

- *La lumière : modèles et applications* -

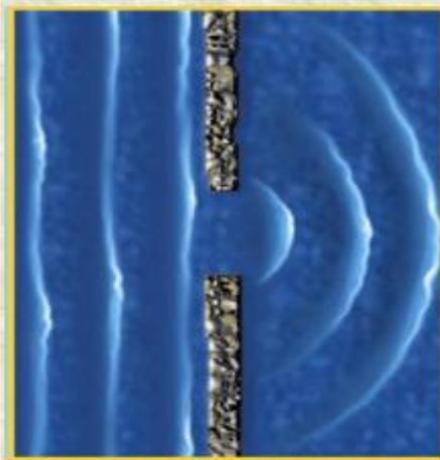
<i>Notions et contenus</i>	<i>Capacités exigibles</i>
<p>Rayonnement électromagnétique : modèles ondulatoire et particulaire de la lumière</p> <p>- Domaines spectraux du rayonnement électromagnétique.</p>	<p>- Citer des ordres de grandeur de longueurs d'onde associées aux différents domaines spectraux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



I- La dualité onde-particule de la lumière

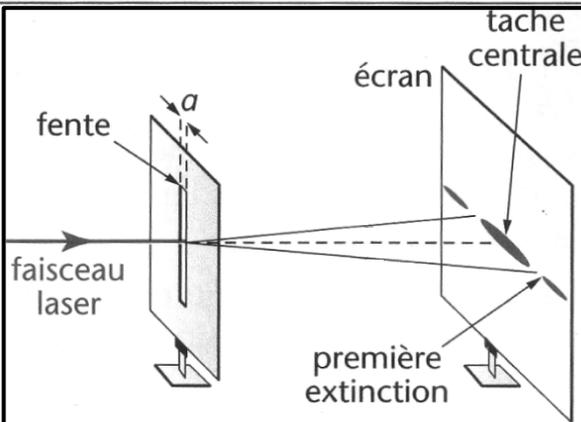
2 modèles sont nécessaires pour interpréter la totalité des phénomènes physiques mettant en jeu la lumière

1) Théorie ONDULATOIRE de la lumière



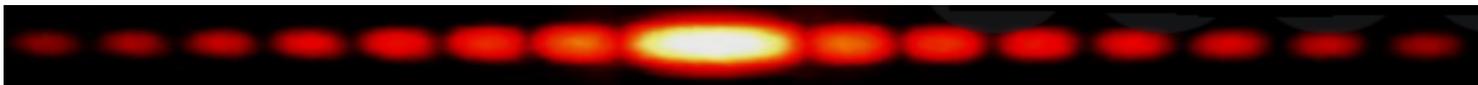
Doc 1 : Onde périodique à la surface de l'eau passant par une petite ouverture

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.

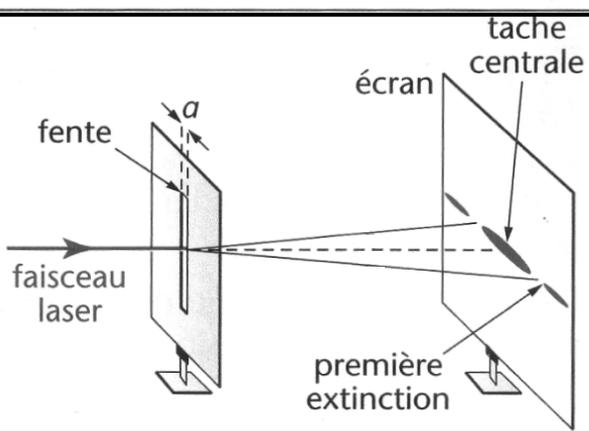


Doc 2 : Lumière laser passant par une petite ouverture

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.

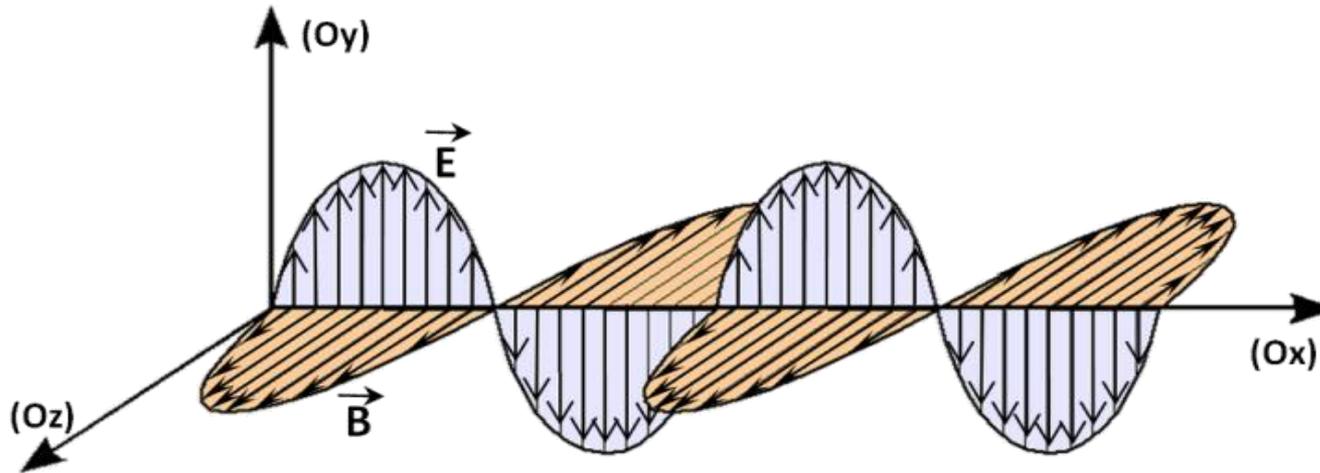


Doc 2 : Lumière laser passant par une petite ouverture



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 ?



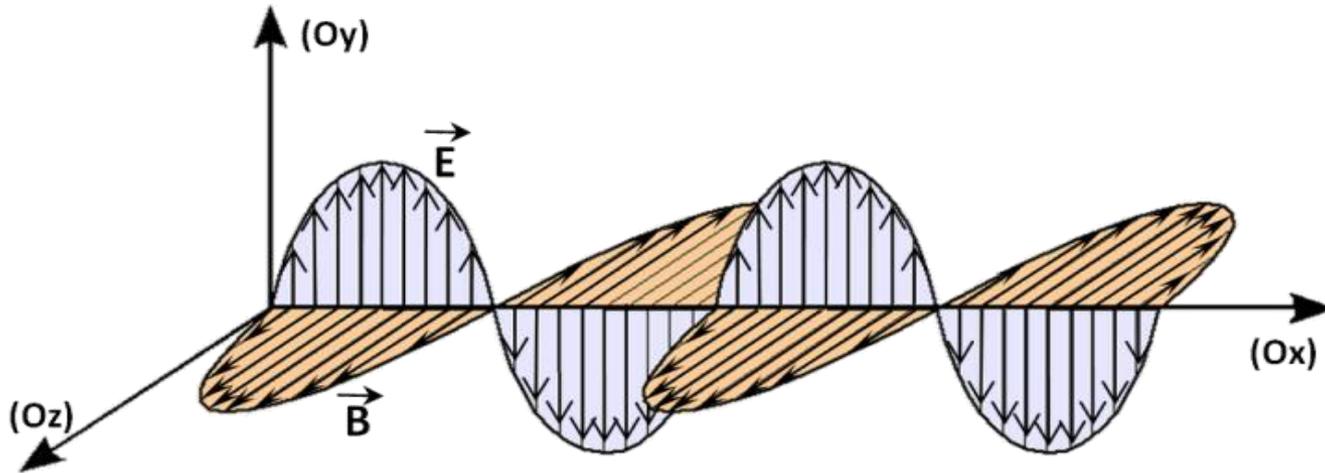
(Ox) = direction de propagation de l'onde lumineuse.

(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 :

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

ou

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

⇒ 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 :

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

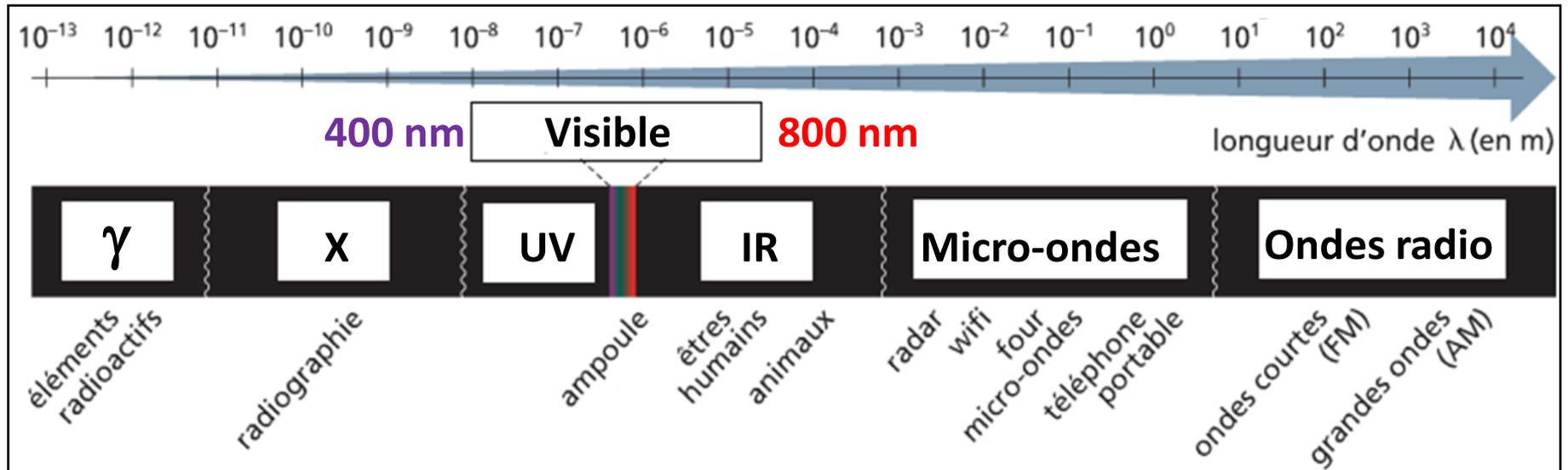
ou

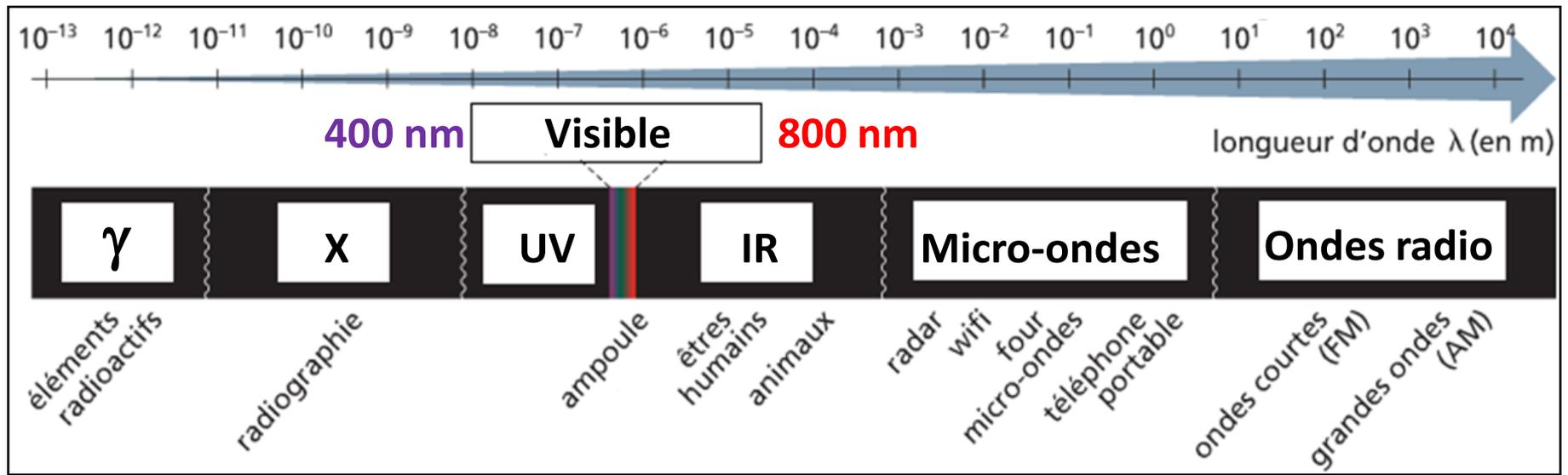
$$v = \lambda \times \nu \text{ (m.s}^{-1}\text{) (Hz)}$$

⇒ 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





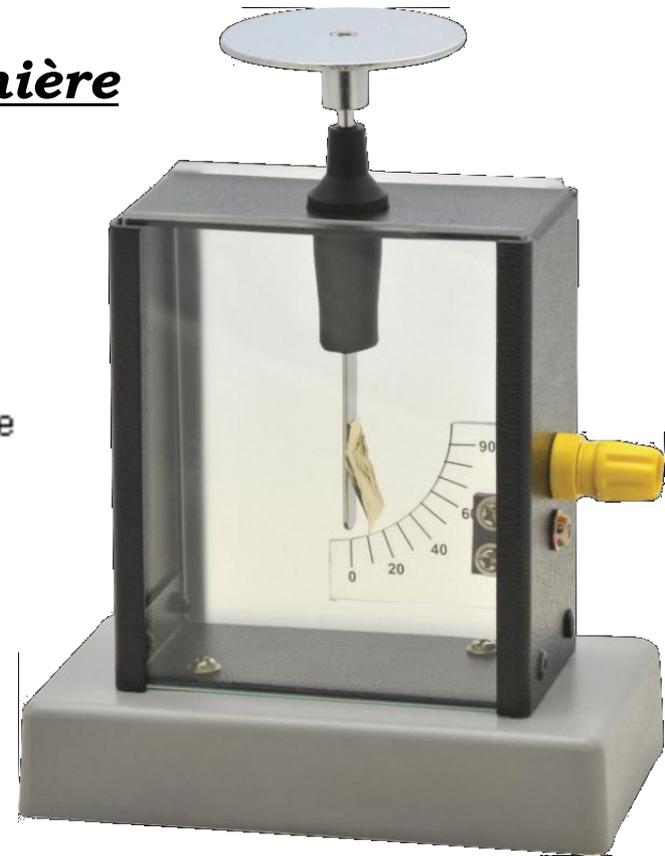
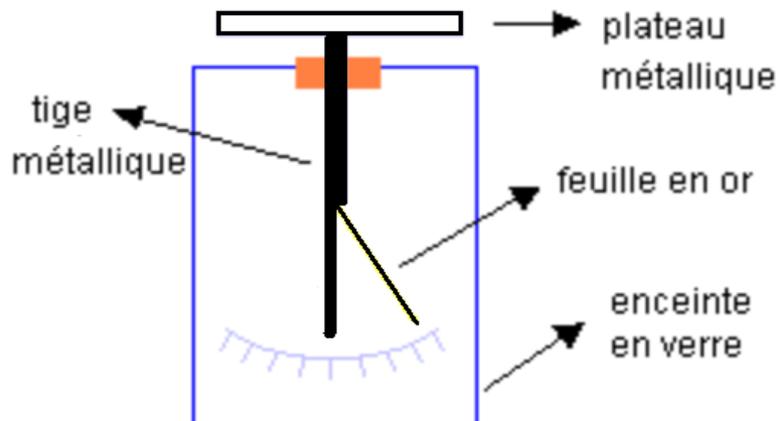
2) Théorie PARTICULAIRE de la lumière

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



Heinrich HERTZ
(1857 ; 1894)

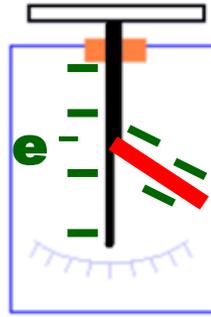
L'électroscope



<https://youtu.be/HkCrkdtK7GQ>

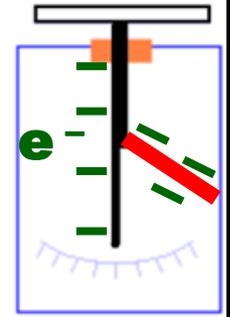
➔ Etape ① : une plaque de zinc est fixée sur le plateau de l'électroscope puis mise en contact avec un bâton d'ébonite préalablement chargé négativement par frottement.

La feuille d'or reste écartée car **des électrons sont présents sur la tige et sur la feuille d'or** qui se repoussent donc



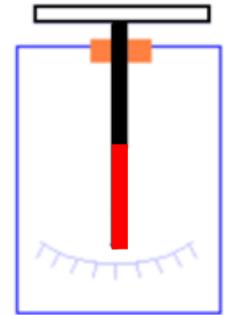
➔ Etape ② : on éclaire la plaque de zinc précédente par de la *lumière blanche*.

La feuille d'or reste écartée quelle que soit la durée d'éclairement et quelle que soit l'intensité de la lumière : **les électrons sont donc 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 : on en déduit que **le rayonnement UV a permis d'extraire les électrons du métal**

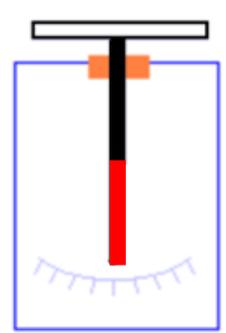


☛ Qu'est ce que l'EFFET PHOTOELECTRIQUE ? C'est l'**émission d'électrons par un métal** soumis à un *rayonnement électromagnétique*

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 : on en déduit que le rayonnement UV a permis d'extraire les électrons du métal

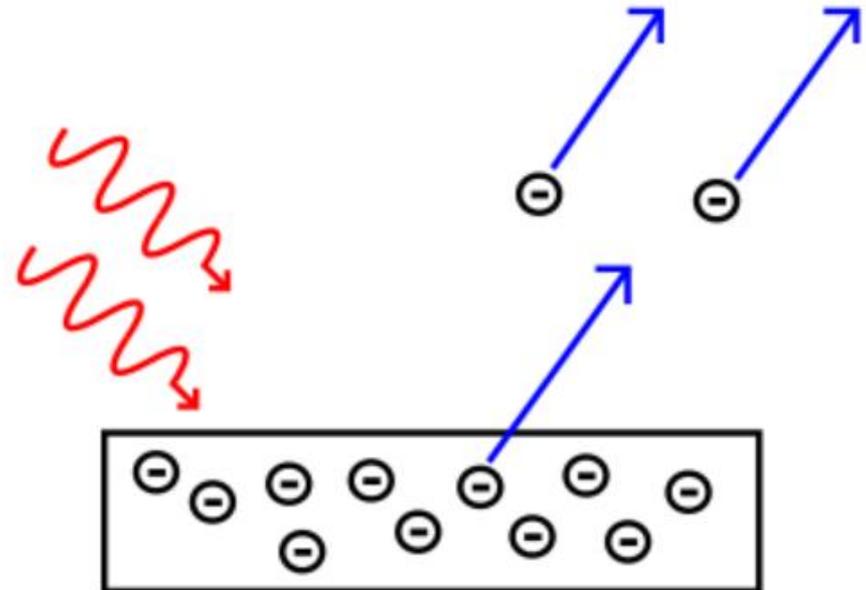


☛ Qu'est ce que l'EFFET PHOTOELECTRIQUE ? C'est l'émission d'électrons par un métal soumis à un rayonnement électromagnétique

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

Dans la théorie ONDULATOIRE, *n'importe quelle lumière devrait*, au bout d'un temps plus ou moins long, *apporter l'énergie suffisante pour arracher des électrons* au métal !

Théorie ONDULATOIRE
mise en défaut



☛ 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.

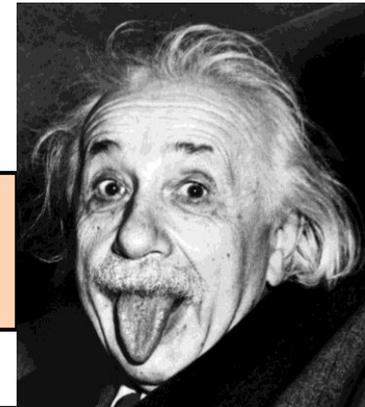
b/ Interprétation : le modèle du photon

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** et de **CHARGE nulles**
- 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)

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

(en Hertz)

(relation de
Planck-Einstein)

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

- transportant chacun une énergie $E_{\text{photon}} = h \times \nu$ (relation de Planck-Einstein)

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

➔ Retour sur l'expérience de Hertz :

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

C'est un photon qui apporte cette énergie (s'il en apporte trop, l'excès d'énergie se transforme en **énergie cinétique** E_c pour l'électron)

$$E_{\text{photon}} = W_e + E_c$$

(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, alors :

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

☞- 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, alors :

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

AN $\rightarrow \lambda_{\text{seuil}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3,00 \cdot 10^8}{4,31 \times 1,60 \cdot 10^{-19}}$ 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**.

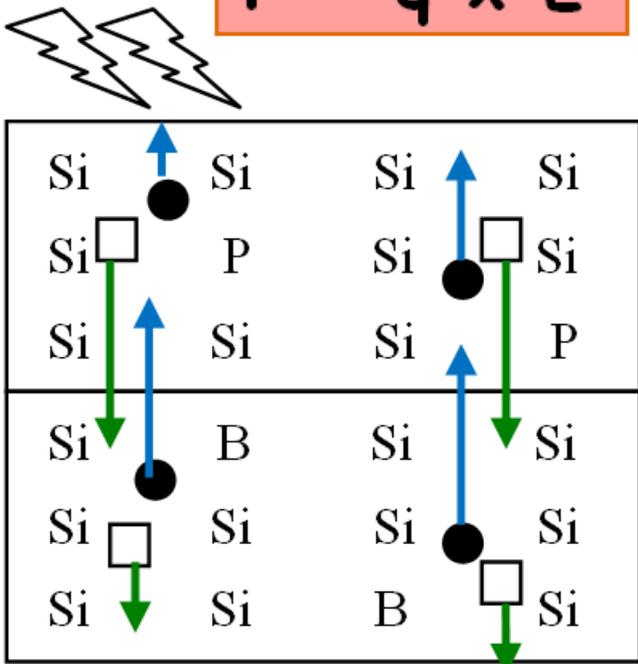
c/ Autres interactions lumière / matière

LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Lumière $\vec{F} = q \times \vec{E}$

☞- Sur le schéma de gauche, identifier la couche N et la couche P, représenter le vecteur champ électrique \vec{E} , et indiquer comment se déplacent les électrons (•) et les trous positifs (□).

Couche N = celle du haut (dopée au phosphore)
Couche P = couche du bas (dopée au bore)
 $q(\text{trou}) > 0 = \vec{F}$ colinéaire et de même sens que \vec{E}
 $q(\text{électron}) < 0 = \vec{F}$ colinéaire et de sens opposé à \vec{E}



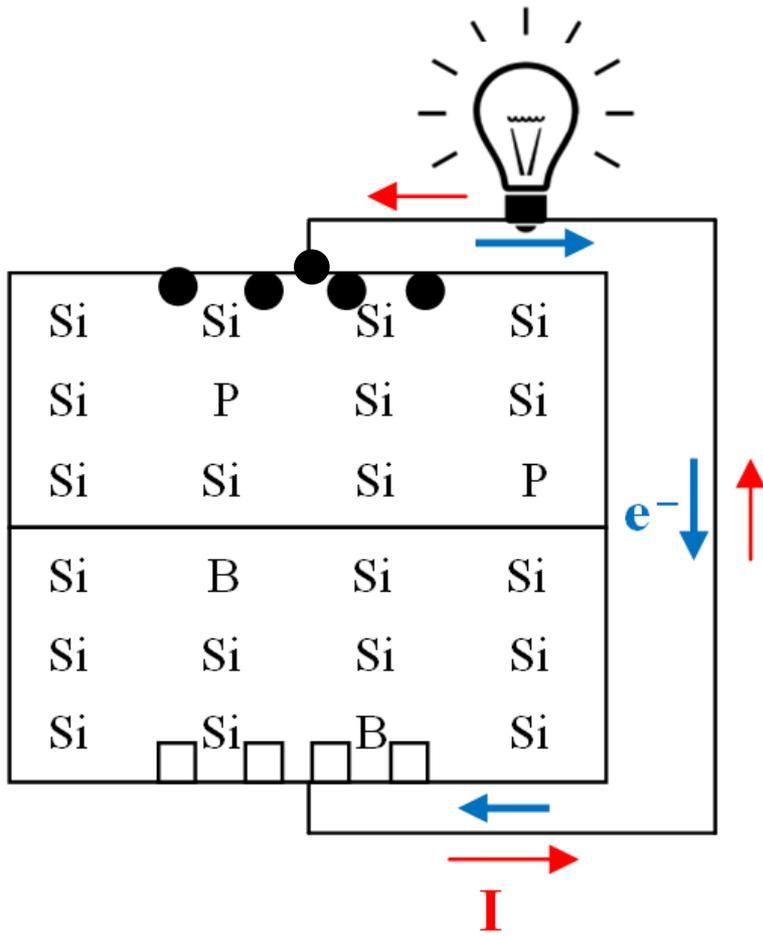
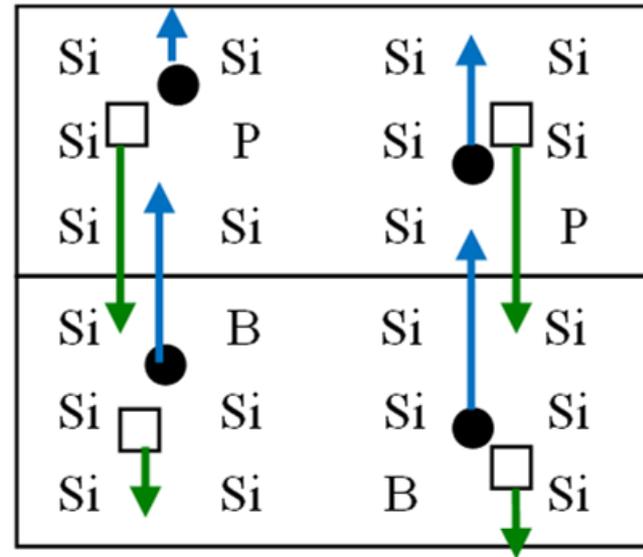
Couche N = couche du haut (dopée au phosphore)

Couche P = couche du bas (dopée au bore)

$q(\text{trou}) > 0 = \vec{F}$ colinéaire et de même sens que \vec{E}

$q(\text{électron}) < 0 = \vec{F}$ colinéaire et de sens opposé à \vec{E}

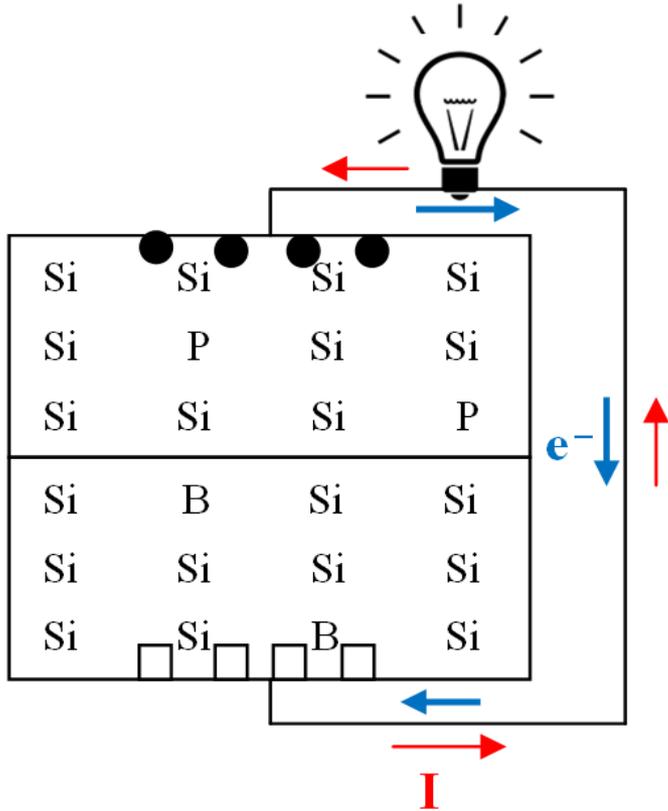
Lumière



✎ - Indiquer comment les électrons se déplacent dans le circuit électrique et donc le sens du courant électrique.

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.



☞- Indiquer comment les électrons se déplacent dans le circuit électrique et donc le sens du courant électrique.

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



La PHOTOIONISATION de l'atmosphère

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

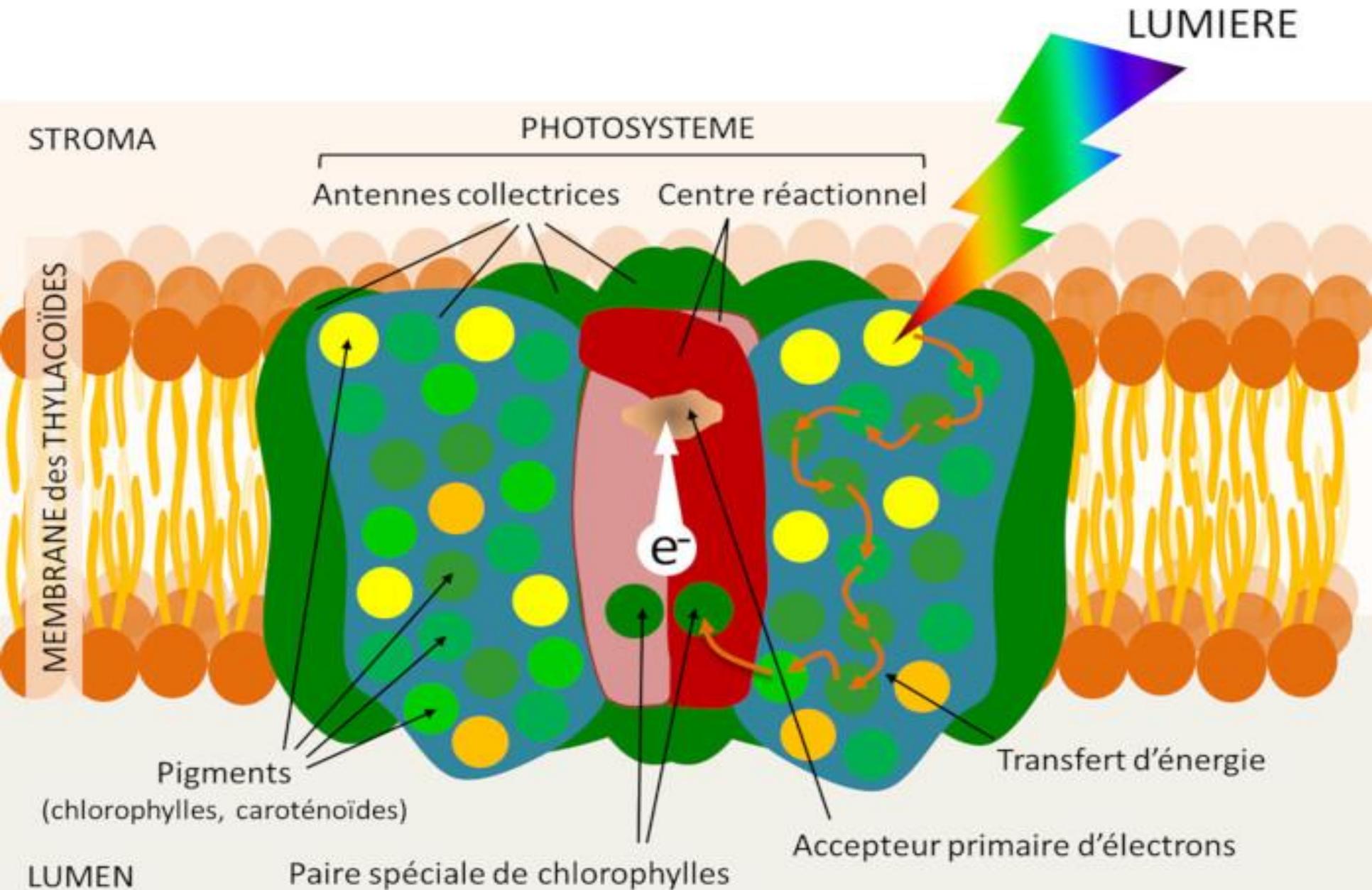
O_2 devient O_2^+ ; N_2 devient N_2^+ ; NO devient NO^+ ...

LA PHOTOSYNTHESE (voir cours de SVT)

Lors de la photosynthèse, les pigments présents dans les végétaux absorbent l'énergie des photons, ce qui place ces pigments dans un état excité. De proche en proche, ces pigments libèrent ce trop-plein d'énergie aux pigments voisins, jusqu'à atteindre les centres réactionnels des chloroplastes.

L'énergie d'excitation est alors irréversiblement convertie en énergie électrochimique : une « paire spéciale » de chlorophylles libère un électron et un « accepteur primaire » le reçoit. Très rapidement, l'accepteur primaire réduit va céder l'électron à un autre accepteur et ainsi de suite au cours d'une série de réactions chimiques en cascade qui vont permettre la production d'énergie chimique (transformation de H_2O en O_2 et de CO_2 en sucres comme le glucose $C_6H_{12}O_6$) à partir d'énergie lumineuse.

LA PHOTOSYNTHESE (voir cours de SVT)



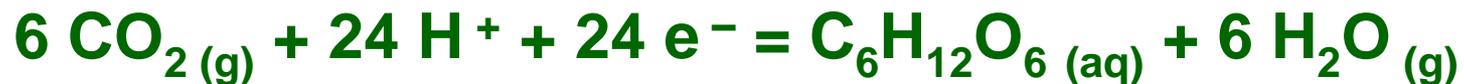
LA PHOTOSYNTHESE (voir cours de SVT)

Lors de la photosynthèse, les pigments présents dans les végétaux absorbent l'énergie des photons, ce qui place ces pigments dans un état excité. De proche en proche, ces pigments libèrent ce trop-plein d'énergie aux pigments voisins, jusqu'à atteindre les centres réactionnels des chloroplastes.

L'énergie d'excitation est alors irréversiblement convertie en énergie électrochimique : une « paire spéciale » de chlorophylles libère un électron et un « accepteur primaire » le reçoit. Très rapidement, l'accepteur primaire réduit va céder l'électron à un autre accepteur et ainsi de suite au cours d'une série de réactions chimiques en cascade qui vont permettre la production d'énergie chimique (transformation de H_2O en O_2 et de CO_2 en sucres comme le glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) à partir d'énergie lumineuse.

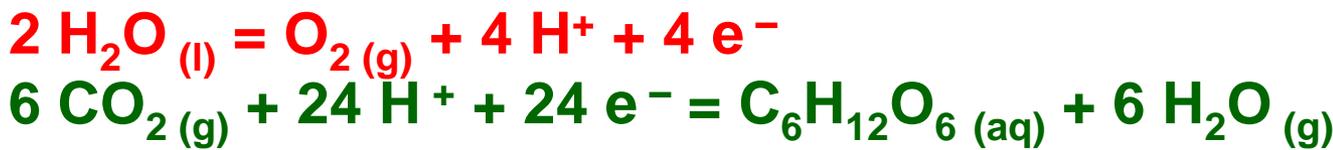
☞ - *Quel type de réactions chimiques observe-t-on lors de la photosynthèse ?*

Réactions d'oxydo-réduction



☞ - Quel type de réactions chimiques observe-t-on lors de la photosynthèse ?

Réactions
d'oxydo-réduction



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

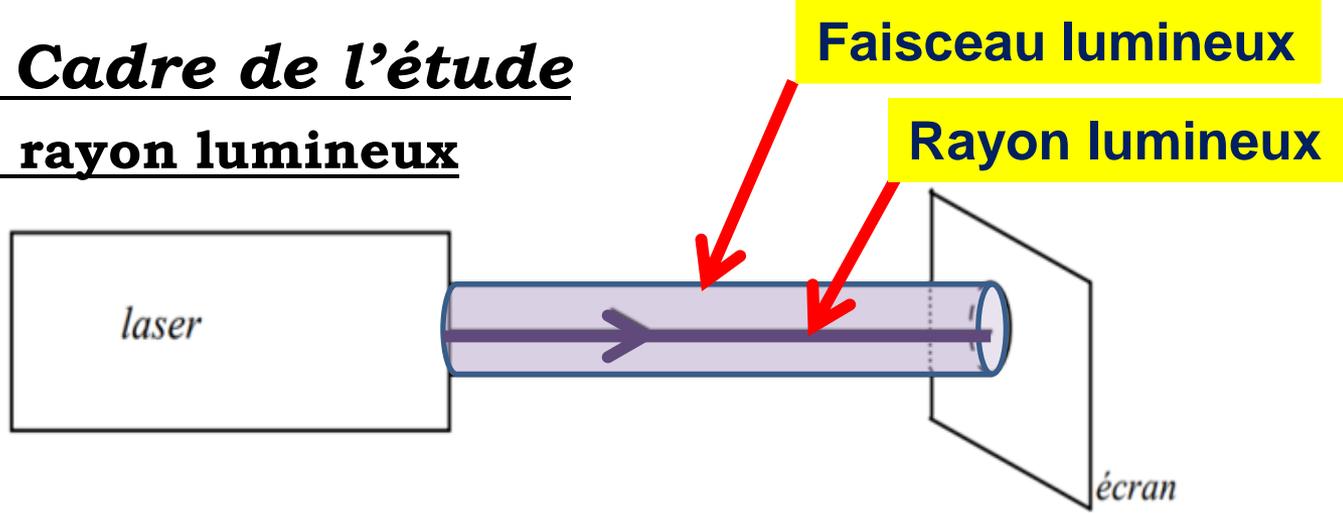
Milieu
TRANSPARENT

Milieu
HOMOGENE

Milieu
ISOTROPE

1) Cadre de l'étude

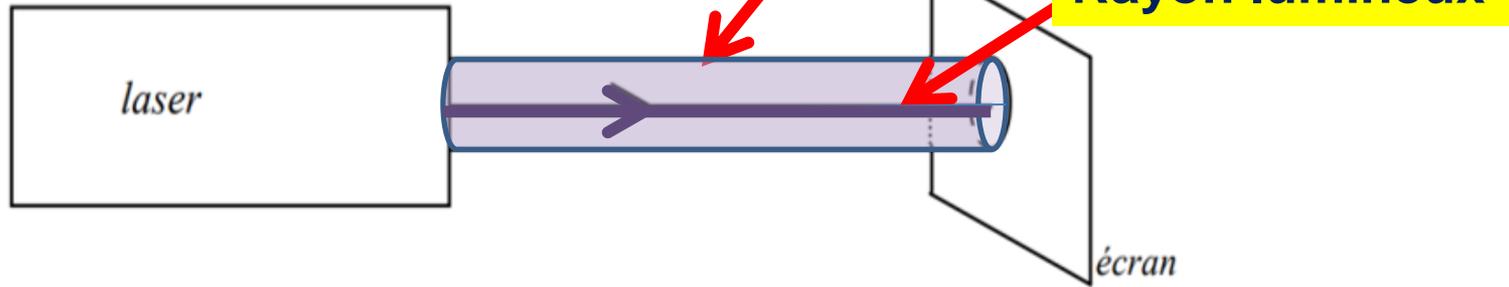
a/ Modèle du rayon lumineux



☞ 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.

1) Cadre de l'étude

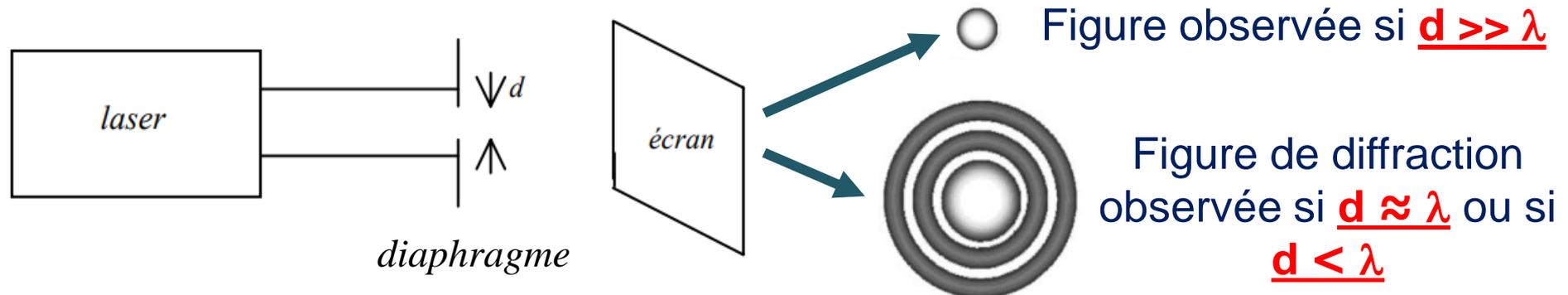
a/ Modèle du rayon lumineux



☛ 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

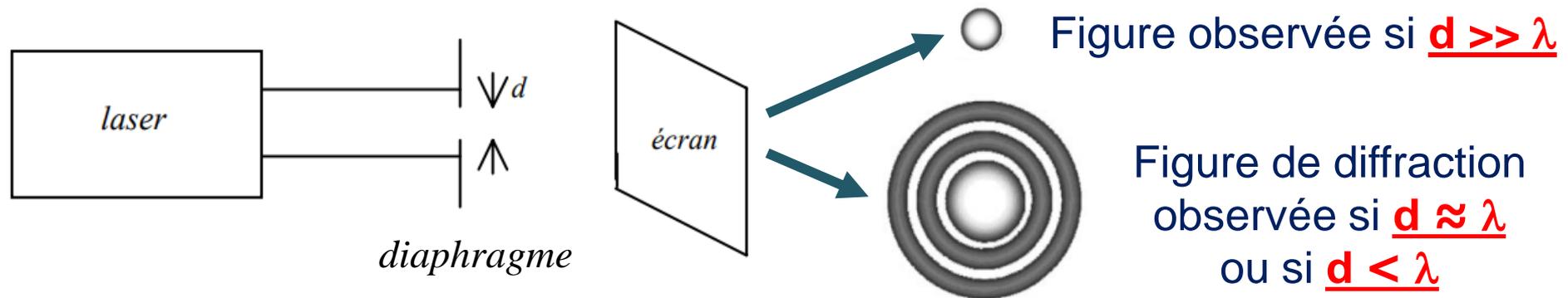


a/ Modèle du rayon lumineux

☛ 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.

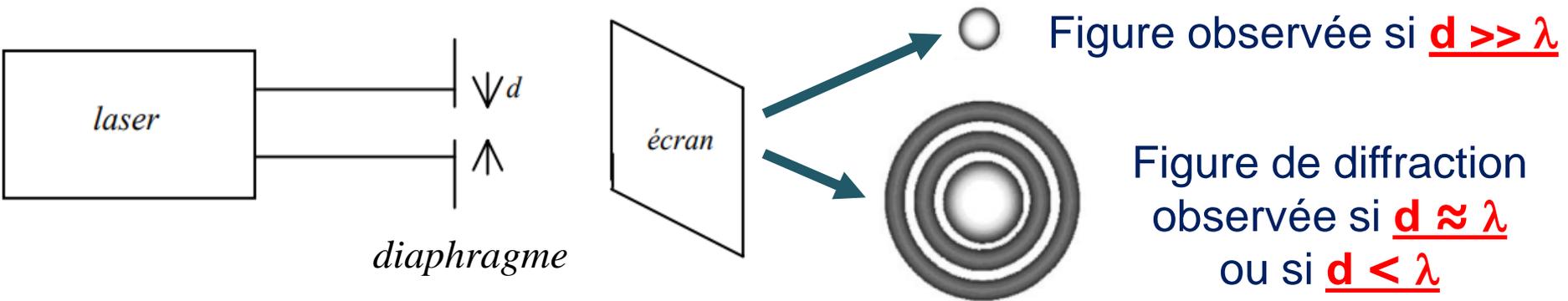
Approximation de l'optique géométrique : on néglige le caractère ondulatoire de la lumière



☛ Validité de l'Approximation de l'optique géométrique :

L'Approximation de l'optique géométrique n'est valable que si les dimensions L^* du problème sont très grandes devant la longueur d'onde λ de la lumière utilisée.

* taille des objets, d'une fente ...



☛ Validité de l'Approximation de l'optique géométrique :

L'Approximation de l'optique géométrique n'est valable que si les dimensions L^ du problème sont très grandes devant la longueur d'onde λ de la lumière utilisée.*

* taille des objets, d'une fente ...

☛ 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

☛ 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.

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

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.

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



- **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 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 d'une onde ne dépendant 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 **v** de la lumière est la même dans le vide et dans le milieu d'indice n

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

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

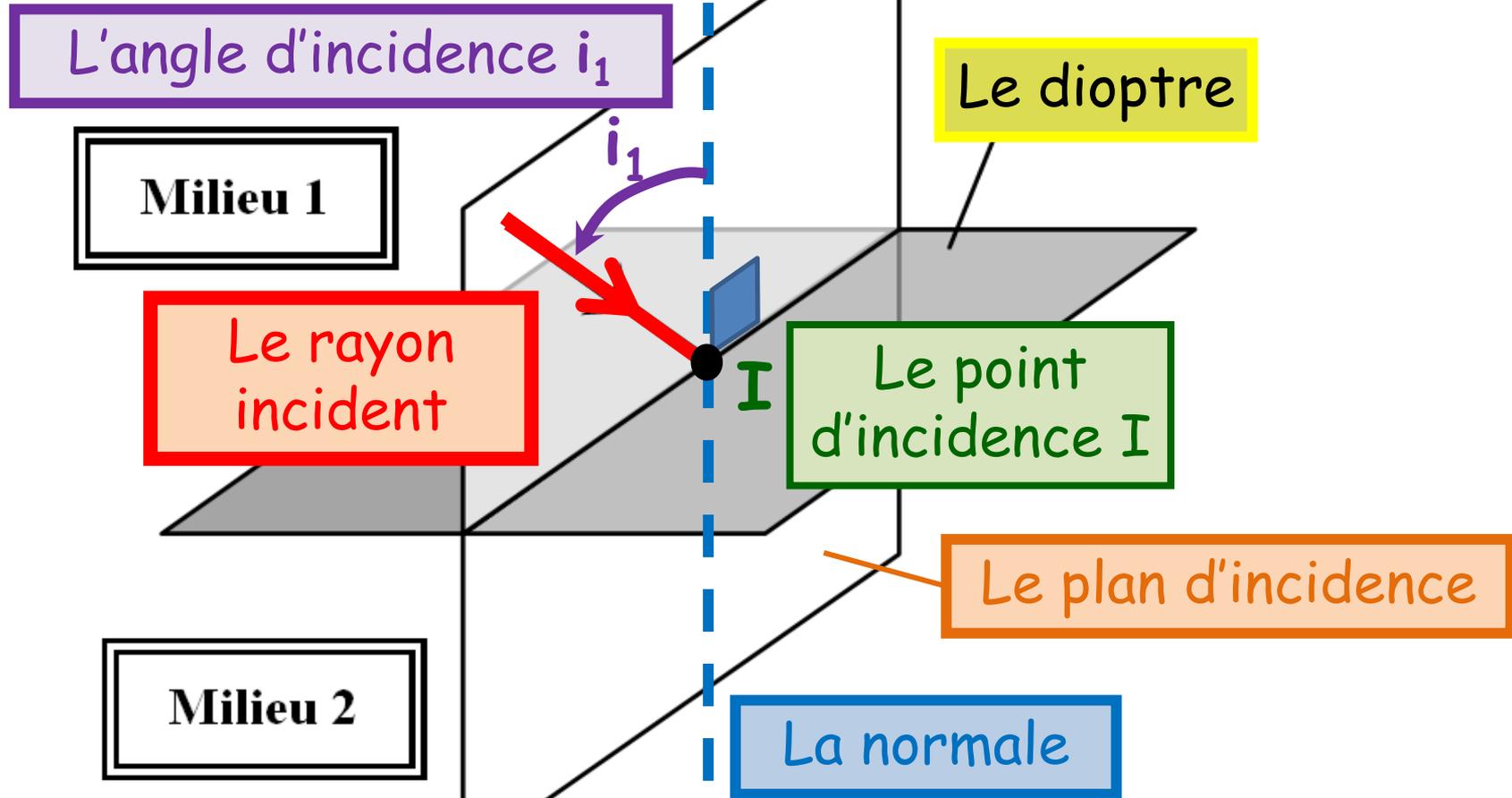
On en déduit donc que : $\frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \lambda_0 \times \frac{v}{c} \Leftrightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

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



2) Lois de Snell-Descartes

a/ Réflexion de la lumière

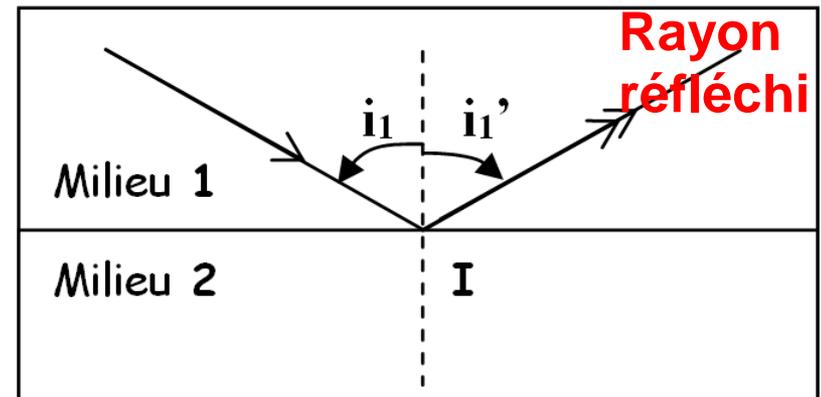
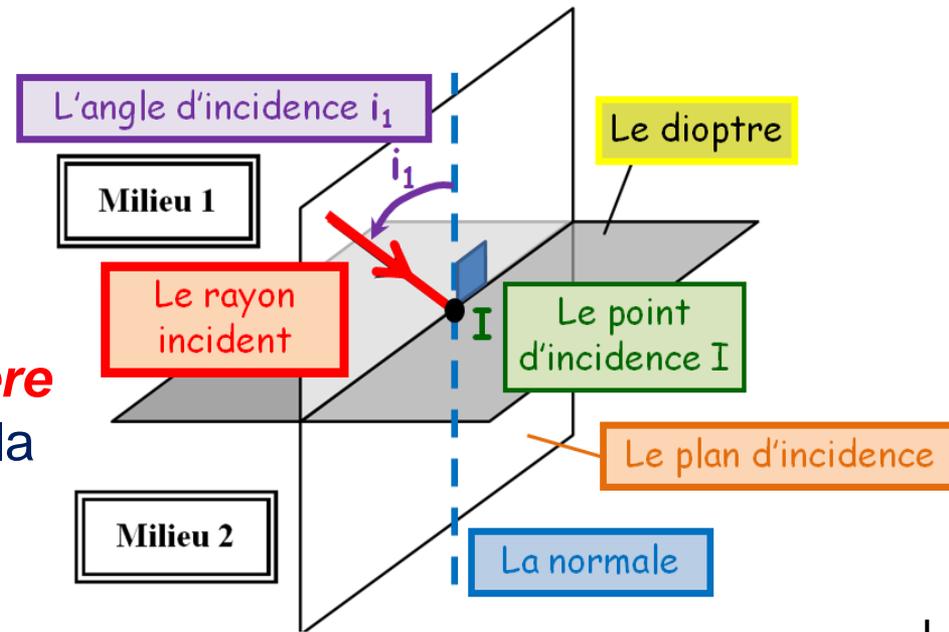
☛ Définition :

Le phénomène de réflexion 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 de 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 :

$$i_1' = -i_1$$

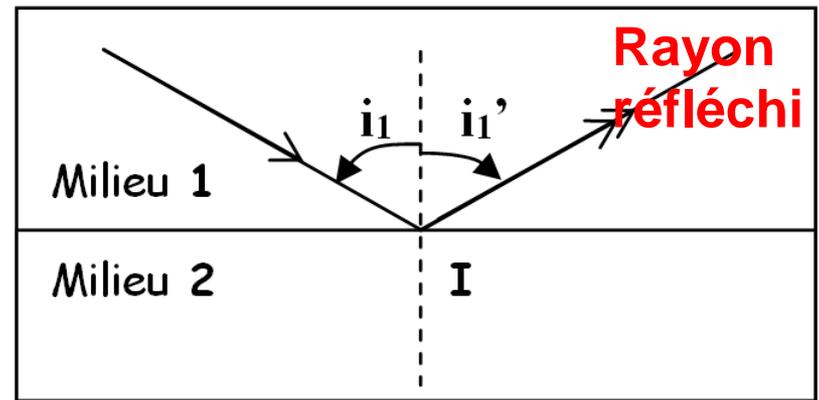


Le phénomène de réflexion s'observe aussi avec les miroirs : le dioptre est alors constitué d'un mince dépôt métallique réfléchissant (argent, aluminium ...)

☛ Lois de Snell-Descartes de 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 :

$$i_1' = -i_1$$



b/ Réfraction de la lumière

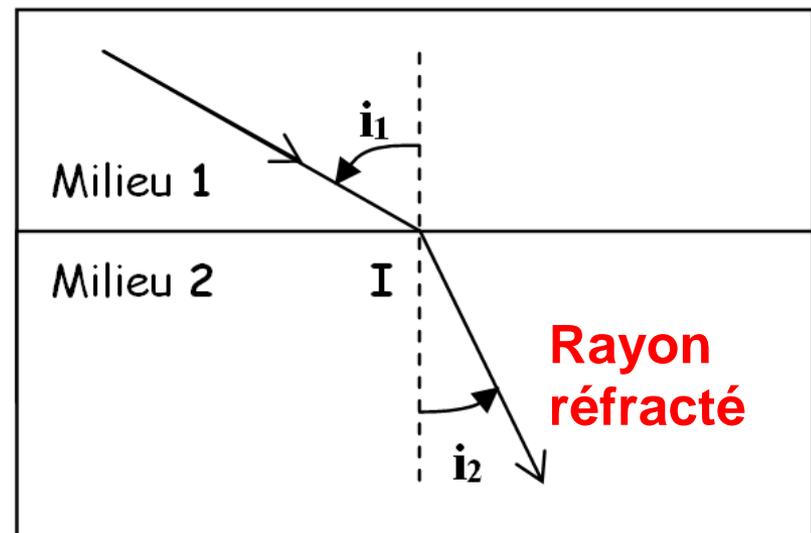
☛ Définition :

Le phénomène de réfraction est le phénomène au cours duquel **la lumière change brutalement de direction lorsqu'elle traverse le dioptre**, donc en changeant de milieu.

☛ Lois de Snell-Descartes de 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 :

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



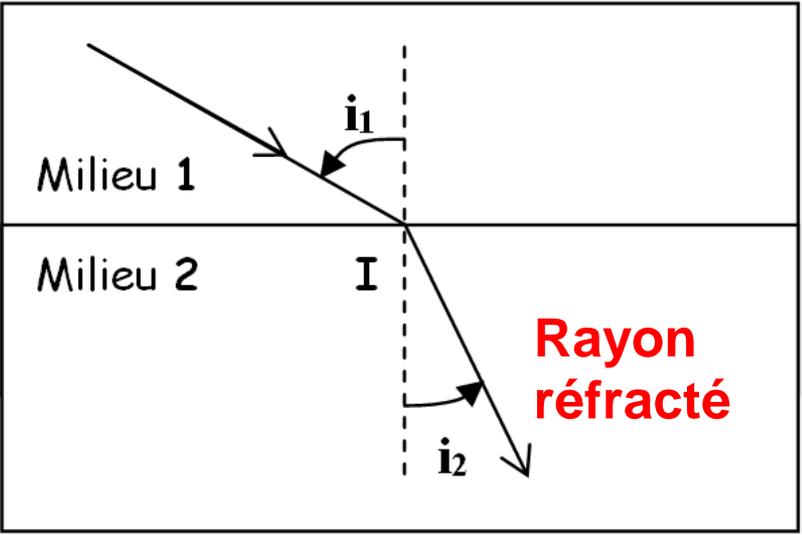
b/ Réfraction de la lumière

Lois de Snell-Descartes de 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 :

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

(n_1 et n_2 sont les indices optiques des milieux 1 et 2)



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

On a : $i_1 = 0^\circ \Leftrightarrow n_1 \times \sin i_1 = 0 \Leftrightarrow n_2 \times \sin i_2 = 0 \Leftrightarrow \sin i_2 = 0$
 $i_2 = 0^\circ$ (le rayon traverse le dioptre sans être dévié)

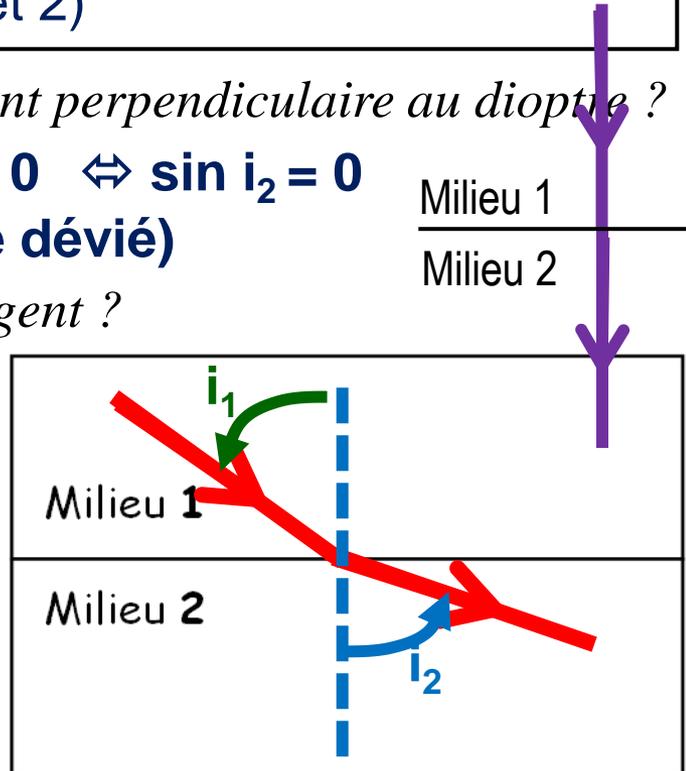
☞ - *Sur la figure ci-dessus, quel milieu est le plus réfringent ?*

On a : $i_2 < i_1 < 90^\circ \Leftrightarrow \sin i_2 < \sin i_1 \Leftrightarrow n_2 > n_1$

Le milieu 2 est plus réfringent

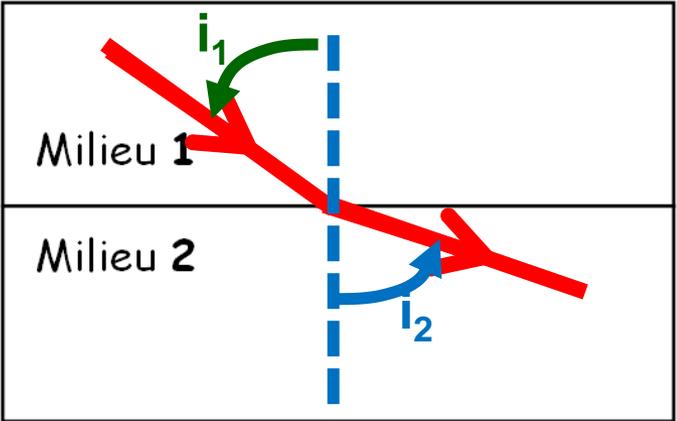
☞ - *Dessiner dans le cadre ci-contre ce qu'on observerait si on avait le cas contraire.*

Si $n_2 < n_1$, on aurait : $i_2 > i_1$



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

On a : $i_2 < i_1 < 90^\circ \Leftrightarrow \sin i_2 < \sin i_1$
 $\Leftrightarrow n_2 > n_1$



Le milieu 2 est plus réfringent

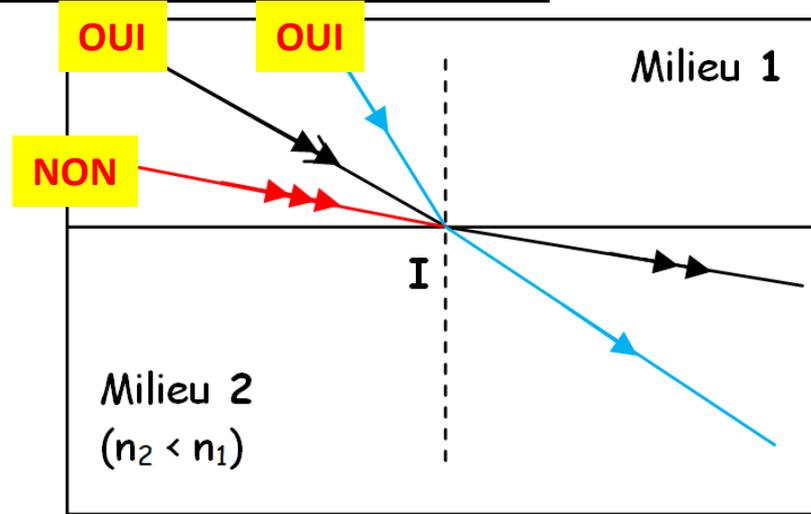
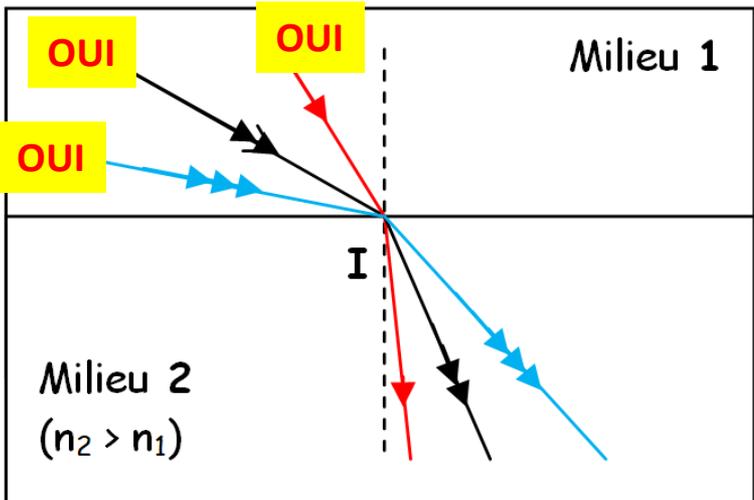
☞ - Dessiner dans le cadre ci-contre ce qu'on observerait si on avait le cas contraire.

Si $n_2 < n_1$, on aurait : $i_2 > i_1$

☞ - Comment varie l'angle i_2 quand l'angle i_1 augmente ?

$$\sin(i_2) = \frac{n_1}{n_2} \times \sin(i_1)$$
 Si $i_1 \uparrow$, $\sin i_1 \uparrow$, $\sin i_2 \uparrow$ **donc $i_2 \uparrow$** .

☛ **Le phénomène de REFRACTION est-il toujours observé ?**

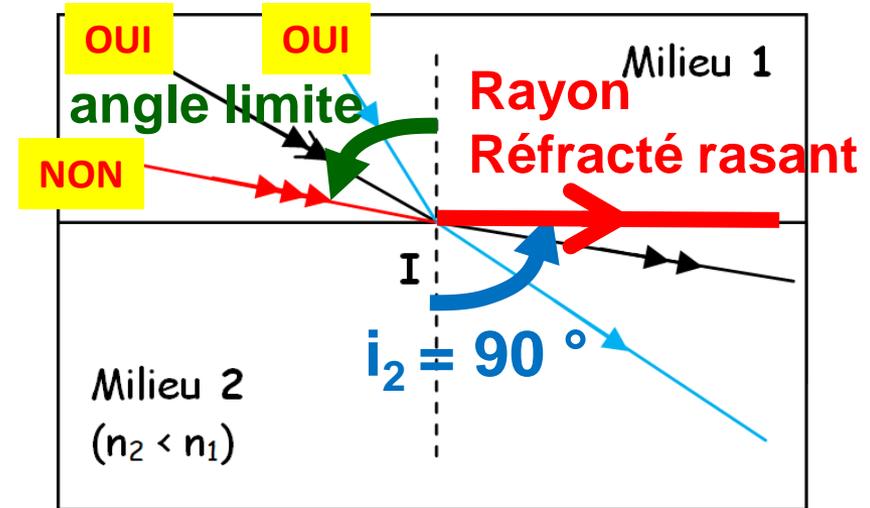
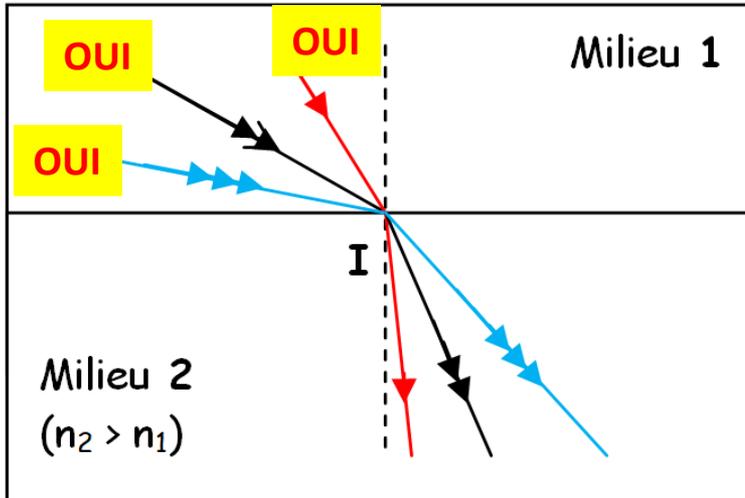


🔗 - Comment varie l'angle i_2 quand l'angle i_1 augmente ?

$$\sin(i_2) = \frac{n_1}{n_2} \times \sin(i_1)$$

Si $i_1 \uparrow$, $\sin i_1 \uparrow$, $\sin i_2 \uparrow$ donc $i_2 \uparrow$.

👉 **Le phénomène de REFRACTION est-il toujours observé ?**



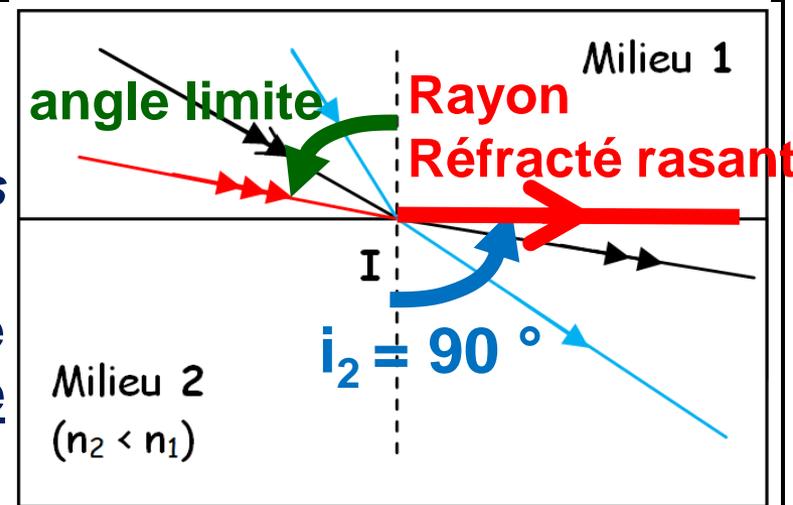
Pour ne pas observer le phénomène de REFRACTION, il faut que :

- 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** ») pour laquelle l'angle réfracté vaut 90°

➡ Dans ce cas, le rayon incident ne subit qu'un phénomène de réflexion : on parle alors de **REFLEXION TOTALE**.

Pour ne pas observer le phénomène de **REFRACTION**, il faut que :

- 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** ») pour laquelle l'angle réfracté vaut 90°



➔ Dans ce cas, le rayon incident ne subit qu'un phénomène de réflexion : on parle alors de **REFLEXION TOTALE**.

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

Pour que $n_2 < n_1$, il faut que **Milieu 1 = Eau** et **Milieu 2 = Air**

$$n(\text{eau}) \times \sin(i_{\text{lim}}) = n(\text{air}) \times \sin(i_2) \Leftrightarrow \sin(i_{\text{lim}}) = \frac{n(\text{air})}{n(\text{eau})} \times \sin(i_2)$$

$$\text{A.N. : } \sin(i_{\text{lim}}) = \frac{1,00}{1,33} \times \sin(90^\circ)$$

$$\text{Soit } \sin(i_{\text{lim}}) = 0,75$$

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



Le phénomène de réflexion totale est exploité dans la **fibres optiques** afin de guider sans perte les ondes lumineuses dans le matériau.

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

Pour que $n_2 < n_1$, il faut que **Milieu 1 = Eau** et **Milieu 2 = Air**

$$n(\text{eau}) \times \sin(i_{\text{lim}}) = n(\text{air}) \times \sin(i_2) \Leftrightarrow \sin(i_{\text{lim}}) = \frac{n(\text{air})}{n(\text{eau})} \times \sin(i_2)$$

A.N. : $\sin(i_{\text{lim}}) = \frac{1,00}{1,33} \times \sin(90^\circ)$

Soit $\sin(i_{\text{lim}}) = 0,75$

➔ $i_{\text{lim}} = 49^\circ$



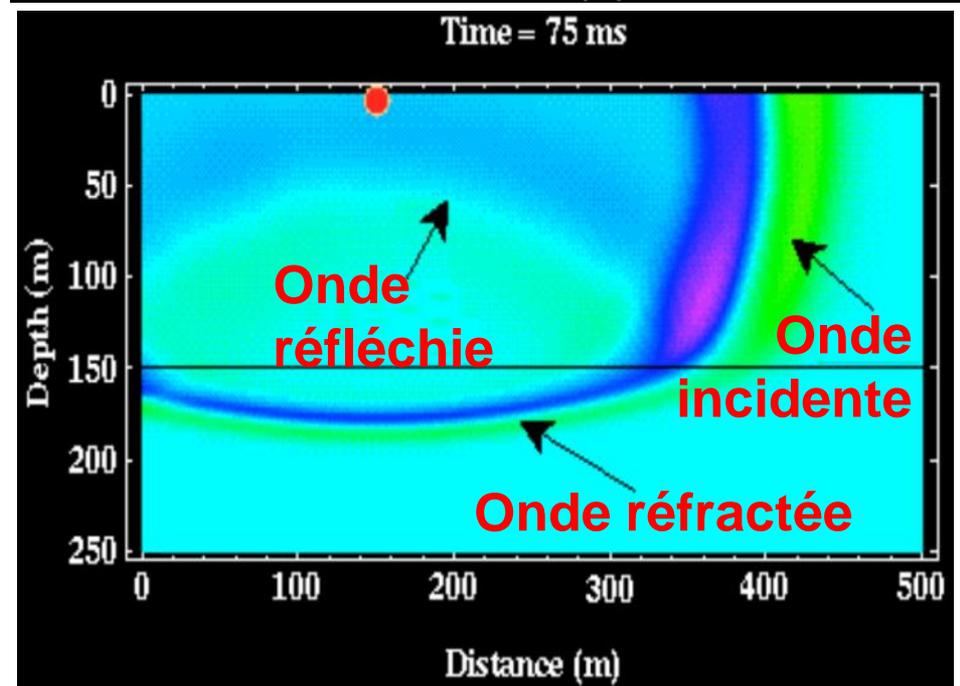
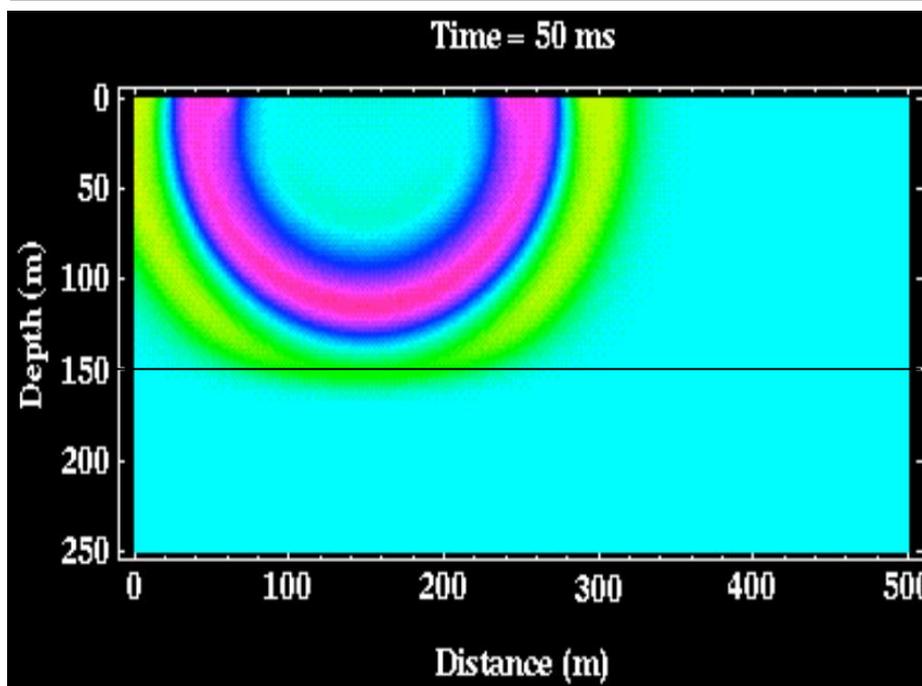
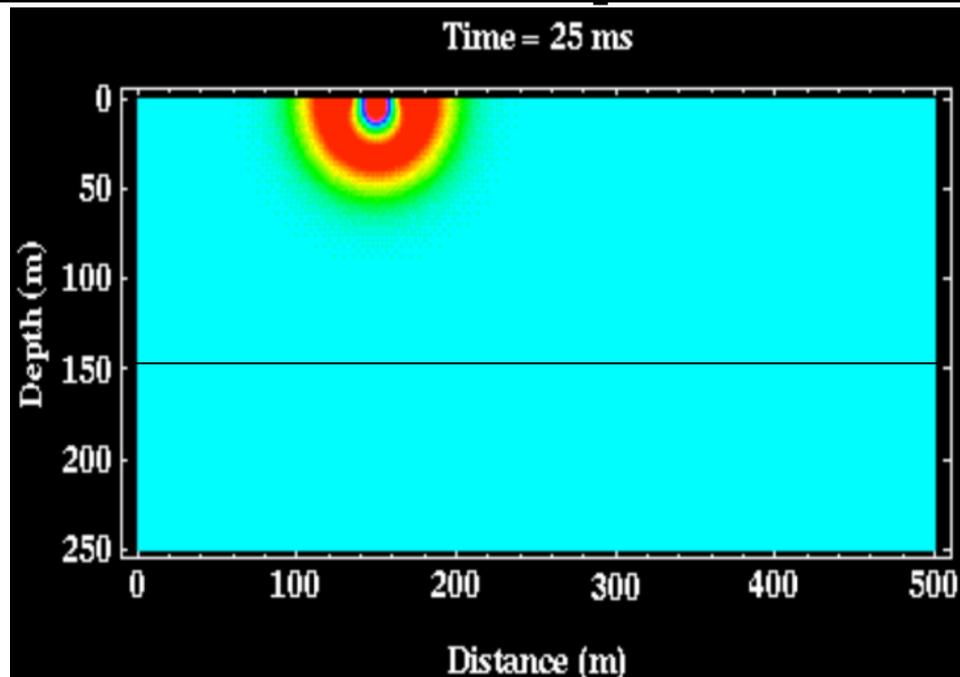
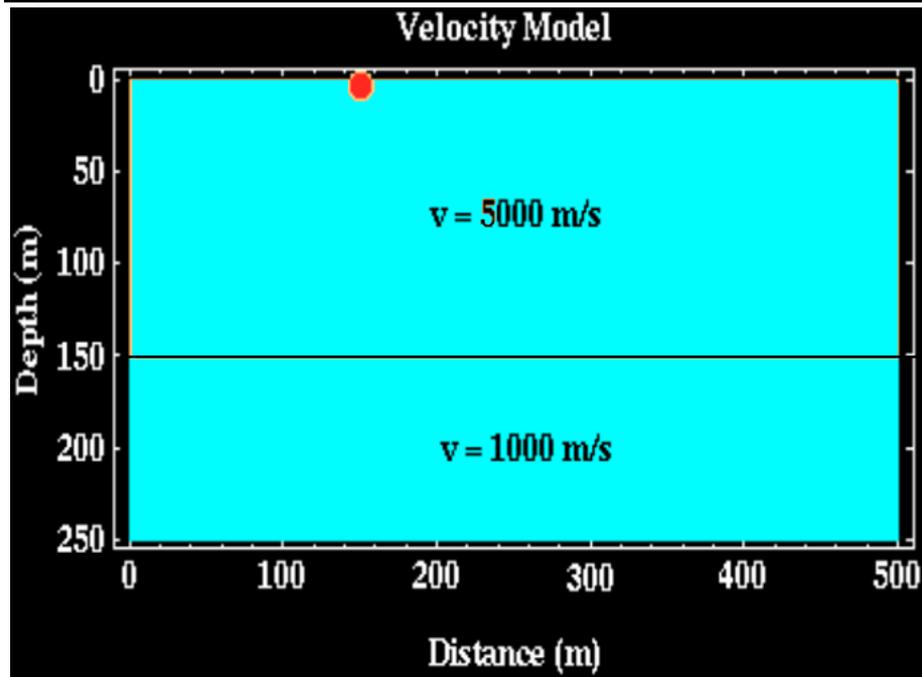
Le phénomène de réflexion totale est exploité dans la fibre optique afin de guider sans perte les ondes lumineuses dans le matériau.

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

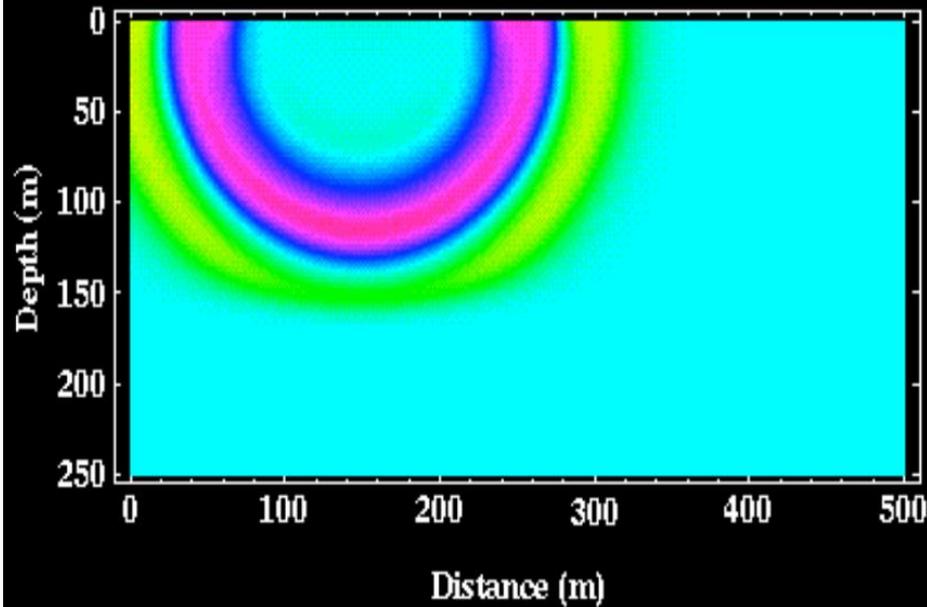
Une onde sismique qui évolue dans un premier milieu puis dans un second milieu **se comporte comme un rayon lumineux** :

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

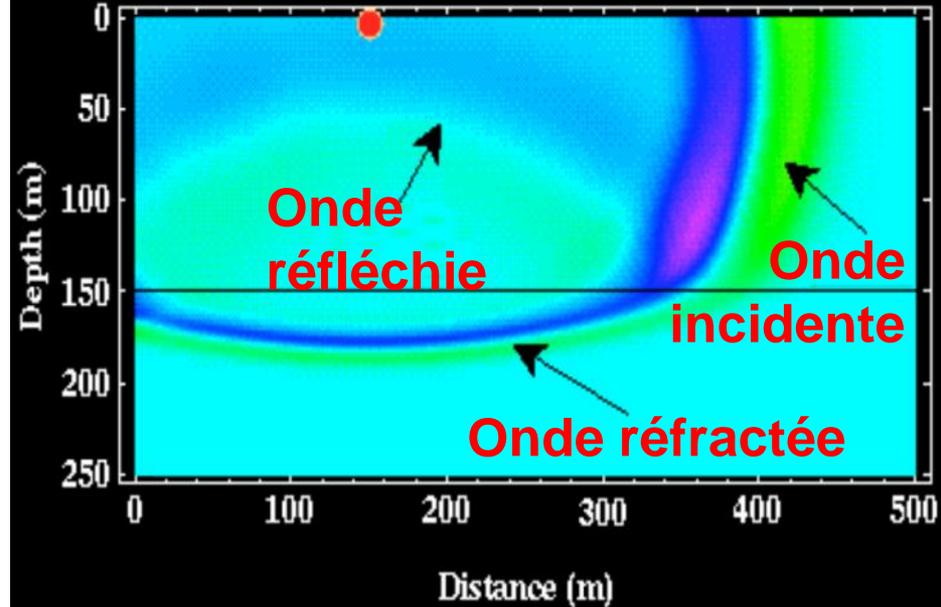
c/ Généralisation des lois de Snell-Descartes aux ondes sismiques de volume



Time = 50 ms



Time = 75 ms



☛ Notion de RAI SISMIQUE :

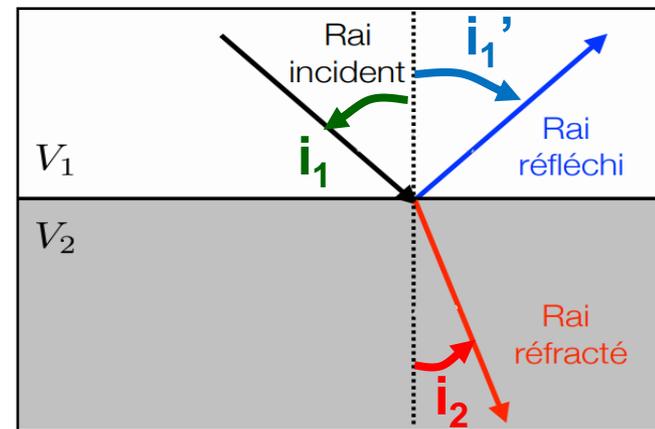
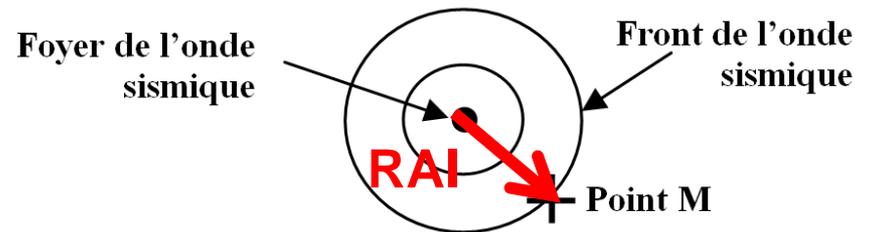
Vecteur matérialisant la direction de propagation de l'onde sismique, **orienté depuis le foyer** de l'onde **jusqu'au point M atteint** par l'onde.

☛ Lois de Snell-Descartes sur la réflexion : $i_1' = -i_1$

☛ Lois de Snell-Descartes sur la réfraction :

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

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



Notion de RAI SISMIQUE :

Vecteur matérialisant la direction de propagation de l'onde sismique, **orienté depuis le foyer** de l'onde **jusqu'au point M atteint** par l'onde.

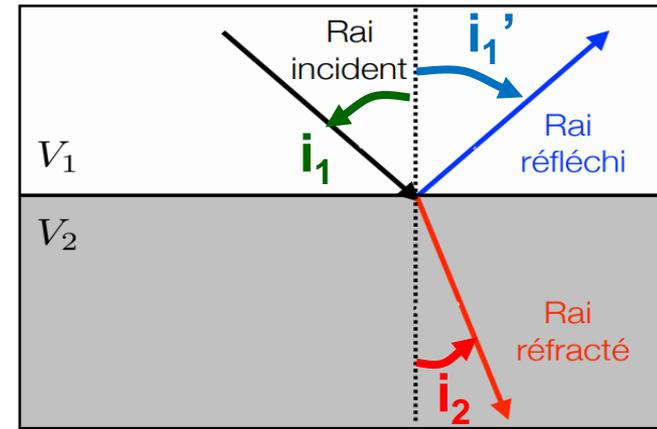
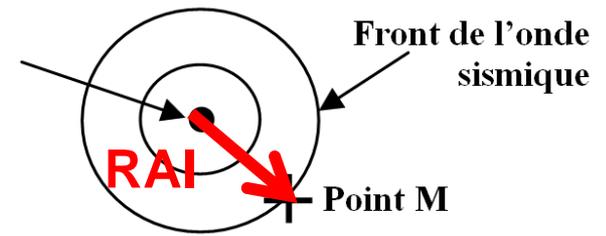
Lois de Snell-Descartes sur la réflexion : $i_1' = -i_1$

Lois de Snell-Descartes sur la réfraction :

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

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

Foyer de l'onde sismique



Le 8 octobre 1909, un séisme se produisit près de Zagreb en Croatie, le foyer étant très près de la surface. Le scientifique Andrija Mohorovičić (1857- 1936) analysa attentivement les enregistrements réalisés et constata un curieux phénomène : alors qu'un seul train d'ondes P a été émis au niveau du foyer, un sismographe situé environ 40 km plus loin a détecté l'arrivée de plusieurs trains d'ondes P. En cherchant la cause de cette répétition, il en déduisit qu'il existait une limite entre la croûte terrestre et le manteau supérieur appelé aujourd'hui « discontinuité de Mohorovicic » ou « Moho ».

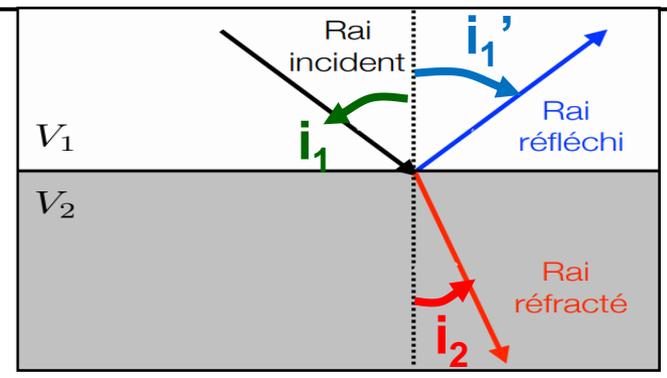
☞- Dans la croûte terrestre, les ondes P se propagent à environ 6 km.s^{-1} alors que dans le manteau supérieur, elles se propagent à 8 km.s^{-1} . Un rai réfracté se rapproche-t-il ou s'éloigne-t-il de la normale ?

Lois de Snell-Descartes sur la réflexion : $i_1' = -i_1$

Lois de Snell-Descartes sur la réfraction :

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

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



- Dans la croûte terrestre, les ondes P se propagent à environ 6 km.s^{-1} alors que dans le manteau supérieur, elles se propagent à 8 km.s^{-1} . Un rai réfracté se rapproche-t-il ou s'éloigne-t-il de la normale ?

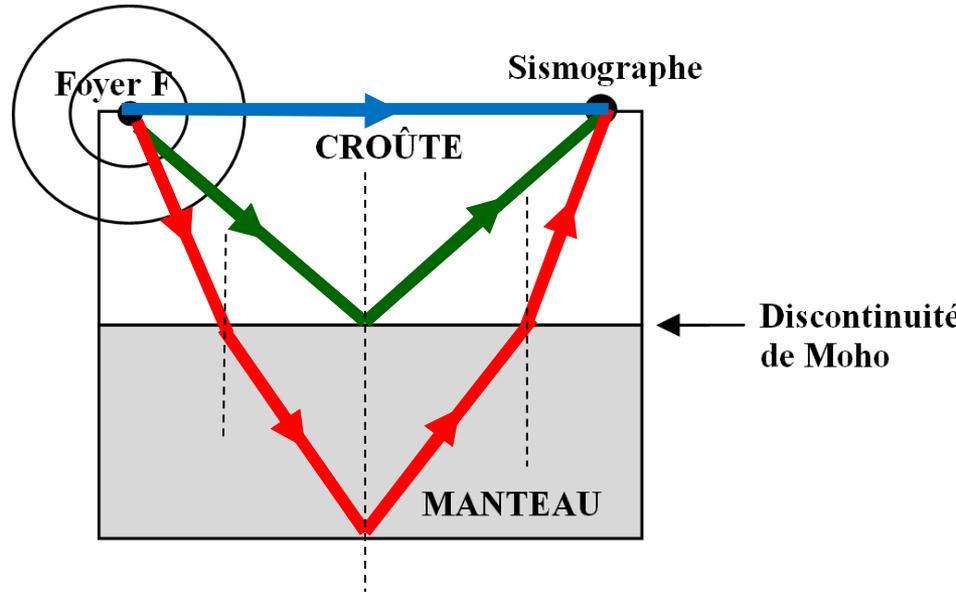
Ici, $v_1 < v_2$

$\Leftrightarrow v_1 / v_2 < 1$

$\Leftrightarrow \sin(i_1) / \sin(i_2) < 1$

$\Leftrightarrow i_1 < i_2$

Le rai réfracté **s'éloigne de la normale**



- Compléter la figure ci-contre en indiquant les différents trajets que peuvent emprunter les ondes P pour parvenir au sismographe.

Onde directe / Onde réfléchie / Onde réfractée – réfléchie – réfractée

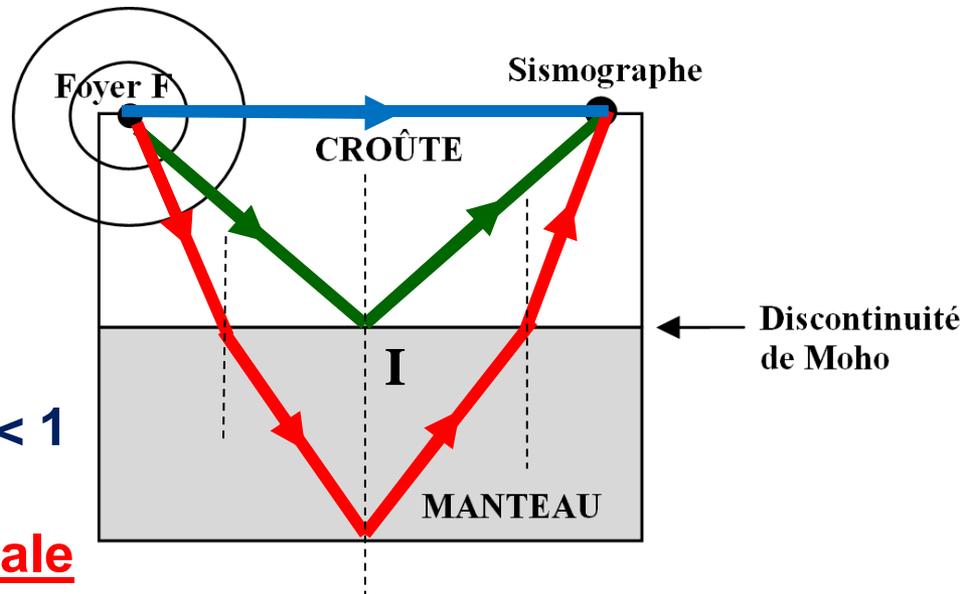
- Le train d'ondes P qui se réfléchit met 12,7 secondes pour être détecté par le sismographe. En déduire l'épaisseur e de la croûte terrestre.

☞- Dans la croûte terrestre, les ondes P se propagent à environ 6 km.s^{-1} alors que dans le manteau supérieur, elles se propagent à 8 km.s^{-1} . Un rai réfracté se rapproche-t-il ou s'éloigne-t-il de la normale ? Ici, $v_1 < v_2 \Leftrightarrow v_1 / v_2 < 1$

$$\Leftrightarrow \sin(i_1) / \sin(i_2) < 1$$

$$\Leftrightarrow i_1 < i_2$$

Le rai réfracté **s'éloigne de la normale**



☞- Compléter la figure ci-contre en indiquant les différents trajets que peuvent emprunter les ondes P pour parvenir au sismographe.

Onde directe / Onde réfléchie / Onde réfractée – réfléchie – réfractée

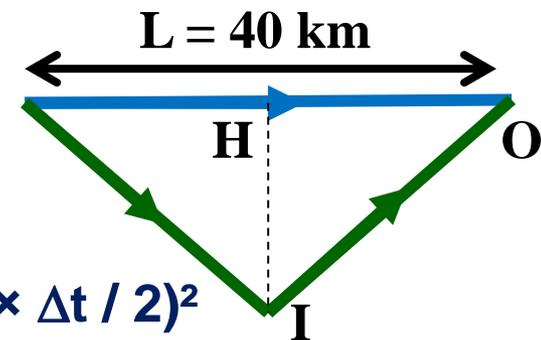
☞- Le train d'ondes P qui se réfléchit met 12,7 secondes pour être détecté par le sismographe. En déduire l'épaisseur e de la croûte terrestre.

La durée $\Delta t = 12,7 \text{ s}$ est le temps nécessaire pour parcourir le trajet vert, soit la distance 2 OI à la célérité $v = 6 \text{ km.s}^{-1}$: **$2 \text{ OI} = v \times \Delta t$**

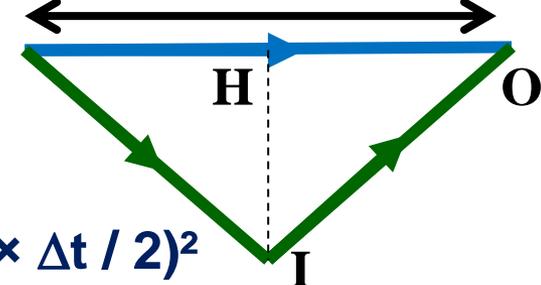
Dans le triangle HIO, **$\text{HI}^2 + \text{HO}^2 = \text{OI}^2 \Leftrightarrow e^2 + (\text{L}/2)^2 = (v \times \Delta t / 2)^2$**

Soit **$e = \sqrt{(v \times \Delta t / 2)^2 - (\text{L}/2)^2}$** A.N. : **$e = \sqrt{(6 \times 12,7 / 2)^2 - (40 / 2)^2}$**

Soit **$e = 3.10^1 \text{ km}$**



La durée $\Delta t = 12,7 \text{ s}$ est le temps nécessaire pour parcourir le trajet vert, soit la distance 2 OI à la célérité $v = 6 \text{ km.s}^{-1}$: $2 \text{ OI} = v \times \Delta t$



Dans le triangle HIO, $\text{HI}^2 + \text{HO}^2 = \text{OI}^2 \Leftrightarrow e^2 + (L/2)^2 = (v \times \Delta t / 2)^2$

Soit $e = \sqrt{(v \times \Delta t / 2)^2 - (L/2)^2}$ $e = \sqrt{(6 \times 12,7 / 2)^2 - (40 / 2)^2}$ $e = 3.10^1 \text{ km}$

☞- Pourquoi peut-on observer un phénomène de réflexion totale avec l'association croûte / manteau ? Car la célérité des ondes sismiques est plus grande dans le manteau que dans la croûte, donc $i_2 > i_1$.

☞- Si les ondes incidentes arrivent au niveau du Moho avec un angle d'incidence égal à l'angle limite de réflexion totale $i_{1 \text{ lim}}$, l'onde réfractée se déplace le long du Moho à la vitesse de propagation dans le manteau supérieur et produit en continu des ondes réfractées qui remontent à la surface, toutes avec le même angle de réfraction. Que vaut cet angle de réfraction ?

Incident **vert** / Réfracté **rouge** :

$$\frac{\sin(i_{1 \text{ lim}})}{v_1} = \frac{\sin(90^\circ)}{v_2}$$

Incident **rouge** / Réfracté **bleu** :

$$\frac{\sin(90^\circ)}{v_2} = \frac{\sin(?)}{v_1}$$

? = $i_{1 \text{ lim}}$

