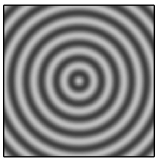


FSAB1203 - Physique 3

Partie "Ondes"

CM4
Polarisation, réflexion, réfraction

Matière traitée dans le 4ème module d'apprentissage de physique 3

1. Concept de polarisation d'une onde transverse
(électromagnétique, mécanique,...)

⟹ **polarisation linéaire**
⟹ **polarisation circulaire**
⟹ **polarisation elliptique**

2. Réflexion et réfraction d'une onde à l'interface
entre deux milieux non absorbants (diélectriques)

⟹ **ondes transverses électromagnétiques (labo + cours)**
⟹ **ondes mécaniques (cours)**

+ Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

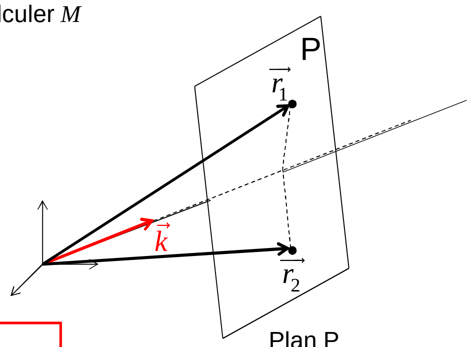
0. Onde plane monochromatique __scalaire__ : le cas général

$$\boxed{M(x,y,z,t) = A \cdot \sin(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$$

$\vec{r} = (x,y,z)$: les coordonnées de l'endroit où on veut calculer M
t le temps auquel on veut calculer M

sinusoïdale (monochromatique)
fréquence angulaire ω
longueur d'onde λ
Amplitude A

➡ fréquence $f = \omega/2\pi$
période $T = 1/f$
vitesse $c = \lambda\,/T = \lambda.f$
nombre d'onde $k = 2\pi/\lambda$



Le __vecteur__ d'onde $\vec{k}$:
sa direction est la direction de propagation;
sa norme vaut $k = 2\pi/\lambda$.

Plan P
perpendiculaire à $\vec{k}$

$$\Rightarrow \vec{k}\vec{r_1} = \vec{k}\vec{r_2}$$

$\Rightarrow$ M a la même valeur (à un temps donné) pour tous les points du plan P

$\Rightarrow$ onde PLANE

0. Onde plane monochromatique __scalaire__ : le cas général

$$\boxed{M(x,y,z,t) = A \cdot \sin(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$$

$\vec{r} = (x,y,z)$: les coordonnées de l'endroit où on veut calculer M
t le temps auquel on veut calculer M

Est-ce bien une onde ?

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \overset{?}{=} \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 M}{\partial t^2}$$

(Démonstration au tableau)

Et si l'onde est vectorielle et non scalaire?

$$M(x,y,z,t) \mapsto \vec{M}(x,y,z,t)$$

Il faut spécifier l'orientation du vecteur $\vec{M}$ au cours du temps.

➔ le concept de polarisation émerge.

1. Polarisation

Concept qui sert à donner une information sur la direction d'oscillation d'un vecteur associé à une onde transverse.

Onde électromagnétique : le vecteur champ électrique

Le type de polarisation indique la forme du lieu parcouru par l'extrémité du vecteur champ électrique au cours du temps, à un endroit donné de l'espace.

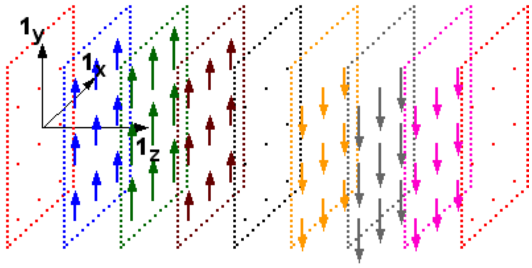
1. Polarisation

Concept qui sert à donner une information sur la direction d'oscillation d'un vecteur associé à une onde transverse.

Onde électromagnétique : le vecteur champ électrique

Exemple:

Polarisation linéaire



$$\vec{E}(\vec{r},t) = A\cdot\vec{1_y}\cdot\sin(kz-\omega t) = A\cdot\vec{1_y}\cdot\sin(k\cdot\vec{1_z}\vec{r}-\omega t)$$
$$= A\cdot\vec{1_y}\cdot\sin(\vec{k}\vec{r}-\omega t) = \vec{A}\cdot\sin(\vec{k}\vec{r}-\omega t)$$

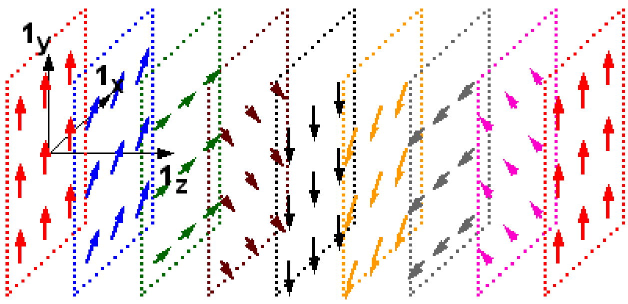
direction du champ électrique **direction de propagation**

1. Polarisation

Concept qui sert à donner une information sur la direction d'oscillation d'un vecteur associé à une onde transverse.

Onde électromagnétique : le vecteur champ électrique

Polarisation elliptique

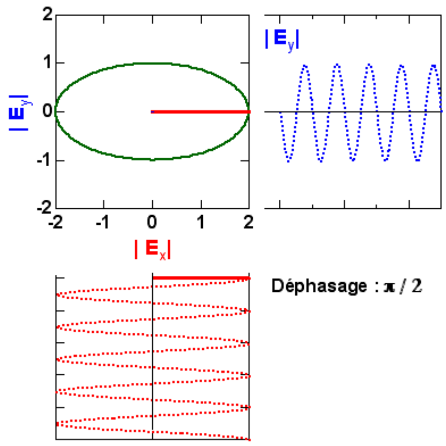


? Représentation mathématique ?

1. Polarisation

Représentation mathématique d'un état de polarisation elliptique

Le lieu décrit par l'extrémité du vecteur champ électrique <u>à un endroit donné de l'espace</u> est une ellipse



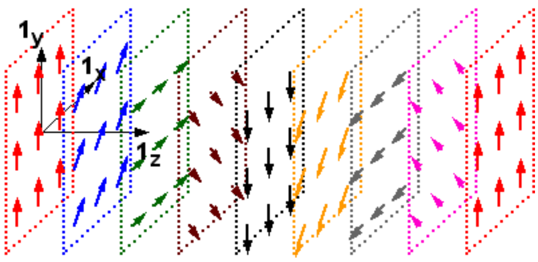
$$\vec{E}(t) = A_x \cdot \sin(\omega t)\,\overrightarrow{1_x} + A_y \cdot \sin(\omega t + \phi)\,\overrightarrow{1_y}$$

où $\overrightarrow{1_x}$ et $\overrightarrow{1_y}$ sont deux vecteurs de base perpendiculaires à $\vec{k}$

1. Polarisation

Représentation mathématique d'un état de polarisation elliptique

Polarisation elliptique



$$\vec{E}(\vec{r},t) = A_x \cdot \sin(\vec{k}\,\vec{r} - \omega t)\,\overrightarrow{1_x} + A_y \cdot \sin(\vec{k}\,\vec{r} - \omega t + \phi)\,\overrightarrow{1_y}$$

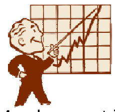
où $\overrightarrow{1_x}$ et $\overrightarrow{1_y}$ sont deux vecteurs de base perpendiculaires à $\vec{k}$

<u>Cas particuliers</u>:

$\phi = n\,\pi$: polarisation linéaire

$\phi = \pi / 2$ et $A_x = A_y$: polarisation circulaire

1. Polarisation



Mon laser est-il polarisé?
Cinéma 3D
Biréfringence

Dans la nature, les ondes émises par une source ne sont pas nécessairement polarisées; elles peuvent être polarisées à l'aide de dispositifs simples (polariseurs), ou suite à leur interaction avec la matière.

Certaines sources émettent des ondes polarisées (antennes, certains lasers,…)

Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

Etienne Louis Malus; 1775 (Paris) -1812 (Paris)

Ecole polytechnique
Ingénieur dans l'armée napoléonienne
Campagnes du Rhin, de Syrie et d'Egypte ⇒ contracte la peste
Divers postes d'enseignant
Recherches en optique
Meurt à 37 ans des suites de sa maladie

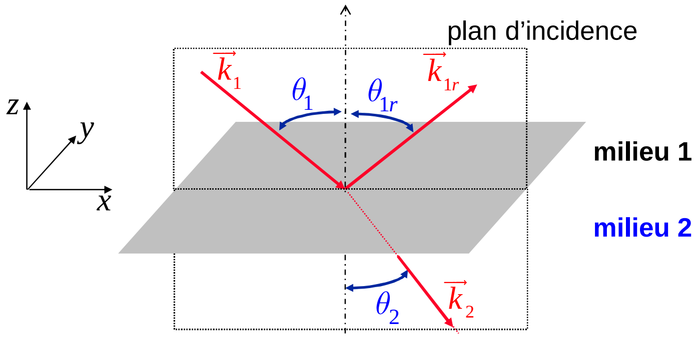
*** 1808, jardins du Luxembourg: Observe un changement de polarisation de la lumière du soleil couchant se reflétant dans les vitres du château**

*** "croit" à la théorie corpusculaire de la lumière ⇒ les particules lumineuses auraient des côtés, ou encore des pôles ⇒ introduit le mot "polarisation"**

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Questions



1. Qu'est-ce qu'un interface ? Que s'y passe-t-il ? => indice de réfraction
2. Quelles sont les fréquences, longueurs d'onde et directions de propagation des ondes réfléchies et transmises ? => loi de Snell(-Descartes)
3. Quelles sont les amplitudes des ondes réfléchies et transmises ? => lois de Fresnel
(en fonction des caractéristiques de l'onde incidente et de la nature des deux milieux)

2. Réflexion / réfraction

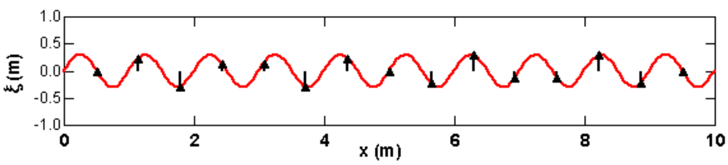
Un cas simple: une onde mécanique transverse

Corde tendue : rappel

Cours précédent: $(\xi \equiv y)$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad \text{où } v = (F/\mu)^{1/2}$$

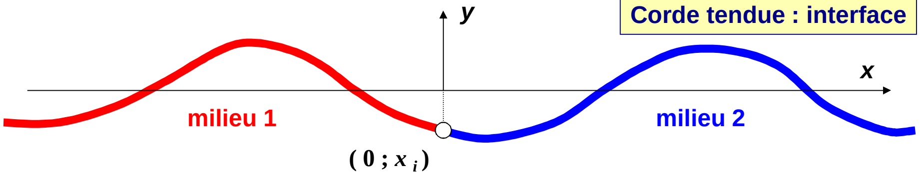
F : tension dans la corde (N)
μ : densité linéique (kg/m)



2. Réflexion / réfraction

Un cas simple:
une onde mécanique transverse

Corde tendue : interface



La tension *F* est constante dans toute la corde, de part et d'autre de l'interface; Les densités linéiques diffèrent de part et d'autre de l'interface.

la vitesse de propagation change à l'interface de $(F / m_{L1})^{1/2}$ **à** $(F / m_{L2})^{1/2}$

Onde incidente : $\xi_1(x,t) = I \sin(k_1 x - \omega t)$ avec $k_1 = 2.\pi / \lambda_1 = \omega / v_1$

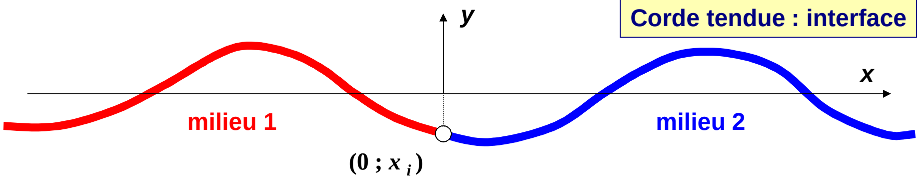
Onde réfléchie : $\xi_{1r}(x,t) = R \sin(- k_1 x - \omega t)$ avec $k_1 = 2.\pi / \lambda_1 = \omega / v_1$

Onde transmise : $\xi_2(x,t) = T \sin(k_2 x - \omega t)$ avec $k_2 = 2.\pi / \lambda_2 = \omega / v_2$

2. Réflexion / réfraction

Un cas simple:
une onde mécanique transverse

Corde tendue : interface



Conditions d'interface :

Continuité du déplacement vertical : $\xi_1(0,t) + \xi_{1r}(0,t) = \xi_2(0,t)$

$\Rightarrow$ $\boxed{I + R = T}$

Continuité de la force verticale exercée sur la corde :

$$F_{y\,1}(0,t) + F_{y\,1r}(0,t) = F_{y\,2}(0,t)$$

Or (cours précédent) : $F_{y\,1}(x,t) = -F \,.\, (\partial \xi / \partial x)$

$\Rightarrow$ $\boxed{k_1 I - k_1 R = k_2 T}$

2. Réflexion / réfraction

Un cas simple:
une onde mécanique transverse

Corde tendue

Réfléchi

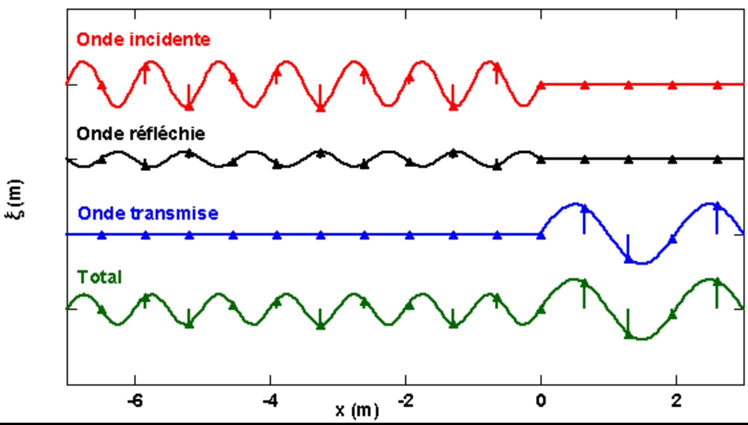
$$R / I = \frac{(k_1 - k_2)}{(k_1 + k_2)}$$

Transmis

$$T / I = \frac{2 k_1}{(k_1 + k_2)}$$

Exemple:

400 g / m — **100 g / m**



2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Indice de réfraction

Onde électromagnétique dans un milieu diélectrique transparent:

Vide	milieu diélectrique transparent (non absorbant), isotrope et linéaire
ε_0	$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$
μ_0	$\mu = \mu_r \mu_0$
$v = c = 1 / (\varepsilon_0 \mu_0)^{1/2}$	$v = 1 / (\varepsilon \mu)^{1/2}$ $= 1 / (\varepsilon_0 \mu_0)^{1/2} / (\varepsilon_r \mu_r)^{1/2}$ $= c / (\varepsilon_r \mu_r)^{1/2}$ $= c / n$

$n = (\varepsilon_r \mu_r)^{1/2}$ **est l'indice de réfraction du milieu**

il est en général > 1 (sauf dans le domaine des rayons-X)

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Indice de réfraction

Onde électromagnétique dans un milieu diélectrique transparent:

Vide	milieu diélectrique transparent (non absorbant), isotrope et linéaire
ε_0	$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$
μ_0	$\mu = \mu_r \mu_0$
$v = c = 1 / (\varepsilon_0 \mu_0)^{1/2}$	$v = 1 / (\varepsilon \mu)^{1/2}$ $= 1 / (\varepsilon_0 \mu_0)^{1/2} / (\varepsilon_r \mu_r)^{1/2}$ $= c / (\varepsilon_r \mu_r)^{1/2}$ $= c / n$
$\lambda.(\omega/2\pi) = c$	$\lambda.(\omega/2\pi) = v$
$\vec{H} = (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} (\overrightarrow{1_k} \times \vec{E})$ $= 1/Z_0 (\overrightarrow{1_k} \times \vec{E})$	$\vec{H} = (\epsilon / \mu)^{1/2} (\overrightarrow{1_k} \times \vec{E})$ $= 1/Z (\overrightarrow{1_k} \times \vec{E})$

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Interface entre deux milieux

En passant

d'un milieu d'impédance Z_1 (ou d'indice de réfraction n_1)

à un milieu d'impédance Z_2 (ou d'indice de réfraction n_2),

l'onde "doit"

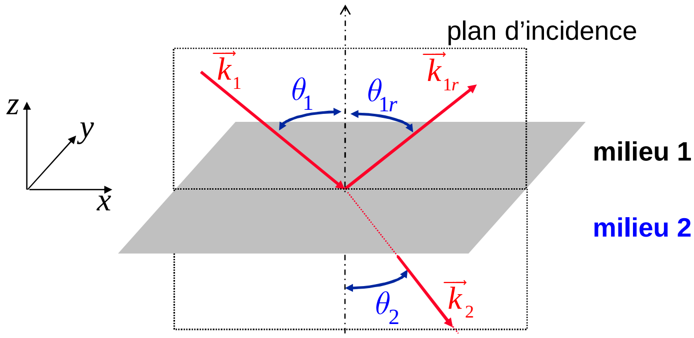
➡ **adapter sa vitesse,**

➡ **tout en respectant les conditions d'interface du champ électromagnétique aux interfaces.**

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conventions

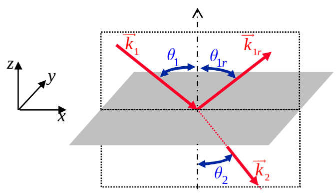


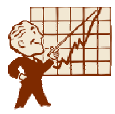
Les angles d'incidence, de réflexion, et de réfraction sont mesurés par rapport à la normale à l'interface.

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Quelques faits





ω se conserve

La fréquence ω se conserve de part et d'autre de l'interface.

Les vecteurs d'onde $\vec{k}_1$, $\vec{k}_{1r}$ et $\vec{k}_2$ appartiennent à un même plan, qui contient aussi la normale à l'interface (plan d'incidence)

$\theta_1 = \theta_{1r}$, **l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence**

$n_1 . \sin(\theta_1) = n_2 . \sin(\theta_2)$ **[loi de Snell-Descartes]**

Démonstrations: notes extraites de May & Cazabat

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Sens physique de la loi de Snell

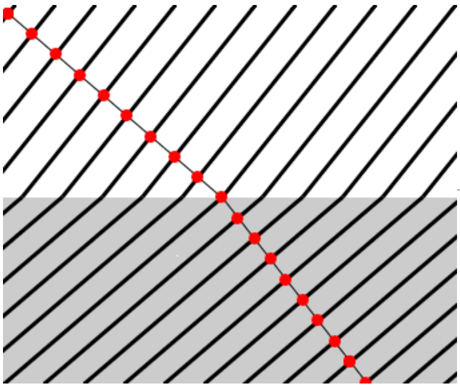
Cas où $n_1 < n_2$ (ex.: air -> plastique)

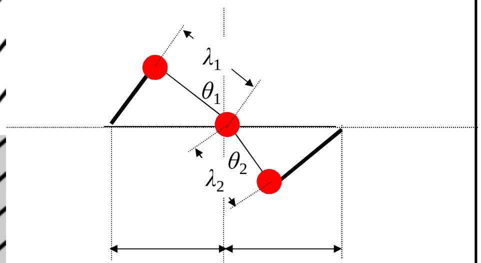
$\lambda_1 , v_1 , \omega_1$

$\omega_2 = \omega_1$

$v_2 = v_1 (n_1 / n_2) < v_1$

$=> \lambda_2 = \lambda_1 (n_1 / n_2) < \lambda_1$





$\lambda_1 / \sin(\theta_1) = \lambda_2 / \sin(\theta_2)$

$$n_1 . \sin(\theta_1) = n_2 . \sin(\theta_2)$$

Un peu d'histoire…

Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

Willebrord Snell; 1580 (Leiden) -1626 (Leiden)

Juriste, mathématicien, astronome;
Professeur de mathématiques à l'université de Leiden;
Meurt à 46 ans.

En 1621, il découvre la loi de la réfraction (loi des sinus)
...mais il ne la publie pas.

Il faudra attendre 1703 pour que Huygens y fasse référence dans son livre"Dioptrica".

Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

René Descartes; 1596 (La Haye) -1650 (Stockolm)

Philosophe et mathématicien;
S'établit en Hollande (1628-1648);
1637 : "*Discours de la méthode*";
1644 : "*Principes de philosophie*";
1649: se rend à la cour de Suède;
Meurt deux ans plus tard à 54 ans.

Publie un traité d'optique en appendice du *Discours de la méthode* (*La Dioptrique*, 1637);

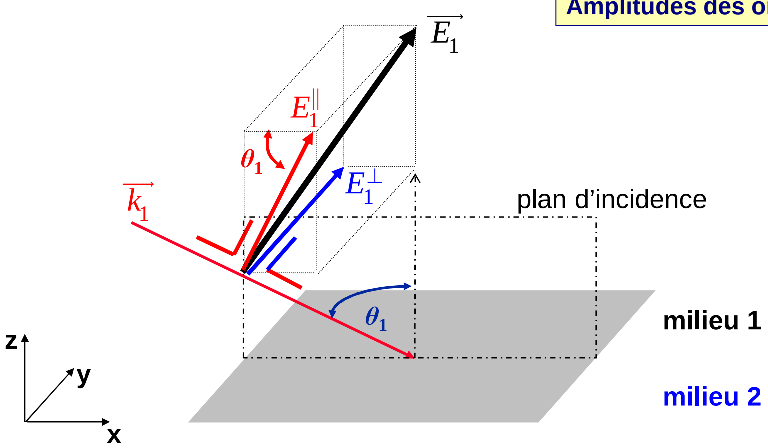
Reprend essentiellement des idées déjà connues, malheureusement sans en citer les origines;

=> en France, on lui attribue incorrectement la découverte de la loi de la réfraction.

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Amplitudes des ondes / 1



1. Ecrire le champ électrique en fonction de ses composantes // et $\perp$ au plan d'incidence, toutes deux $\perp$ au vecteur d'onde (onde transverse) :

$$\vec{E}_1(\vec{r},t) =$$

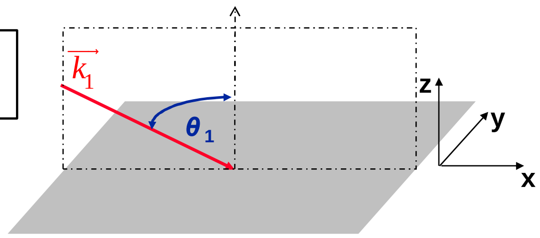
2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Amplitudes des ondes / 2

2. Ecrire le champ magnétique en fonction du champ électrique :

$$\boxed{\overrightarrow{H_1}(\vec{r},t) = \frac{1}{Z_1}(\overrightarrow{1_k} \times \overrightarrow{E_1})}$$



$$\overrightarrow{1_k} = [\qquad ; \qquad ; \qquad]$$

$$\overrightarrow{E_1}(\vec{r},t) = [\qquad ; \qquad ; \qquad]$$

$$\overrightarrow{H_1}(\vec{r},t) = [\qquad ; \qquad ; \qquad]$$

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Amplitudes des ondes / 3

3. Idem pour les ondes transmises et réfléchies, en tenant compte des angles de réfraction et de réflexion :

Onde transmise :

$$\overrightarrow{E_2}(\vec{r},t) = \left[E_2^{\parallel}\cos(\theta_2); E_2^{\perp}; E_2^{\parallel}\sin(\theta_2)\right]\cdot\sin(\overrightarrow{k_2}\vec{r} - \omega t)$$

$$\overrightarrow{H_2}(\vec{r},t) = \left[E_2^{\perp}\cos(\theta_2); -E_2^{\parallel}; E_2^{\perp}\sin(\theta_2)\right]\frac{1}{Z_2}\cdot\sin(\overrightarrow{k_2}\vec{r} - \omega t)$$

Onde réfléchie (attention aux conventions de signe !) :

$$\overrightarrow{E_{1r}}(\vec{r},t) = \left[E_{1r}^{\parallel}\cos(\theta_1); E_{1r}^{\perp}; -E_{1r}^{\parallel}\sin(\theta_1)\right]\cdot\sin(\overrightarrow{k_{1r}}\vec{r} - \omega t)$$

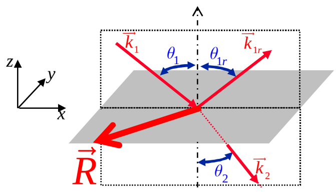
$$\overrightarrow{H_{1r}}(\vec{r},t) = \left[-E_{1r}^{\perp}\cos(\theta_1); -E_{1r}^{\parallel}; E_{1r}^{\perp}\sin(\theta_1)\right]\frac{1}{Z_1}\cdot\sin(\overrightarrow{k_{1r}}\vec{r} - \omega t)$$

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Amplitudes des ondes / 4

4. Introduire les équations d'interface :
A l'interface entre deux milieux diélectriques (isolants), les composantes tangentielles du champ électrique et du champ magnétique se conservent :



incident — réfléchi — transmis

$$E_{1x}(\vec{R},t)+E_{1rx}(\vec{R},t)=E_{2x}(\vec{R},t)$$
$$E_{1y}(\vec{R},t)+E_{1ry}(\vec{R},t)=E_{2y}(\vec{R},t)$$
$$H_{1x}(\vec{R},t)+H_{1rx}(\vec{R},t)=H_{2x}(\vec{R},t)$$
$$H_{1y}(\vec{R},t)+H_{1ry}(\vec{R},t)=H_{2y}(\vec{R},t)$$

Milieu 1 | **Milieu 2**

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Amplitudes des ondes / 5

5. On obtient alors très facilement:

Champ réfléchi :

$$E_{1r}^{\parallel}=\frac{Z_2\cos(\theta_2)-Z_1\cos(\theta_1)}{Z_2\cos(\theta_2)+Z_1\cos(\theta_1)}\cdot E_1^{\parallel}$$

$$E_{1r}^{\perp}=\frac{Z_2\cos(\theta_1)-Z_1\cos(\theta_2)}{Z_2\cos(\theta_1)+Z_1\cos(\theta_2)}\cdot E_1^{\perp}$$

Champ transmis :

$$E_2^{\parallel}=\frac{2Z_2\cos(\theta_1)}{Z_2\cos(\theta_2)+Z_1\cos(\theta_1)}\cdot E_1^{\parallel}$$

$$E_2^{\perp}=\frac{2Z_2\cos(\theta_1)}{Z_2\cos(\theta_1)+Z_1\cos(\theta_2)}\cdot E_1^{\perp}$$

Composantes // du champ électr. | **Composantes $\perp$ du champ électr.**

LOIS DE FRESNEL

Découplage des équations pour les composantes // et $\perp$ au plan d'incidence.

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Amplitudes des ondes / 5

6. Les opticiens ré-écrivent les lois en utilisant *n*, mais ces expressions ne sont valables que pour des matériaux non-magnétiques ($\mu_r = 1$)

Champ réfléchi :

$$E_{1r}^{\parallel} = \frac{n_1\cos(\theta_2) - n_2\cos(\theta_1)}{n_2\cos(\theta_1) + n_1\cos(\theta_2)} \cdot E_1^{\parallel} \qquad E_{1r}^{\perp} = \frac{n_1\cos(\theta_1) - n_2\cos(\theta_2)}{n_1\cos(\theta_1) + n_2\cos(\theta_2)} \cdot E_1^{\perp}$$

Champ transmis :

$$E_2^{\parallel} = \frac{2n_1\cos(\theta_1)}{n_2\cos(\theta_1) + n_1\cos(\theta_2)} \cdot E_1^{\parallel} \qquad E_2^{\perp} = \frac{2n_1\cos(\theta_1)}{n_1\cos(\theta_1) + n_2\cos(\theta_2)} \cdot E_1^{\perp}$$

Composantes // du champ électr. **Composantes $\perp$ du champ électr.**

LOIS DE FRESNEL

Découplage des équations pour les composantes // et $\perp$ au plan d'incidence.

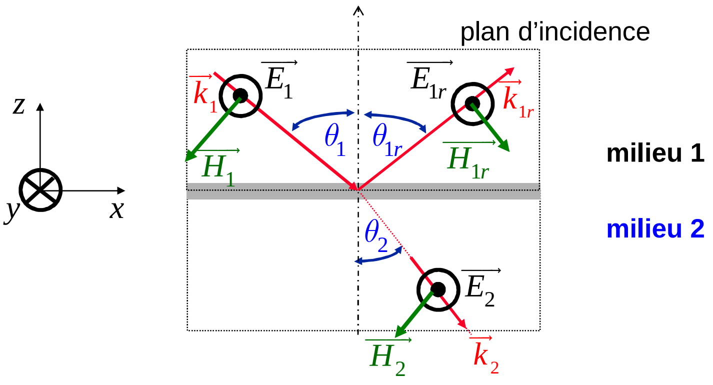
2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Polarisation perpendiculaire

E_1 , E_{1r} et $E_2 \perp$ au plan d'incidence

H_1 , H_{1r} et H_2 // au plan d'incidence



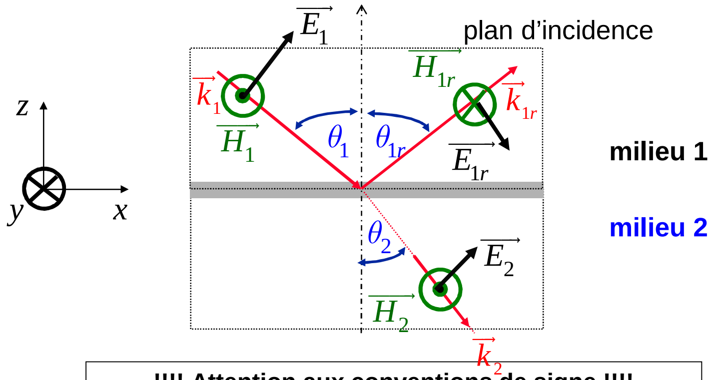
2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Polarisation parallèle

E_1 , E_{1r} et E_2 // au plan d'incidence

H_1 , H_{1r} et $H_2 \perp$ au plan d'incidence



!!!! Attention aux conventions de signe !!!!
(choix des directions positives pour les champs)

Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

<u>Augustin Jean Fresnel; 1788 (Broglie) - 1827 (Ville d'Avray)</u>

Polytechnicien; débute en chimie; ensuite s'intéresse à la lumière.
Poste aux Ponts et Chaussées;
Meurt à 39 ans.

"J'ai décidé de rester un modeste ingénieur… et même d'abandonner la physique, si les circonstances l'exigent. Je le ferai d'autant plus facilement que j'aperçois maintenant la vanité de s'efforcer d'obtenir un petit morceau de gloire."

Un des fondateurs de la théorie ondulatoire de la lumière: combine des expériences superbes avec une formalisation mathématique avancée pour expliquer les phénomènes de diffraction.

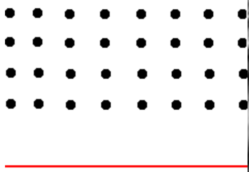
Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

Théorie de la lumière : quelques noms

ondulatoire

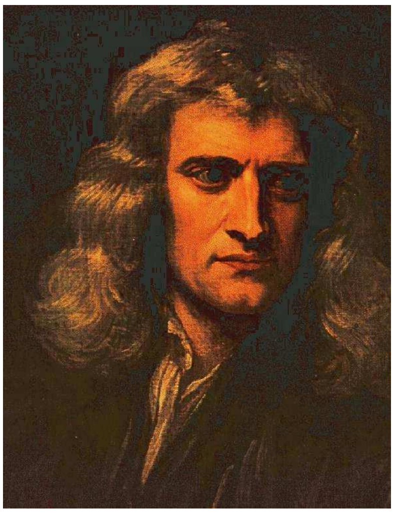
Christiaan Huygens;
1629 (La Haye)-1695 (La Haye).
Considéré comme le père de la théorie ondulatoire de la lumière.

Traité de la lumière, 1678
"principe d'Huygens"



Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

Théorie de la lumière : quelques noms



corpusculaire

Sir Isaac Newton
1643 (Woolsthorpe) - 1727 (Londres)

1672 : premier de ses articles sur la lumière
=> théorie corpusculaire.

Conflit avec Hooke sur la propriété de ses résultats expérimentaux => retarde la publication de son ouvrage jusqu'à la mort de Hooke (1703) :
Opticks (1704).

Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

Théorie de la lumière : quelques noms

ondulatoire

corpusculaire

Dominique François Arago
1786 (Estagel) - 1853 (Paris)

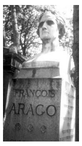
Jean-Baptiste Biot
1774 (Paris) - 1862 (Paris)

Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

Théorie de la lumière : quelques noms

ondulatoire

corpusculaire



Dominique François Arago
1786 (Estagel) - 1853 (Paris)

Jean-Baptiste Biot
1774 (Paris) - 1862 (Paris)

Polytechnicien et républicain

Polytechnicien et royaliste

1806: collaborent sur le thème de la mesure de l'arc d'un méridien terrestre

1811: polarisation et chromatisme

1812: polarisation et chromatisme

Seront ennemis tout le reste de leur vie...

Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

Jean-Baptiste Biot
1774 (Paris) - 1862 (Paris)

M. Biot possédait au plus haut degré les qualités de curiosité, de finesse, de pénétration, de précision, d'analyse ingénieuse, de méthode, de clarté, bref toutes les qualités essentielles et secondaires, à l'exception d'une seule, le génie, pris dans le sens d'originalité et d'inventivité. (Sainte-Beuve)

En ce qui concerne M. Biot, j'ai pu évaluer son caractère quand nous étions ensemble dans les îles Shetland; et je n'hésite pas à dire que je n'ai jamais rencontré un mélange si étrange de vanité, d'impétuosité, d'inconstance et de partialité innée,... (O. Gregory)

Un peu d'histoire…
Snell * Descartes * Huygens * Newton * Malus * Biot * Arago * Fresnel * Maxwell

Théorie de la lumière : quelques noms

ondulatoire

James Clerck Maxwell
1831 (Edinburgh) - 1879 (Cambridge)

1862 : *"We can scarcely avoid the conclusion that light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena."*

1873: *Treatise on Electricity & Magnetism* : équations de Maxwell

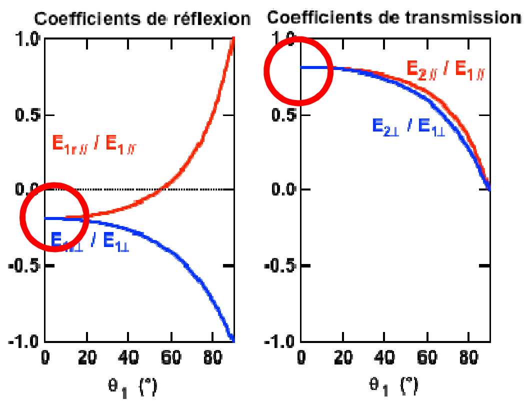
2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite

Incidence NORMALE



- Le champ électrique réfléchi est de ***sens* opposé** à celui du champ incident.
- Le champ électrique transmis est de **même *sens*** que le champ incident.

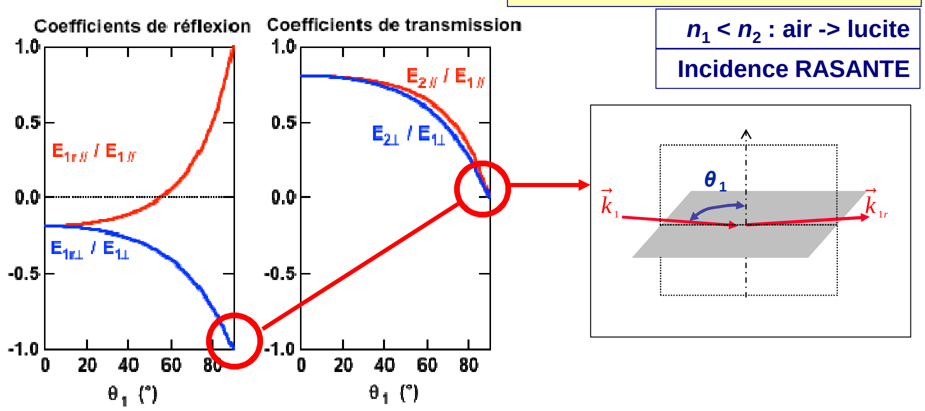
2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite

Incidence RASANTE



Sous incidence rasante: la réflexion est totale.

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite

Sous incidence rasante: la réflexion est totale.

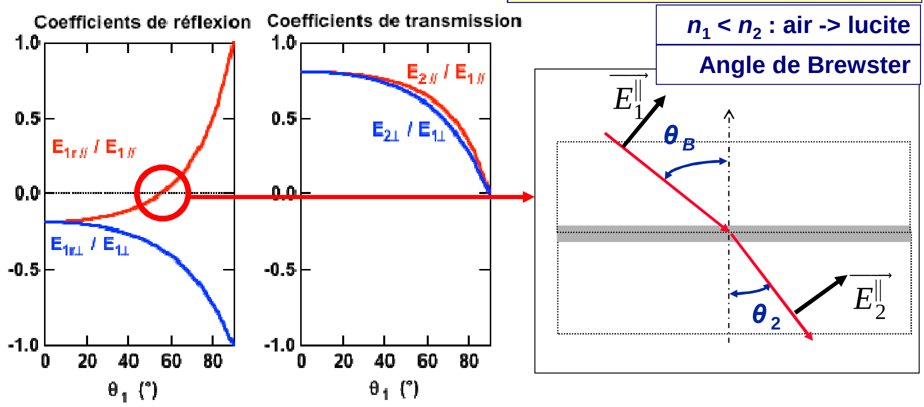
2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite

Angle de Brewster



Quand $\theta_1 = \theta_B$, l'angle de Brewster, la composante // de l'onde réfléchie s'annule

=> polariseur par réflexion

=> transmission totale de la composante //

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite

Angle de Brewster

$$E_{1r}^{\parallel} = 0 = \frac{Z_2\cos(\theta_2) - Z_1\cos(\theta_1)}{Z_2\cos(\theta_2) + Z_1\cos(\theta_1)} \cdot E_1^{\parallel} = \frac{\tan(\theta_2 - \theta_1)}{\tan(\theta_2 + \theta_1)} \cdot E_1^{\parallel}$$

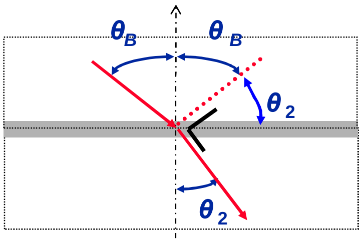
$\mu_r = 1$

Si $\theta_1 + \theta_2 = \pi / 2$, alors $\tan(\theta_1 + \theta_2)$ = infini => $E_{1r\,//} = 0$

L'angle de Brewster θ_B est l'angle d'incidence θ_1 pour lequel $\theta_1 + \theta_2 = \pi / 2$

$$\sin(\theta_B) = n_2 / n_1 \,.\, \sin(\theta_2) = n_2 / n_1 \,.\, \sin(\pi / 2 - \theta_B) = n_2 / n_1 \,.\, \cos(\theta_B)$$

$$\tan(\theta_B) = n_2 / n_1$$



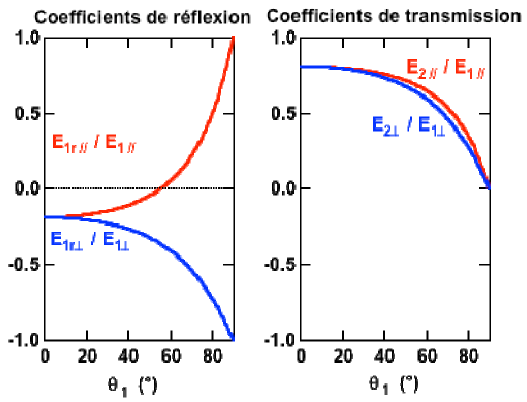
NB: pour des milieux purement magnétiques, l'angle de Brewster n'existe que pour des polarisations ⊥

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite



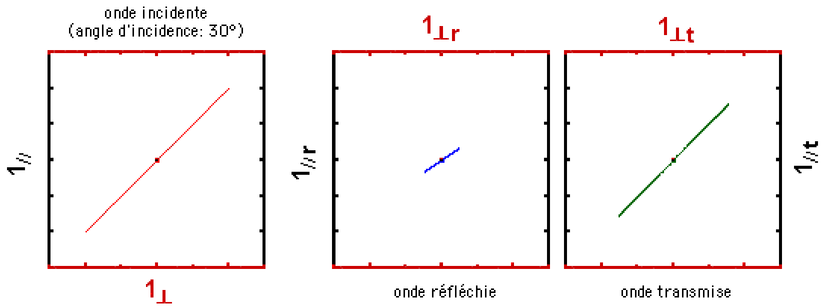
En général, l'état de polarisation d'une onde est modifié lors d'une réflexion ou d'une réfraction.

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite



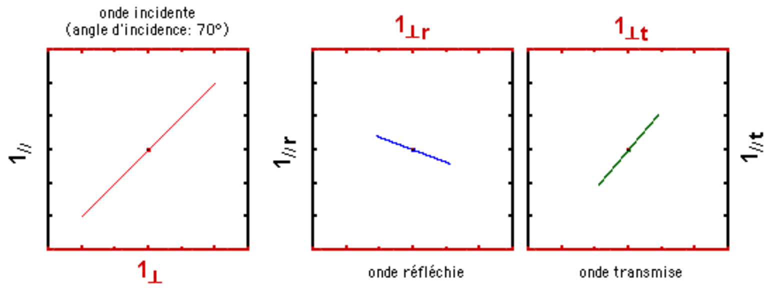
En général, l'état de polarisation d'une onde est modifié lors d'une réflexion ou d'une réfraction.

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite



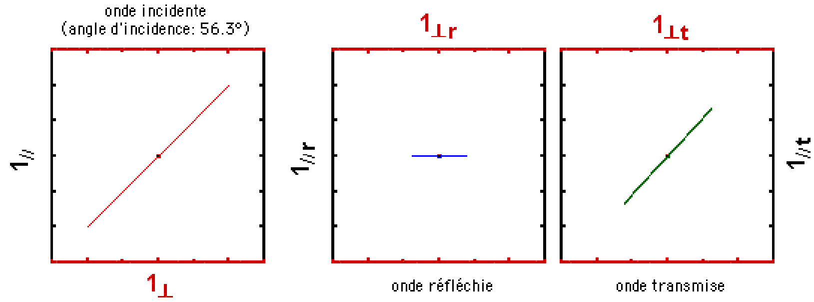
En général, l'état de polarisation d'une onde est modifié lors d'une réflexion ou d'une réfraction.

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite



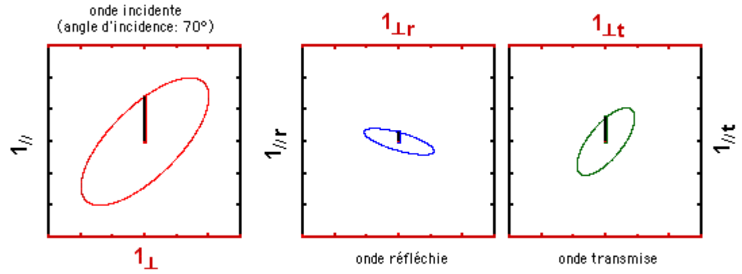
En général, l'état de polarisation d'une onde est modifié lors d'une réflexion ou d'une réfraction.

2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_1 < n_2$: air -> lucite



Voir le site moodle pour l'effet sur une polarisation elliptique...

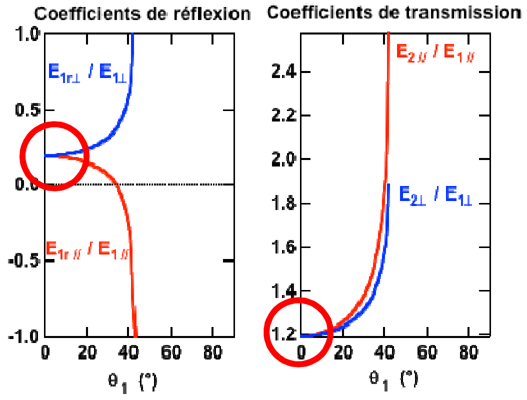
2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_2 < n_1$: lucite -> air

Incidence NORMALE



- **Le champ électrique réfléchi est de même sens que celui du champ incident.**
- **Le champ électrique transmis est toujours de même sens que le champ incident.**

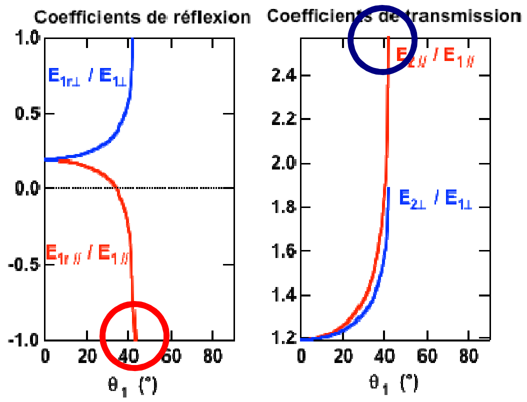
2. Réflexion / réfraction

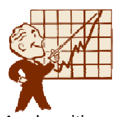
Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

$n_2 < n_1$: lucite -> air

Angle critique





Angle critique

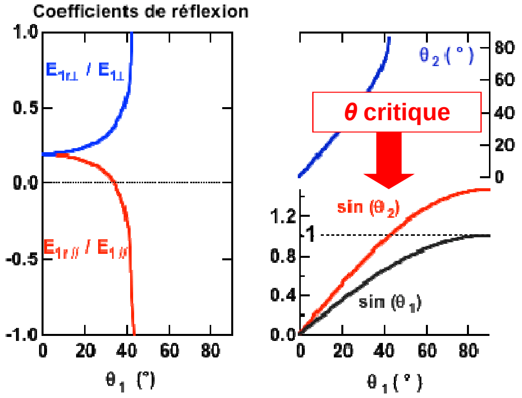
2. Réflexion / réfraction

Onde électromagnétique plane

Conséquences des lois de Fresnel

***$n_1 > n_2$* : lucite -> air**

Angle critique



$$n_1 \,.\, \sin(\theta_1) = n_2 \,.\, \sin(\theta_2)$$

$$\sin(\theta_1) = n_2 / n_1 \,.\, \sin(\theta_2)$$

$$\sin(\theta_{1c}) = n_2 / n_1$$

Si *$n_1 > n_2$*,
alors
il existe un angle critique au-delà duquel la réflexion est totale
(ex.: de la lucite à l'air).

2. Réflexion / réfraction

Onde mécanique transverse

Réfléchi

$$R \,/\, I = \frac{(k_1 - k_2)}{(k_1 + k_2)}$$

où $k_j = 2\,\pi \,/\, \lambda_j$ est le nombre d'onde

Transmis

$$T \,/\, I = \frac{2\,k_1}{(k_1 + k_2)}$$

Onde électromagnétique transverse

$$\frac{E_{1r}^{\perp}}{E_1^{\perp}} = \frac{Z_2\cos(\theta_1) - Z_1\cos(\theta_2)}{Z_2\cos(\theta_1) + Z_1\cos(\theta_2)} \qquad \frac{E_2^{\perp}}{E_1^{\perp}} = \frac{2Z_2\cos(\theta_1)}{Z_2\cos(\theta_1) + Z_1\cos(\theta_2)}$$

si $\theta_1 = 0$ (incidence normale)

$$\frac{E_{1r}^{\perp}}{E_1^{\perp}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \overset{\mu_r = 1}{=} \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \qquad \frac{E_2^{\perp}}{E_1^{\perp}} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \overset{\mu_r = 1}{=} \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$$

or $k_j = 2\,\pi \,/\, \lambda_j = 2\,\pi\, n_j \,/\, \lambda_0$ où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide

$$\frac{E_{1r}^{\perp}}{E_1^{\perp}} = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \qquad \frac{E_2^{\perp}}{E_1^{\perp}} = \frac{2k_1}{k_1 + k_2}$$