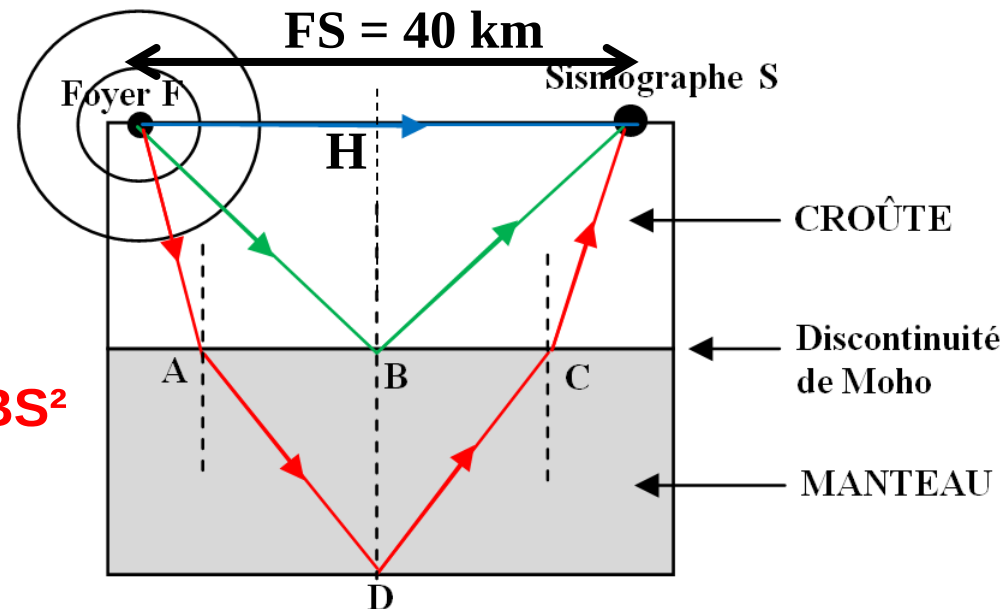
✂- Le train d'ondes P qui se réfléchit en B met $\Delta t = 12,7 \text{ s}$ pour être détecté par le sismographe. En déduire l'épaisseur e de la croûte terrestre (Donnée : $FS = 40 \text{ km}$).

Les ondes parcourent la distance $FBS = 2 BS$ pendant la durée Δt à la célérité v_C telle que :

$$v_C = \frac{2 BS}{\Delta t} \quad \text{Soit} \quad BS = \frac{v_C \times \Delta t}{2}$$

Dans le triangle BHS : $HB^2 + HS^2 = BS^2$

$$e^2 + \left(\frac{FS}{2}\right)^2 = \left(\frac{v_C \times \Delta t}{2}\right)^2$$



🔍 - Le train d'ondes P qui se réfléchit en B met $\Delta t = 12,7$ s pour être détecté par le sismographe. En déduire l'épaisseur e de la croûte terrestre (Donnée : $FS = 40$ km).

Les ondes parcourent la distance $FBS = 2 BS$ pendant la durée Δt à la célérité v_c telle que :

$$v_c = \frac{2 BS}{\Delta t} \quad \text{Soit} \quad BS = \frac{v_c \times \Delta t}{2}$$

Dans le triangle BHS : $HB^2 + HS^2 = BS^2$

$$e^2 + \left(\frac{FS}{2} \right)^2 = \left(\frac{v_c \times \Delta t}{2} \right)^2$$

Soit :

$$e = \sqrt{\frac{v_c^2 \times \Delta t^2 - FS^2}{4}}$$

AN $\rightarrow$

$$e = \sqrt{\frac{(6,0 \cdot 10^3)^2 \times 12,7^2 - (40 \cdot 10^3)^2}{4}}$$

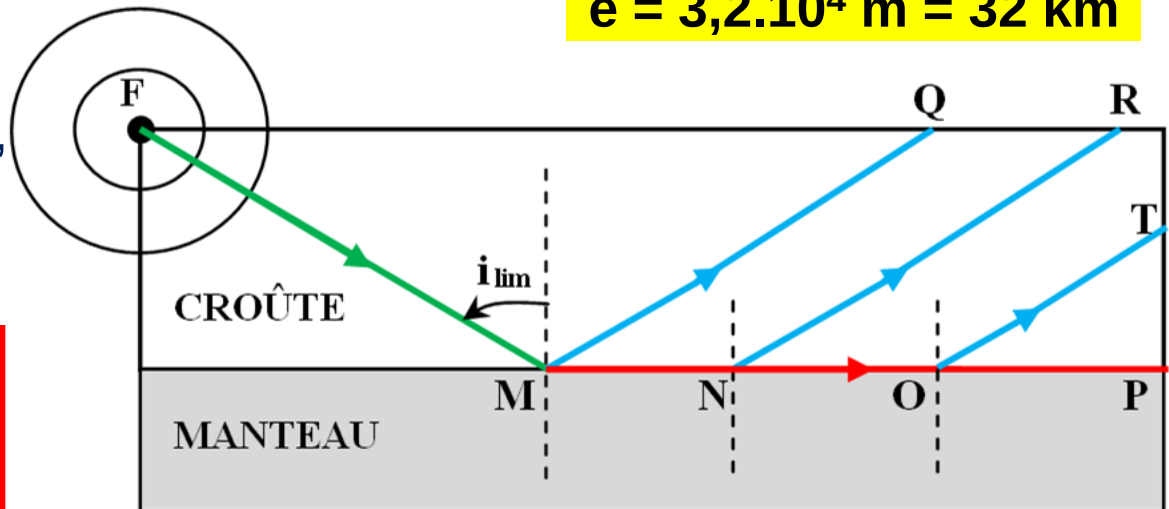
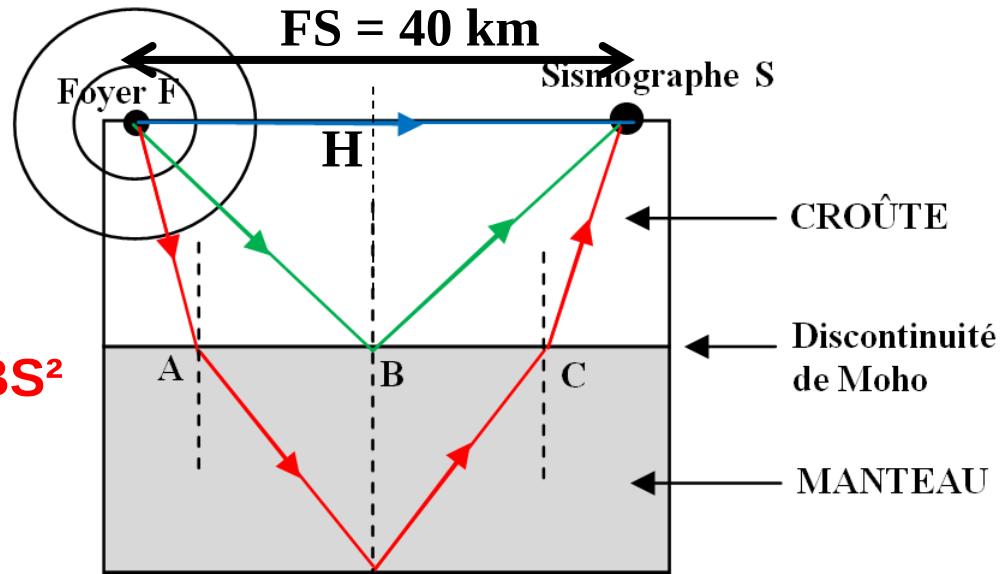
$$e = 3,2 \cdot 10^4 \text{ m} = 32 \text{ km}$$

🔍 - Exprimer puis calculer i_{lim} .
A la limite de la réflexion totale,

$$\frac{\sin(i_{lim})}{v_c} = \frac{\sin(90^\circ)}{v_M}$$

Soit :

$$i_{lim} = \arcsin\left(\frac{v_c}{v_M}\right)$$



✂- Le train d'ondes P qui se réfléchit en B met $\Delta t = 12,7 \text{ s}$ pour être détecté par le sismographe. En déduire l'épaisseur e de la croûte terrestre (Donnée : $FS = 40 \text{ km}$).

Soit :

$$e = \sqrt{\frac{v_c^2 \times \Delta t^2 - FS^2}{4}}$$

AN $\rightarrow$ $e = \sqrt{\frac{(6,0 \cdot 10^3)^2 \times 12,7^2 - (40 \cdot 10^3)^2}{4}}$

$e = 3,2 \cdot 10^4 \text{ m} = 32 \text{ km}$

✂- Exprimer puis calculer i_{lim} .
A la limite de la réflexion totale,

$$\frac{\sin(i_{\text{lim}})}{v_c} = \frac{\sin(90^\circ)}{v_M}$$

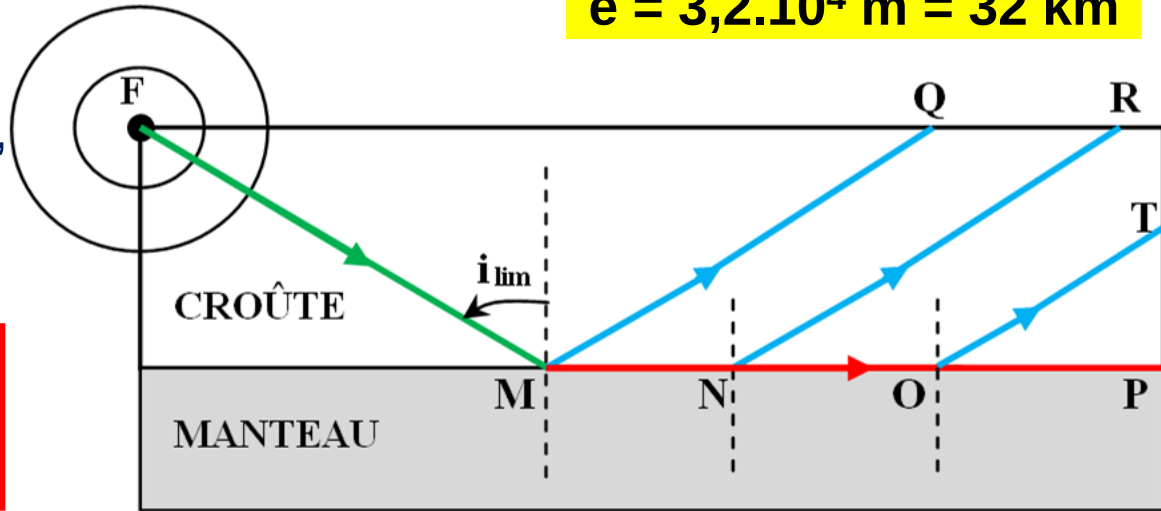
Soit :

$$i_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{v_c}{v_M}\right)$$

AN $\rightarrow i_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{6,0}{8,0}\right)$

$i_{\text{lim}} = 49^\circ$

Il y aura réflexion totale en M si $i > 49^\circ$; sinon, il y aura réflexion ET réfraction



NB : la réflexion totale n'est possible que si le rayon réfracté évolue dans un milieu où **la célérité de l'onde est plus grande** que dans le milieu dans lequel évolue le rayon incident.