

- La lumière : modèles et applications -

Notions et contenus	Capacités exigibles
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.

Les technologies reposant sur la connaissance et la maîtrise de la lumière sont devenues incontournables : écrans, télécommunications, imagerie, lasers ... Qu'elle soit visible ou invisible, qu'est ce que la lumière ?

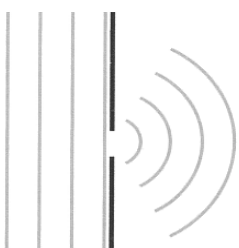
Depuis l'Antiquité, elle a été un vaste sujet d'étude pour bon nombre de philosophes, de mathématiciens et de physiciens parmi lesquels on trouve des noms tous aussi célèbres les uns que les autres : Euclide, Aristote, Ptolémée, Descartes, Huygens, Newton, Fresnel, Maxwell, Planck, Einstein ... Une vive controverse a même opposé deux théories du milieu du 17^{ème} siècle à la fin du 19^{ème} siècle ; ce n'est finalement qu'au début du 20^{ème} siècle qu'un consensus a été trouvé sur la question.

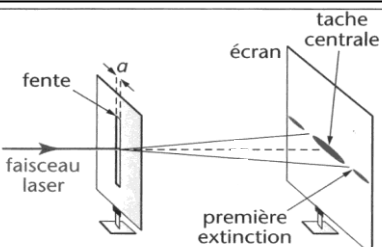
Le but de ce chapitre est de comprendre comment on peut décrire simplement la lumière puis d'étudier quelques phénomènes caractéristiques de celle-ci, comme la réflexion et la réfraction.

I- La dualité onde-particule de la lumière

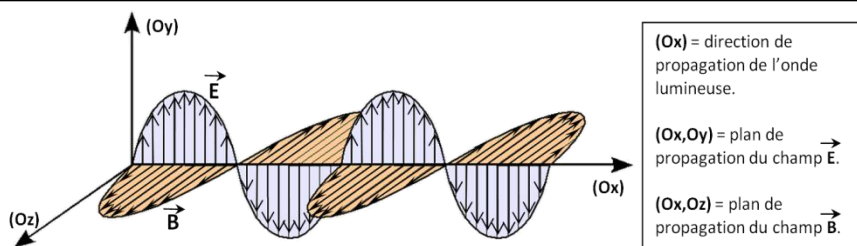
Si la question sur la nature de la lumière a longtemps été une énigme pour les scientifiques, c'est parce qu'**un seul modèle ne suffit pas pour interpréter la totalité des phénomènes** qui la mette en jeu. En réalité, deux modèles sont nécessaires, le premier permettant de décrire certains phénomènes et le second permettant d'en décrire d'autres.

1) Théorie ONDULATOIRE de la lumière

	Doc 1 : Onde périodique à la surface de l'eau passant par une petite ouverture Lorsqu'une onde mécanique atteint un obstacle dont l'ouverture est suffisamment petite (typiquement du même ordre de grandeur ou plus petite que la longueur d'onde de l'onde mécanique), on observe que l'onde émerge de l'ouverture en atteignant des zones qui étaient « cachées » par l'obstacle : ce phénomène s'appelle _____ et il est _____.
---	--

	Doc 2 : Lumière laser passant par une petite ouverture
--	--

☛ La lumière : quel type d'ONDES ?

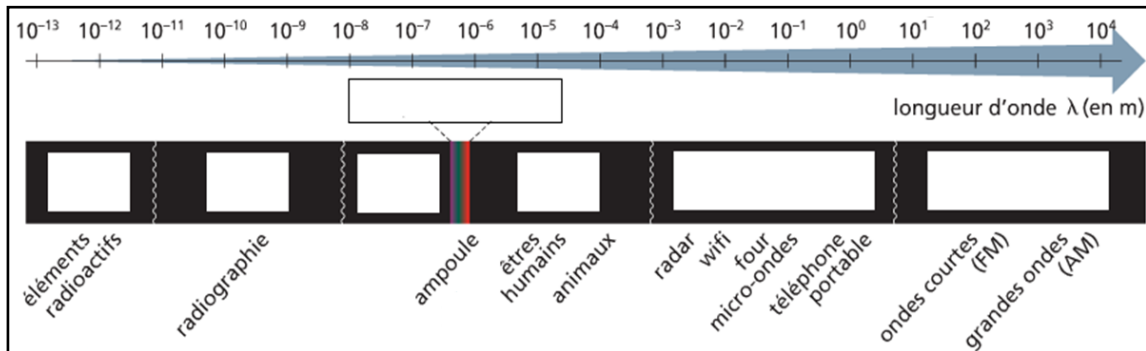


⇒ Caractéristiques :

-
-

⇒ Ordre de grandeur à connaître : Dans le vide et dans l'air, la célérité de la lumière vaut _____

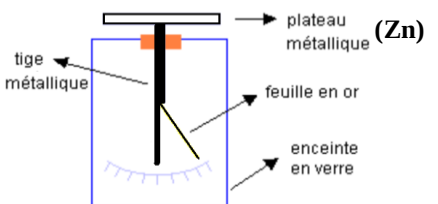
On donne des noms différents aux ondes électromagnétiques selon leur longueur d'onde dans le vide



2) Théorie PARTICULAIRE de la lumière

a/ Première approche avec l'effet photoélectrique

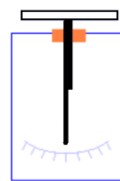
L'effet photoélectrique a été étudié en 1887 par Heinrich Hertz (1857-1894). Il a pour cela utilisé un électroscope, un appareil qui met en évidence la présence de charges électriques. Il s'agit d'une boîte contenant une tige métallique verticale immobile sur laquelle est fixée une feuille d'or légère et mobile, la tige métallique verticale étant reliée à un plateau métallique horizontal situé à l'extérieur de la boîte.



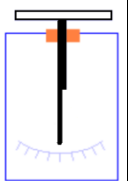
➔ Etape ① : une plaque de zinc est fixée sur le plateau de l'électroscope puis mise en contact avec un bâton d'ébonite préalablement chargé négativement par frottement. On retire alors le bâton d'ébonite.



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



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



Lien Youtube : <https://youtu.be/HkCrkdTK7GQ> (voir QR-code ci-dessous)

☛ Qu'est ce que l'EFFET PHOTOELECTRIQUE ?



Pour déloger un électron d'une surface métallique, il faut lui **communiquer une certaine quantité d'énergie**. Or, si on considère la lumière comme une onde, celle-ci transporte justement de l'énergie qu'elle peut communiquer aux électrons : selon ce modèle, **quelle que soit la lumière incidente, tous les électrons devraient donc absorber de l'énergie au fur et à mesure que chaque front d'onde arrive à la surface du métal** et, au bout d'un temps plus ou moins long, être éjectés. Mais ce n'est par exemple pas le cas avec la lumière blanche dans le cas du zinc : **la théorie ONDULATOIRE est donc mise en défaut !**

D'autre part, on montre que lorsque l'effet photoélectrique est observé, la vitesse à laquelle les électrons sont éjectés ne dépend pas de l'intensité de l'onde lumineuse : ceci est un autre résultat contradictoire avec la théorie ondulatoire de la lumière. En effet, imaginons des ballons situés sur un ponton subissant les assauts de la houle (onde périodique) : pour une célérité donnée, plus l'intensité de la houle (c'est-à-dire son amplitude) est grande, plus les ballons sont déplacés avec une grande vitesse ! Et bien ce n'est pas le cas des électrons subissant l'effet photoélectrique ...

b/ Interprétation : le modèle du photon

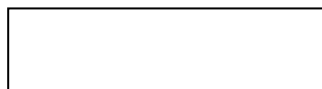
Pour interpréter les observations des Etapes ② et ③, Albert Einstein (1879-1955) reprend en 1905 le modèle particulaire de la lumière abandonné à l'époque en faveur du modèle ondulatoire. Il l'associe à l'hypothèse de quantification de l'énergie émise par Max Planck (1858-1947). C'est d'ailleurs pour ses travaux sur l'effet photoélectrique et non pas pour sa théorie de la relativité restreinte qu'Albert Einstein obtint le prix Nobel de Physique en 1921 ...

☛ **Le modèle du PHOTON** : Un rayonnement lumineux de **fréquence ν** est un ensemble de **PHOTONS** :

-
-
-

➔ Retour sur l'expérience de Hertz :

Pour arracher un électron situé à la surface d'un métal, il faut lui apporter une énergie minimale : cette énergie est appelée **TRAVAIL d'EXTRACTION** et elle est notée W_e . Si un effet photoélectrique est observé, c'est donc qu'un photon a, au minimum, apporté cette énergie W_e au métal ; si le photon apporte plus que cette énergie W_e , l'excès d'énergie est alors emporté par l'électron sous forme d'énergie cinétique E_c .



On appelle alors **fréquence SEUIL** (respectivement **longueur d'onde SEUIL**) la **fréquence MINIMALE** (respectivement la **longueur d'onde MAXIMALE**) que doit avoir un photon pour qu'on observe l'effet photoélectrique.

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

c/ Autres interactions lumière/matière

LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules photovoltaïques les plus courantes sont constituées de deux couches de silicium, un matériau semi-conducteur. Mais ces deux couches ont des propriétés différentes : dans la première couche, certains atomes de silicium ont été remplacés par des atomes de phosphore (on dit qu'elle est dopée N) alors que dans la deuxième couche, certains atomes de silicium ont été remplacés par des atomes de bore (on dit qu'elle est dopée P). Cet assemblage particulier permet de créer au sein du matériau un champ électrique $\vec{E}$ orienté de la couche N vers la couche P.

Quand on éclaire cet assemblage de deux couches, certains électrons sont arrachés des atomes de silicium par effet photoélectrique, laissant derrière eux des trous positifs. Tout se passe alors comme si le matériau était constitué d'électrons et de trous positifs libres de se déplacer au travers des atomes de silicium. Les électrons et les trous positifs font tout pour essayer de se recombiner mais du fait de la présence du champ électrique $\vec{E}$ au sein du matériau, ils sont soumis à une force électrique $\vec{F} = q \times \vec{E}$ qui oblige les électrons et les trous à aller dans deux sens opposés. Le seul moyen qu'ont les électrons pour aller se recombiner aux trous positifs est alors de passer par un circuit électrique extérieur, ce qui génère un courant électrique dans celui-ci. C'est ainsi que les cellules photovoltaïques transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique.

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

Lumière



Couche N	Si	Si	Si	Si
	Si	P	Si	Si
	Si	Si	Si	P
Couche P	Si	B	Si	Si
	Si	Si	Si	Si
	Si	Si	B	Si



Si	Si	Si	Si
Si	P	Si	Si
Si	Si	Si	P
Si	B	Si	Si
Si	Si	Si	Si
Si	Si	B	Si

☞- Sur le schéma de droite, indiquer comment les électrons se déplacent dans le circuit électrique, puis le sens du courant électrique.

La PHOTOIONISATION de l'atmosphère

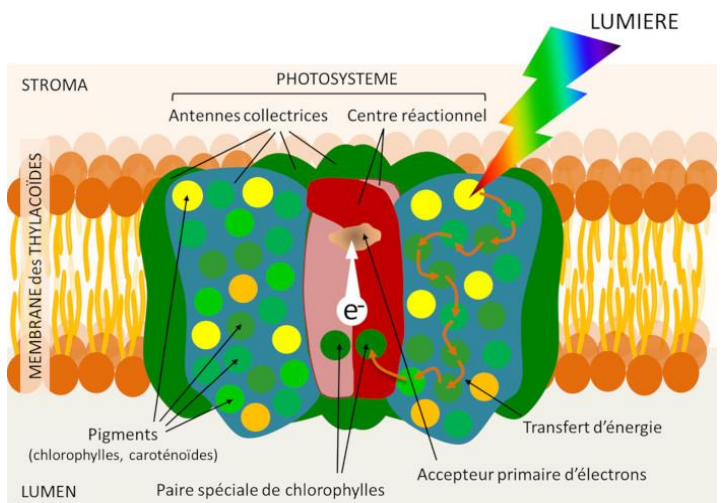
L'ionosphère d'une planète est une couche de son atmosphère caractérisée par une ionisation partielle des gaz : dans le cas de la Terre, elle se situe entre environ 60 et 1 000 km d'altitude. C'est le rayonnement ultraviolet solaire qui est à l'origine des ions présents dans l'ionosphère ; les molécules 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 celles des composés obtenus après photoionisation.

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 ?

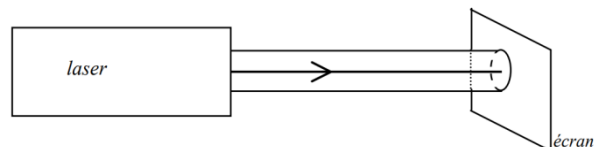
II- Description géométrique de la propagation d'une onde lumineuse

Le but de cette partie est de décrire simplement la façon dont se propage la lumière dans un milieu **transparent** (qui n'absorbe pas), **homogène** (mêmes propriétés physiques en tout point) et **isotrope** (mêmes propriétés physiques dans toutes les directions de l'espace).

1) Cadre de l'étude

a/ Modèle du rayon lumineux

Eclairons un écran à l'aide d'une source laser : la figure observée sur l'écran est une tache circulaire. Si de la poussière est présente sur le trajet du **FAISCEAU lumineux**, celle-ci diffuse la lumière dans toutes les directions et nous pouvons visualiser le faisceau : c'est un cylindre.

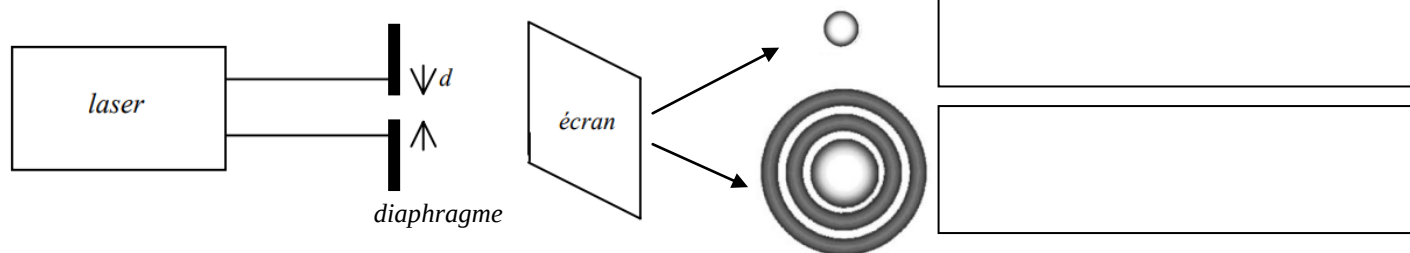


✎ Quelle différence y a-t-il entre un RAYON lumineux et un FAISCEAU lumineux ?

On se placera dans la suite dans le cadre de l'**Approximation de l'optique géométrique** qui consiste à **négliger tout aspect ondulatoire de la lumière**, comme la diffraction ou les interférences.

On peut alors se demander à quelle condition cette approximation de l'optique géométrique est valable ; pour cela, essayons d'isoler un rayon lumineux en suivant le protocole ci-dessous.

► Expérience : on place un diaphragme (ouverture circulaire de diamètre réglable) sur le trajet d'un faisceau laser et on diminue progressivement la taille du diaphragme.



☛ Validité de l'Approximation de l'optique géométrique : l'Approximation de l'optique géométrique n'est valable que si les **dimensions du problème** (taille de la fente au travers de laquelle la lumière passe, taille de l'obstacle qui intercepte la lumière ...) sont **très grandes** devant la **longueur d'onde λ** de la lumière utilisée.

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

•

• Principe de FERMAT :

• Principe de RETOUR INVERSE DE LA LUMIERE :

☞ - Quelle est la forme de la trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu transparent, homogène et isotrope ?

b/ Indice optique (ou indice de réfraction)

Dans un milieu transparent, homogène et isotrope, **la célérité d'une onde lumineuse peut dépendre de sa fréquence** : on dit alors que le milieu est dispersif. D'autre part, **la célérité d'une onde lumineuse est généralement différente dans deux milieux transparents et homogènes différents**. Pour caractériser la célérité de l'onde lumineuse, on introduit la notion d'indice optique, également appelé indice de réfraction.

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



- L'indice optique d'un milieu est **toujours supérieur ou égal à 1** : par exemple, celui de l'air sec vaut environ 1,0003, celui de l'eau liquide environ 1,33 et celui du verre environ 1,5.

- Un milieu 1 est dit **plus réfringent** qu'un milieu 2 si $n_1 > n_2$.

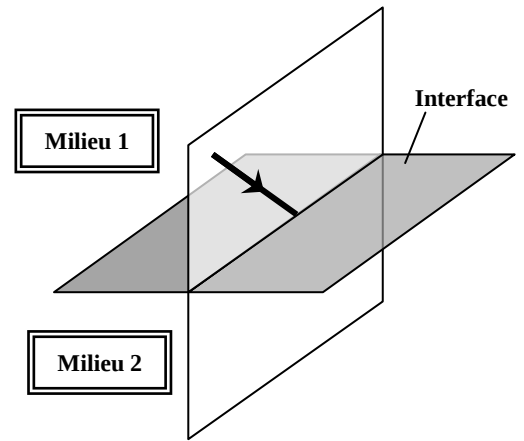
☞ - La fréquence ν d'une onde ne dépendant pas du milieu de propagation, exprimer la **longueur d'onde λ** d'une onde lumineuse dans un milieu d'indice **n** en fonction de sa **longueur d'onde λ_0** dans le vide.

2) Lois de Snell-Descartes

Ces lois, découvertes expérimentalement par le savant arabe Ibn Sâhl au X^{ème} siècle et retrouvées par l'allemand Snell et le français Descartes au XVII^{ème} siècle caractérisent le comportement d'un rayon lumineux rectiligne à l'interface entre deux milieux homogènes et transparents.

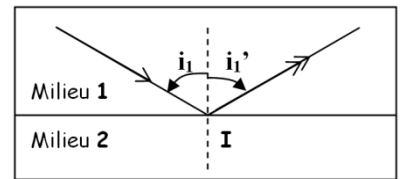
Les notations utilisées seront les suivantes :

- le **DIOPTRE** : surface de séparation entre les deux milieux ;
- le **RAYON INCIDENT** : rayon qui arrive sur le dioptre ;
- le **POINT d'INCIDENCE I** : point du dioptre où arrive le rayon incident ;
- la **NORMALE** : droite perpendiculaire à la surface du dioptre et passant par le point d'incidence ;
- le **PLAN d'INCIDENCE** : plan contenant le rayon incident et la normale.
- l'**ANGLE d'INCIDENCE i_1** : angle orienté entre la normale et le rayon incident ;



a/ Réflexion de la lumière

☛ Définition :



☛ Lois de Snell-Descartes de la réflexion :

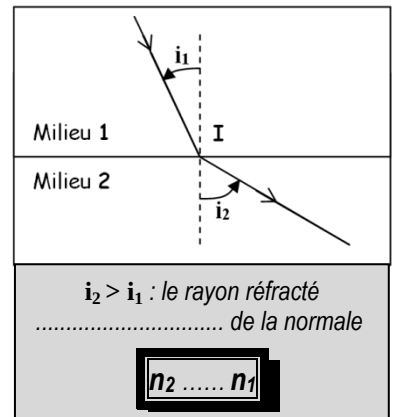
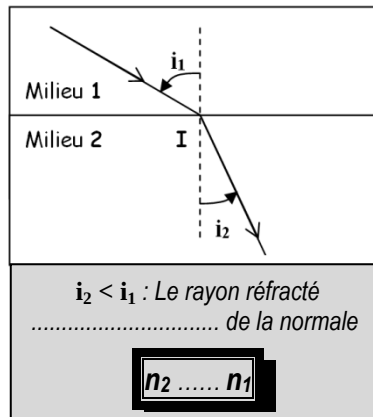
-
-



Pour simplifier les études, on pourra travailler avec des **angles NON ORIENTES** qui sont tous de **signe positif**. La 2^{ème} loi de Snell-Descartes sur la réflexion s'écrit alors : $i_1' = i_1$.

b/ Réfraction de la lumière

☛ Définition :



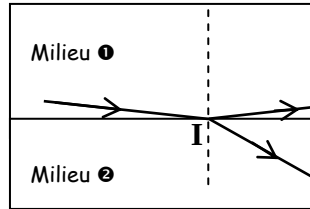
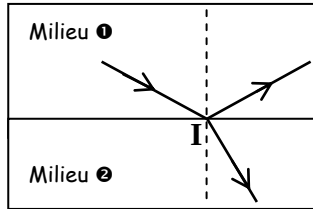
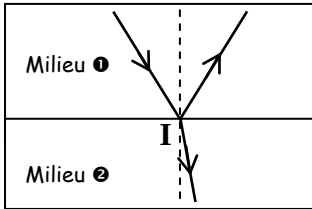
☛ Lois de Snell-Descartes de la réfraction :

-
-

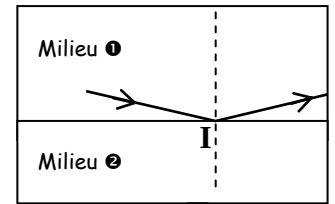
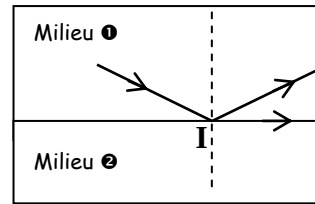
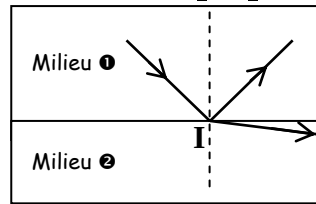
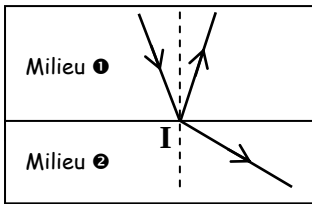
☞- Que vaut l'angle de réfraction pour un rayon incident perpendiculaire au dioptre ?

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

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



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



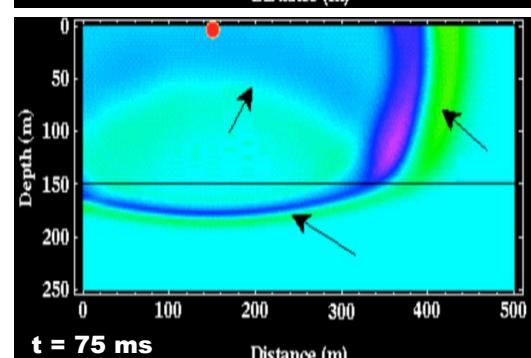
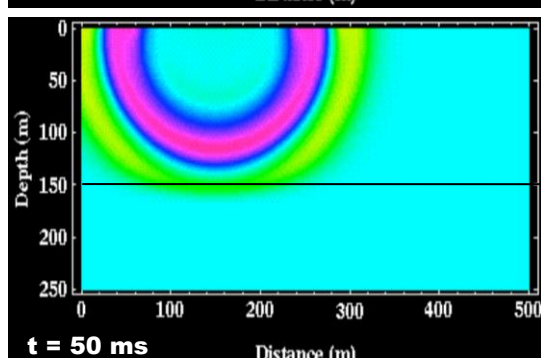
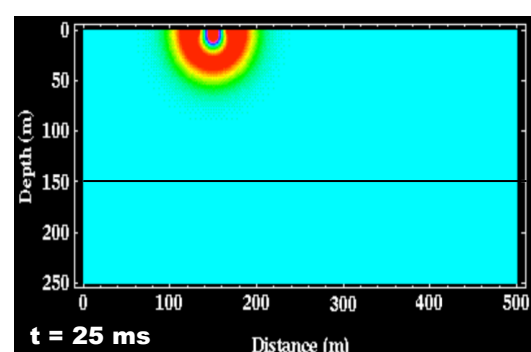
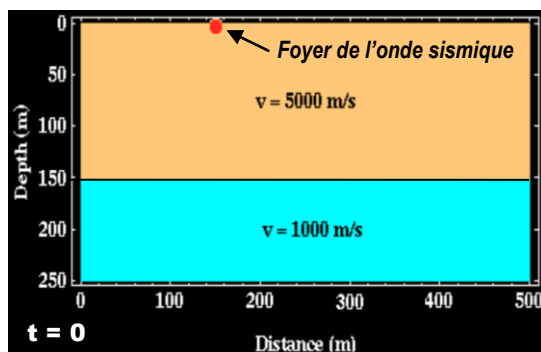
☞ - Application numérique : Calculer l'angle d'incidence limite dans le cas du dioptre air/eau { $n(\text{air}) = 1,0$; $n(\text{eau}) = 1,33$ }.



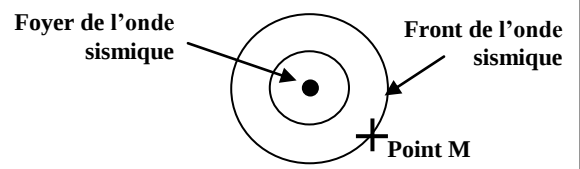
Le phénomène de réflexion totale est exploité dans la fibre optique afin de guider sans perte les ondes lumineuses dans le matériau.

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

Lorsqu'une onde sismique évolue dans un premier milieu et qu'elle rencontre un deuxième milieu de nature différente, elle se comporte comme un rayon lumineux à l'interface entre deux milieux homogènes et transparents : on observera aussi un phénomène de réflexion et de réfraction de l'onde sismique et les lois de Snell-Descartes s'appliqueront.

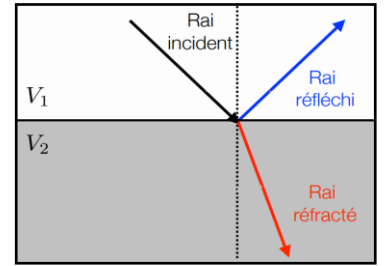


☛ Notion de RAI SISMIQUE :



☛ Lois de Snell-Descartes sur la réflexion :

☛ Lois de Snell-Descartes sur la réfraction :



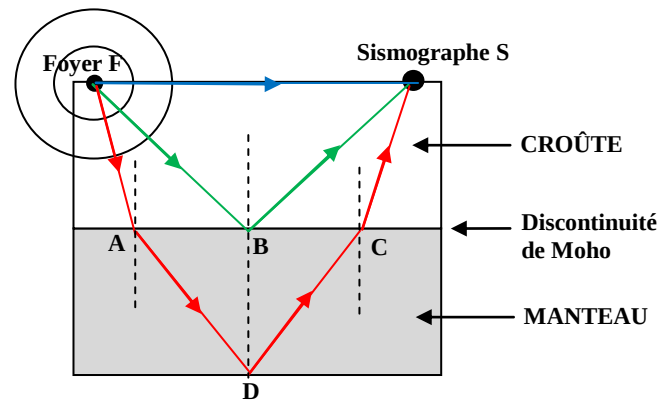
Le 8 octobre 1909, un séisme se produisit près de Zagreb en Croatie, le foyer étant très près de la surface. Le scientifique Andrija Mohorovičić (1857- 1936) analysa attentivement les enregistrements réalisés et constata un curieux phénomène : alors qu'un seul train d'ondes P a été émis au niveau du foyer, un sismographe situé 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 ».

☞- Pour expliquer ces observations, on propose les trois trajets des ondes P représentés sur le schéma ci-contre. Quel(s) phénomène(s) observe-t-on pour chacun d'eux ?

- Trajet **FS** :

- Trajet **FBS** :

- Trajet **FADCS** :



☞- 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.

☞- 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.

☞- Si les ondes incidentes (notées **FM** sur le schéma) arrivent au niveau du Moho avec un angle d'incidence égal à l'angle limite de réflexion totale i_{lim} , l'onde réfractée **MP** se déplace le long du Moho à la vitesse v_M et produit en continu des ondes réfractées (**NR**, **OT** ...) qui remontent à la surface avec un angle de réfraction égal à i_{lim} . Exprimer puis calculer i_{lim} .

