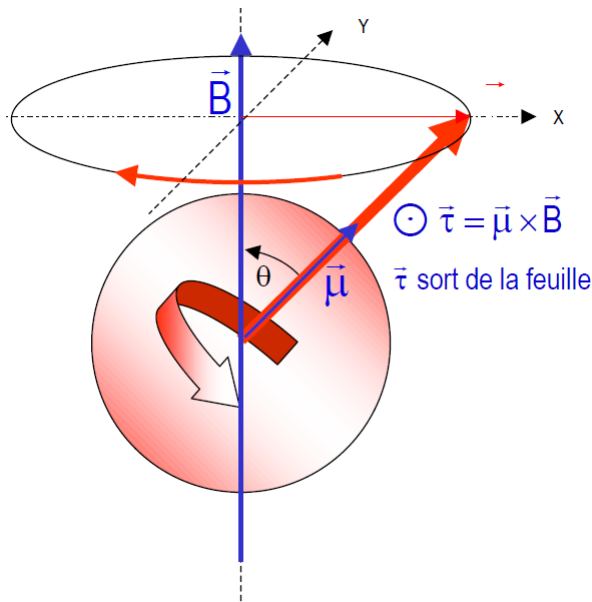


MAGNÉTISME III – Résumé

À l'instar d'une toupie qui tourne sur elle-même et qui subit la force de gravité le moment magnétique intrinsèque du proton, dû au spin, effectue un mouvement de précession autour d'un champ magnétique B . La précession a lieu à la **fréquence de Larmor** définie par:



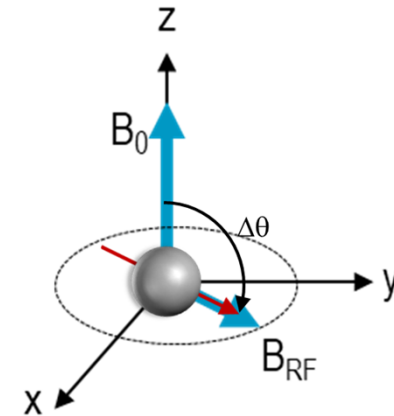
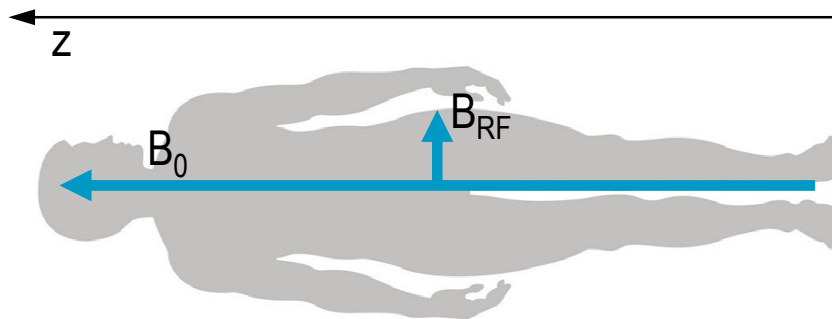
$$\omega_L = \gamma B$$

La constant de proportionnalité γ est le **facteur gyromagnétique** du proton et il vaut $2.678 \times 10^8 \text{ T}^{-1}\text{s}^{-1}$.

L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) est basée sur l'interaction du moment magnétique intrinsèque de spin du proton de l'hydrogène dans le corps, avec 2 champs magnétiques externes, l'un statique B_0 et l'autre, $B_{RF}(t)$, oscillant à la fréquence ω_{RF}

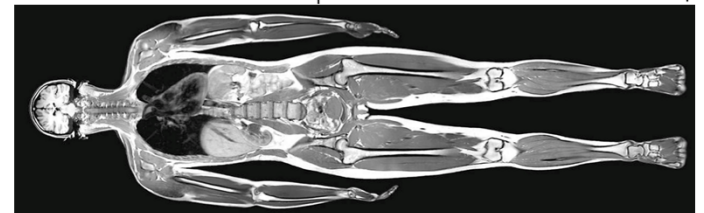
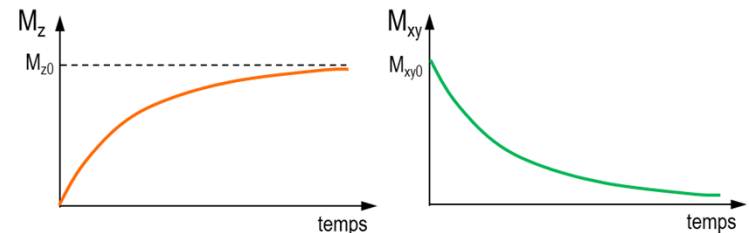
MAGNÉTISME III – Résumé

Dans un scanner IRM, le champ magnétique statique B_0 est utilisé pour aligner une partie des spins des protons.



Un champ magnétique B_{RF} est ajouté pour «faire basculer» le spin loin de l'axe z . La fréquence du champ B_{RF} doit être en résonance avec la fréquence de Larmor. L'impulsion RF a une durée très courte.

Après avoir été synchronisés et orientés par ces 2 champs magnétiques, l'orientation des spins relaxe par interactions entre eux ou à cause de leur environnement. La mesure des temps de relaxation est à la base du traitement des signaux permettant de reconstruire l'image des tissus.



LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Onde électromagnétique

Spectre électromagnétique

Réflexion et réfraction

Loi de Snell-Descartes

Réflexion interne totale

Prisme

Kane chapitre 23
Hecht chapitres 24-25

Champs électriques et magnétiques variables dans le temps

Un champ magnétique variable dans le temps induit un champ électrique selon:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{d}{dt} \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (\text{Loi de Faraday})$$

Essayons de formaliser l'observation inverse: un champ électrique variable dans le temps génère un champ magnétique.

Le théorème de Gauss dit : $\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$

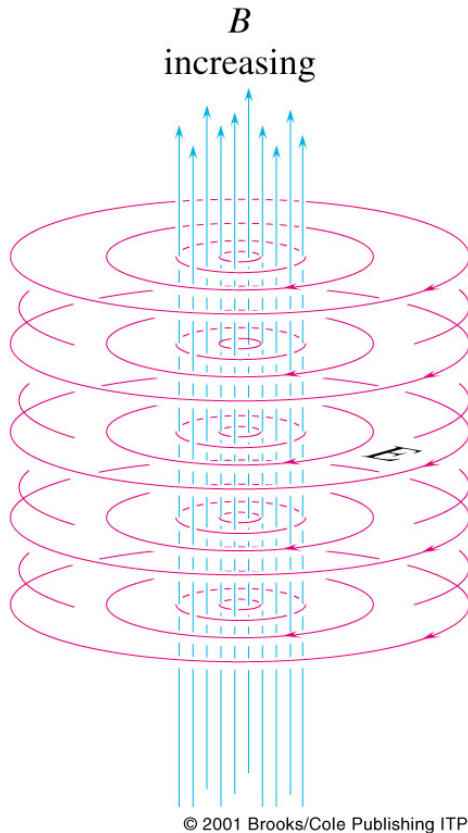
Dès lors: $\frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\epsilon_0} I$

Loi d'Ampère : $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \Rightarrow \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \epsilon_0 \mu_0 \int \frac{d}{dt} \vec{E} \cdot d\vec{A}$

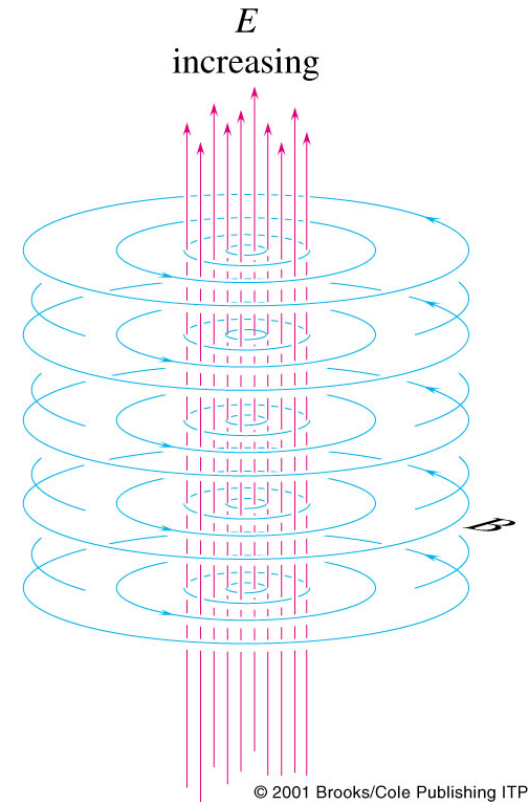
Un champ électrique variable peut donc bel et bien induire un champ magnétique.

Champ électromagnétique

Le mécanisme de génération d'un champ par l'autre est **symétrique** :



- ▶ un champ électrique variable dans le temps engendre un champ magnétique à lui perpendiculaire et vice-versa.
- ▶ Il en résulte une **oscillation entre les deux champs**, sans l'intervention de charges ni de courants. Cet effet est à la source des **ondes électromagnétiques**.

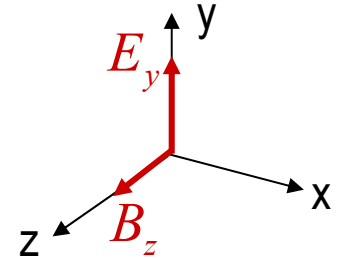


Equations des champs $E(t)$ et $B(t)$

Pour une onde électromagnétique qui se propage selon l'axe x , et dont le champ électrique est orienté le long de y et le champ magnétique le long de z , on trouve que

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{d}{dt} \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \Rightarrow \quad \frac{dE}{dx} = -\frac{dB}{dt} \quad (1)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \varepsilon_0 \mu_0 \int \frac{d}{dt} \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad \Rightarrow \quad -\frac{dB}{dx} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{dE}{dt} \quad (2)$$



On dérive (1) par rapport à x et (2) par rapport à t pour obtenir l'équation d'onde (d'Alembert), vue d'une manière générale au cours 6:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{d^2 E}{dx^2} = -\frac{d^2 B}{dx dt} \\ -\frac{d^2 B}{dt dx} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d^2 E}{dt^2} \end{array} \right\} \frac{d^2 E}{dx^2} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d^2 E}{dt^2} \quad \text{avec la vitesse de propagation} \quad \varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{v^2}$$

donnée par

Notons que dans une manière similaire on peut trouver une équation d'onde pour B

Onde électromagnétique

Une onde électromagnétique progressive est une **onde entretenue**, transportant de l'énergie et qui, une fois émise, se déplace indépendamment de sa source. Chaque type de **rayonnement électromagnétique** est une distribution de champs électriques et magnétiques oscillants qui s'induisent l'un l'autre.

À la différence des ondes dans une corde ou des ondes sonores dans un fluide, **les ondes électromagnétiques n'ont pas besoin d'un milieu matériel pour se propager**. Elle peuvent se propager dans le vide.

Les ondes électromagnétiques :

- se propagent à la vitesse de la lumière c dans le vide

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}}} = 299'867'802 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 300'000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

- se propagent en général plus lentement dans la matière. la vitesse v de l'onde est réduite d'un facteur n , appelé indice de réfraction:

$$v = \frac{c}{n} \text{ avec } n > 1 \quad \text{Exemples: } n(\text{air}) = 1, n(\text{eau}) = 1.33, n(\text{verre}) = 1.5$$

- leur composante électrique a un effet beaucoup plus grand sur les charges de la matière que leur composante magnétique. Les phénomènes de *la vision*, *la photochimie*, *la fluorescence*, sont essentiellement causés par la composante électrique de l'onde.

Onde électromagnétique sinusoïdale

La figure ci-dessous représente une onde électromagnétique sinusoïdale. On peut écrire les champs magnétique et électrique comme des fonctions sinusoïdales de la position x et du temps t :

$$\vec{E}(x,t) = (0, E_y, 0); \quad E_y = E_{\max} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

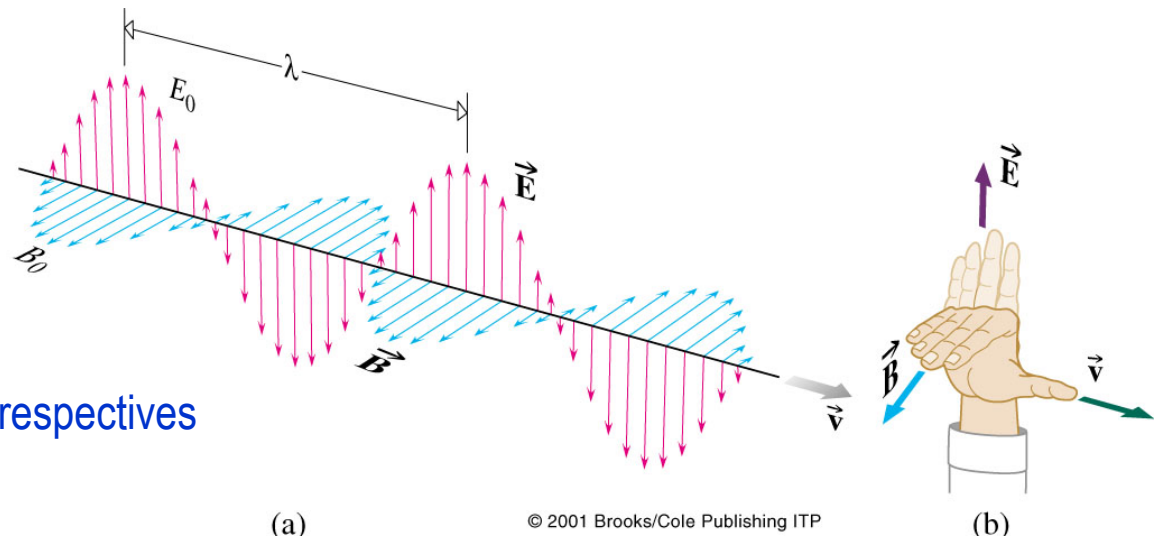
$$\vec{B}(x,t) = (0, 0, B_z); \quad B_z = B_{\max} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)$$

$$\omega = 2\pi f$$

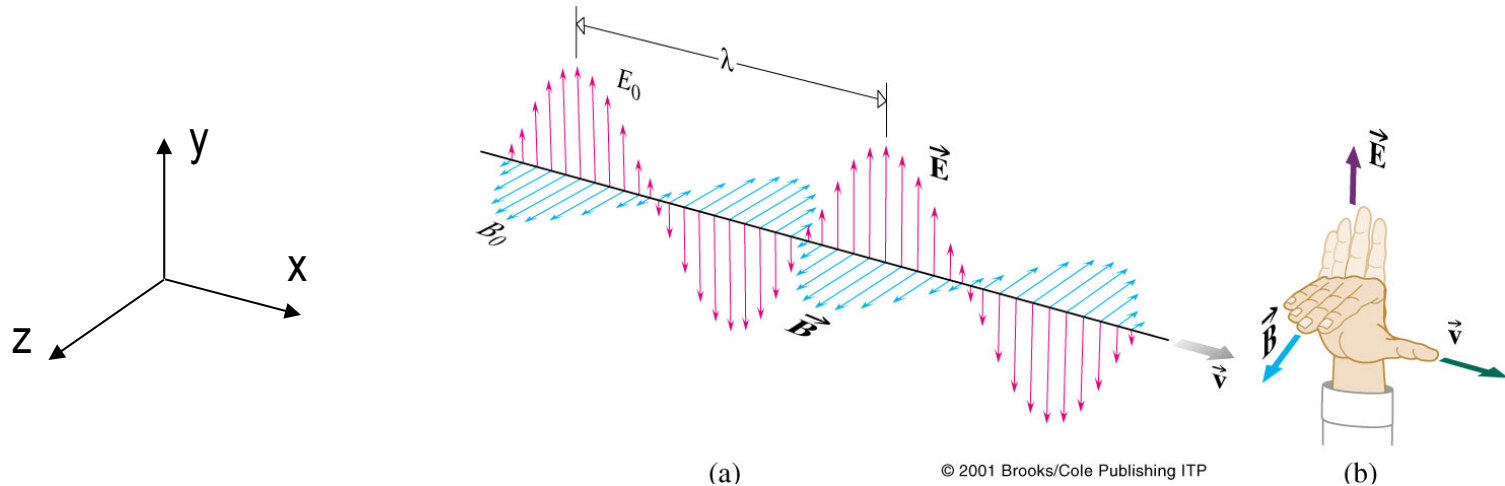
$$v = f\lambda = \frac{\omega}{k}$$

Ces équations définissent:

- k : le nombre d'onde
- λ : la longueur d'onde
- f : la fréquence
- v : la vitesse de l'onde
- E_{\max} et B_{\max} : les amplitudes respectives



Onde électromagnétique sinusoïdale



Les champs électriques et magnétiques sont en tout point perpendiculaires l'un à l'autre ainsi qu'à leur direction de propagation (mouvement). La direction de propagation de l'onde est donnée par $\vec{E} \times \vec{B}$.

Le sens des champs alterne: \vec{B} s'oriente vers l'intérieur de la page en certains points et vers l'extérieur en d'autres; \vec{E} est orienté vers le haut ou vers le bas. Ainsi l'intensité du champ varie entre un maximum dans un sens et un maximum dans l'autre sens en passant par zéro.

Les champs magnétiques et électriques sont en phase, c'est-à-dire qu'ils s'annulent ou atteignent leur maximum simultanément.

En appliquant les lois de l'électromagnétisme, on peut montrer que les champs électrique et magnétique ainsi que leurs amplitudes sont reliés par:

$$E(x,t) = \frac{c}{n} B(x,t) \quad E_{\max} = \frac{c}{n} B_{\max}$$

Polarisation linéaire et polarisation circulaire

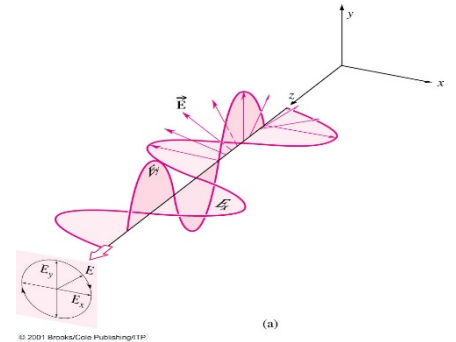
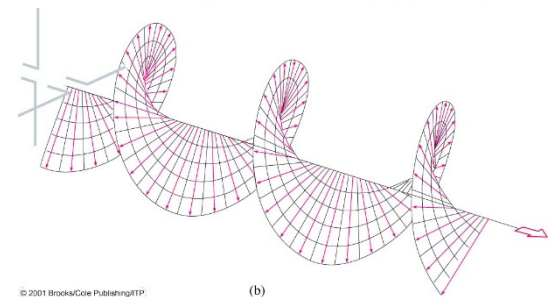
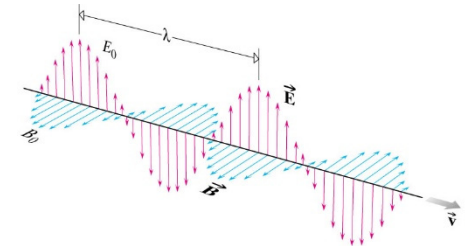
Dans une onde électromagnétique, le champ électrique \vec{E} oscille perpendiculairement à la direction de propagation. Si \vec{E} oscille dans un plan fixe, on dit que l'onde est **polarisée linéairement**, ce qui signifie que les oscillations se font uniquement dans un plan, appelé plan de polarisation.

La **direction de polarisation** est définie par la **direction du vecteur champ électrique**.

Pour une **onde polarisée circulairement**, les vecteurs E et B restent constant en norme, mais tournent autour de la direction de propagation. Ceci est le cas de l'impulsion RF dans un scanner IRM.

On obtient une onde polarisée circulairement par superposition de deux ondes polarisées linéairement, l'une dans le plan vertical, l'autre dans le plan horizontale, et déphasées de 90° . En fait, Fourier nous a expliqué que toute superposition d'ondes sinusoïdales est encore solution de l'équation d'onde

NB La lumière naturelle est un mélange aléatoire et variant très rapidement d'ondes linéairement polarisées dans toutes les directions.



Énergie et intensité lumineuse

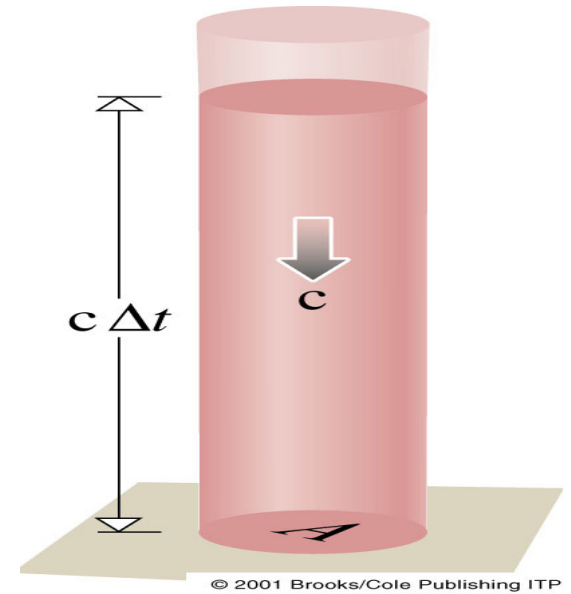
Quelle énergie de rayonnement dépose une onde électromagnétique absorbée par une surface ? La fréquence d'oscillation élevée des champs électrique et magnétique rend la mesure de leur intensité impossible. Nous allons donc considérer l'énergie de rayonnement moyenne reçue par une surface pendant un intervalle de temps Δt donné.

Nous mesurons la quantité d'énergie moyenne reçue par unité de surface et par unité de temps. Dans le cas du son, nous avons appelé cette quantité *intensité sonore*. En optique elle est appelée intensité lumineuse I . Elle s'exprime en J/sm^2 ou en W/m^2 .

Considérons un faisceau de lumière de section A tombant sur un plan dans le vide. La lumière se propage avec la vitesse c : pendant un temps Δt , la colonne de lumière de longueur $(c\Delta t)$, donc de volume $\text{Volume} = (c\Delta t)A$, intercepte le plan.

Si on connaît l'énergie par unité de volume u_{EM} dans le faisceau, la quantité d'énergie reçue par la surface pendant le temps Δt peut se calculer :

$$u_{EM} \cdot (\text{Volume}) = u_{EM} (c\Delta t)A$$



Énergie et intensité lumineuse

Il se trouve que les densités d'énergie emmagasinées dans les champs électrique et magnétique sont connues: $u_E = \varepsilon_0 E^2 / 2$ et $u_B = B^2 / 2\mu_0$

Notez que ces deux densités d'énergie sont égales (car $E = cB$ et $c^2 = 1 / \varepsilon_0 \mu_0$):

$$u_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \frac{E^2}{c^2 \mu_0} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = u_B$$

L'intensité lumineuse instantanée (i.e. par unité de temps et par unité de surface) est alors :

$$I_{inst} = \frac{\text{Energie}}{A\Delta t} = \frac{u_{EM} (c\Delta t) A}{A\Delta t} = u_{EM} c = (u_E + u_B) c = \left(\frac{\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \right) c = c \varepsilon_0 E^2$$

E varie très rapidement avec le temps, et seule sa valeur moyenne dans le temps est observable. Prenons une fonction sinusoïdale pour décrire $E(t) = E_{\max} \sin \omega t$ avec une amplitude E_{\max} et un angle ωt (qui dépend du temps) :

$$I = \left[c \varepsilon_0 E_{\max}^2 \sin^2 \omega t \right]_{moy} = c \varepsilon_0 E_{\max}^2 \left[\sin^2 \omega t \right]_{moy} \Rightarrow I = \bar{u}_{EM} c = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_{\max}^2$$

L'intensité lumineuse, que l'on mesure avec un photomètre, est donc proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique associé à l'onde.

Énergie et intensité lumineuse

QUESTION : Soit un faisceau laser de 1.0 mW, de fréquence 4.74×10^{14} Hz, et de $3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ de section. Déterminez :

- a) l'énergie reçue pendant 1.0 s par un écran perpendiculaire à ce faisceau.
- b) l'intensité lumineuse.
- c) l'amplitude du champ électrique.

On suppose que le faisceau se propage dans le vide.

SOLUTION : a) La puissance P du faisceau permet de calculer l'énergie reçue chaque seconde :

$$\text{Energie} = P\Delta t = (1.0 \times 10^{-3} \text{ W})(1.0 \text{ s}) = 1.0 \times 10^{-3} \text{ J} = 1 \text{ mJ}$$

b) L'intensité lumineuse est l'énergie par unité de temps et de surface :

$$I = \frac{\text{Energie}}{A\Delta t} = \frac{P}{A} = \frac{1.0 \times 10^{-3} \text{ W}}{3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 3.2 \times 10^2 \text{ W/m}^2$$

Énergie et intensité lumineuse

c) Connaissant I nous pouvons maintenant obtenir l'amplitude du champ électrique :

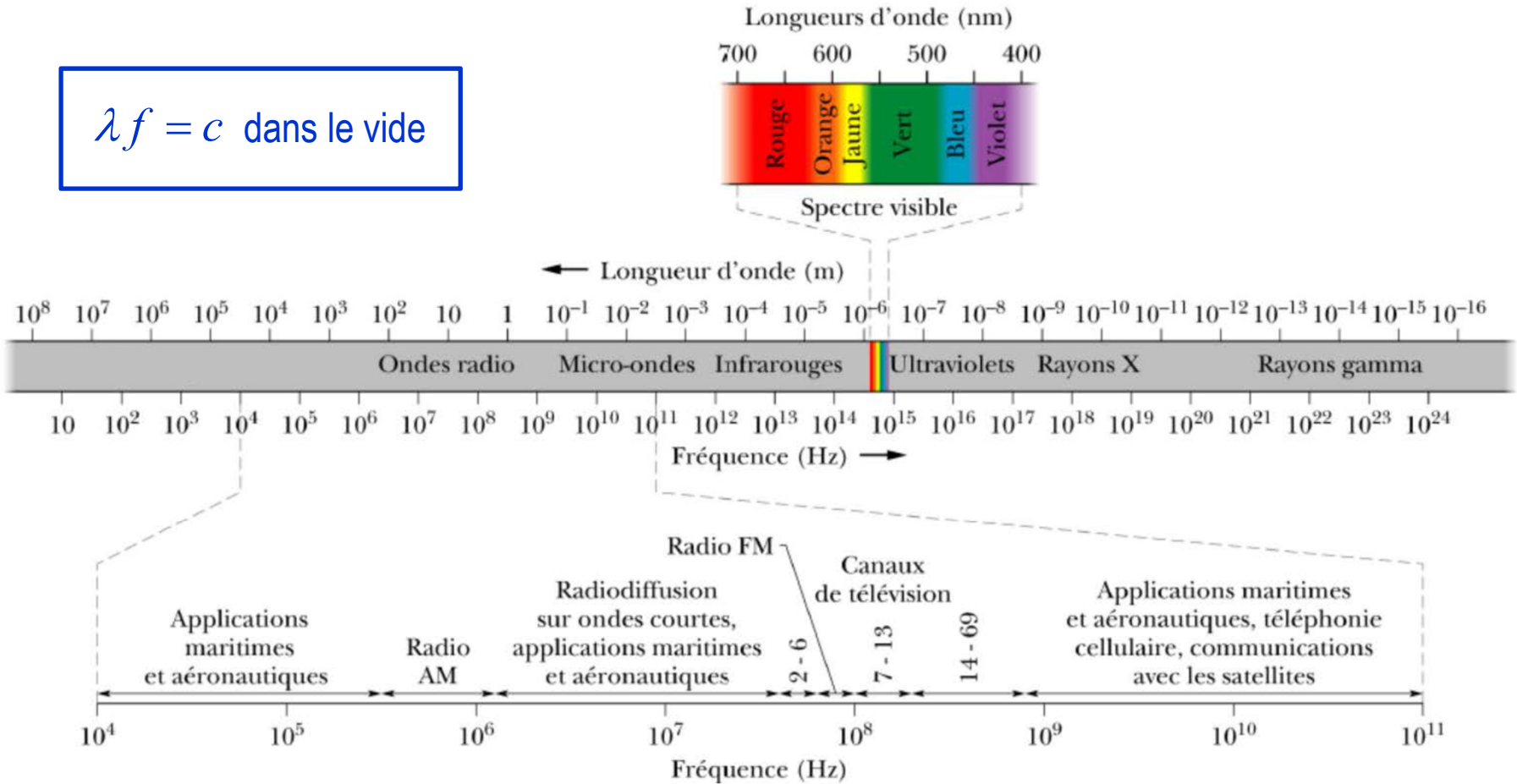
$$E_{\max}^2 = \frac{2I}{c\epsilon_0} = \frac{2(3.2 \times 10^2 \text{ W/m}^2)}{(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2)}$$

$$E_{\max} = 0.49 \text{ kV/m}$$

NB: un faisceau laser de grande puissance peut générer un champ énorme: $E_{\max} = 10^{10} \text{ V/m}$.

Le spectre des ondes électromagnétiques

$$\lambda f = c \text{ dans le vide}$$



Le spectre électromagnétique est divisé en sept régions plus ou moins distinctes

Le spectre des ondes électromagnétiques

Les **ondes radio**, de ~ 100 kHz à 1 GHz, couvrent un domaine très large, et sont utilisées pour transporter les signaux de la radio AM et FM, la TV et pour l'IRM et les radar.

Les **micro-ondes**, de 1 GHz à 300 GHz, sont utilisées dans les fours du même nom pour chauffer les aliments en excitant le mouvement des molécules d'eau, mais aussi pour la transmission des signaux de la téléphonie mobile et du wifi.

Les **infrarouges**, de 300 GHz à 385 THz, correspondent à l'émission des corps par agitation thermique. Chaque fois qu'il faut détecter une source de chaleur, les systèmes à infrarouge sont très pratiques.

La bande étroite que l'œil humain peut détecter est couramment appelée **spectre visible**. Il couvre l'intervalle $385 \text{ THz} < f < 769 \text{ THz}$, bien que les limites varient d'une personne à l'autre.



La couleur correspond à notre perception de la fréquence de l'onde électromagnétique. Ce n'est pas une caractéristique de la lumière elle-même, mais une manifestation du système sensoriel: l'œil, les nerfs et le cerveau.

Le spectre des ondes électromagnétiques

Les **ultraviolets** (UV), de 769 THz à 2.4×10^{16} Hz sont responsables du bronzage et activent la synthèse de la vitamine D sous l'épiderme. Les rayons UV au-dessus de 10^{15} Hz dépolymérisent les acides nucléiques et détruisent les protéines, qui, tous deux, les absorbent puissamment. Les rayons ultraviolets inhibent aussi le système immunitaire du corps.

Les **rayons X**, de 2.4×10^{16} Hz à 15×10^{16} Hz, permettent les images radiographiques, les scanners CT. Ils sont aussi utilisés pour la détermination des structures cristallines.

Au-delà de 15×10^{16} Hz, les ondes électromagnétiques sont appelés **rayons gamma** (γ) qui sont de même nature que les rayons X mais sont d'origine différente. Les rayons gamma sont produits par des transitions nucléaires tandis que les rayons X sont produits par la décélération des électrons rapides.

Les rayons de lumière et l'optique géométrique

Propagation de la lumière: La lumière voyage en ligne droite dans la plupart des cas. Pour preuve:

- ▶ Une source lumineuse ponctuelle, comme le Soleil, projette des ombres aux contours très nets.
- ▶ Nous déduisons la position des objets dans notre environnement en supposant que la lumière qui en provient atteint notre œil en suivant une ligne droite.



Les parcours rectilignes suivis par la lumière s'appellent **des rayons**. Bien que cette représentation de la lumière par rayons ne tienne pas compte de sa nature d'onde électromagnétique, elle a permis de rendre compte des aspects fondamentaux de la lumière tels que:

- **La réflexion**
- **La réfraction**
- **Les principes des miroirs et des lentilles**

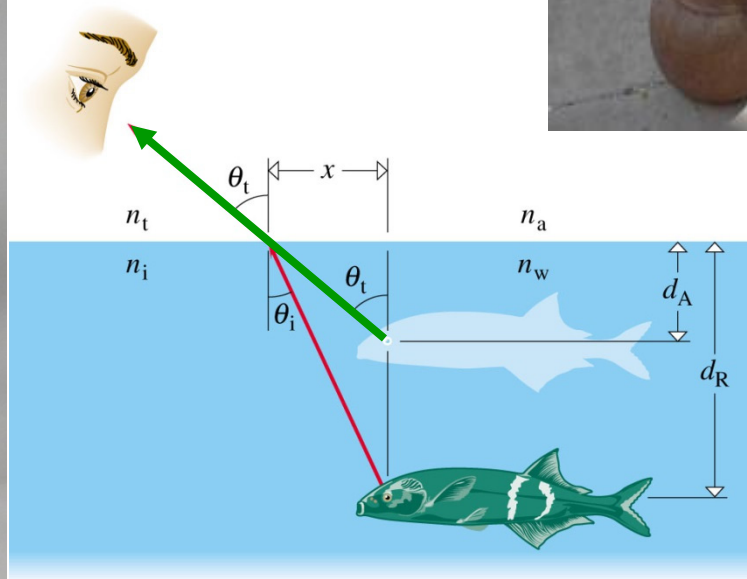
La discipline qui traite de ces propriétés de la lumière est appelée **optique géométrique**: elle considère des rayons lumineux rectilignes qui se propagent selon différents angles.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION

Les images sur cette page illustrent les phénomènes optiques de:

- la réflexion
- la réfraction

Ces principes sont à la base des miroirs et des lentilles.



La loi de la réflexion

Quand une lumière frappe la surface d'un objet, une partie est réfléchiée, le reste est absorbé par l'objet ou, si l'objet est transparent comme le verre ou l'eau, transmis au travers de l'objet.

Dans le cas d'un objet très brillant, comme un miroir argenté, la lumière est réfléchiée à plus de 95%.

On définit:

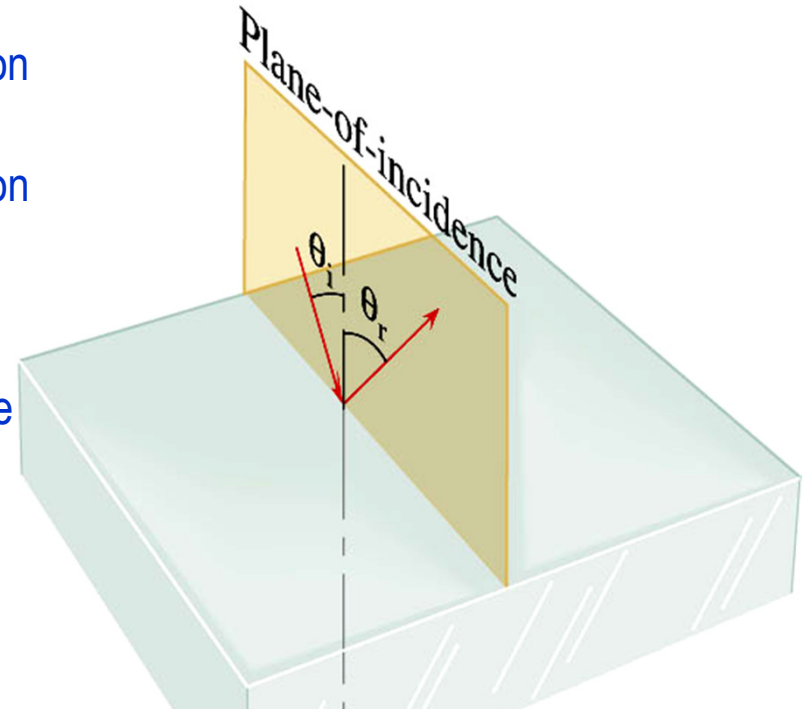
- l'angle d'incidence θ_i : l'angle que fait le rayon incident avec la normale à la surface.
- l'angle de réflexion θ_r : l'angle entre le rayon réfléchi et la normale à la surface.

Tous les angles se mesurent par rapport à la normale à la surface.

La loi de la réflexion dit que

$$\theta_i = \theta_r$$

L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.



La loi de la réflexion

La lumière qui rencontre une surface rugueuse, même microscopiquement rugueuse comme la page d'un livre, est réfléchiée dans toutes les directions. C'est une **réflexion diffuse**.

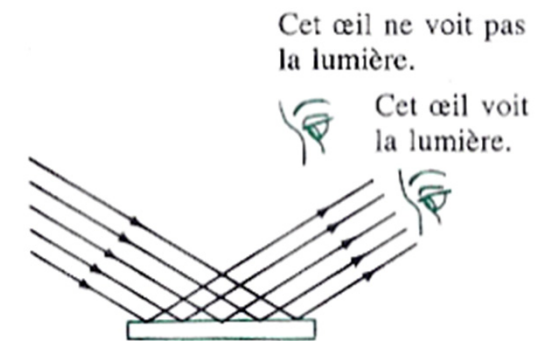
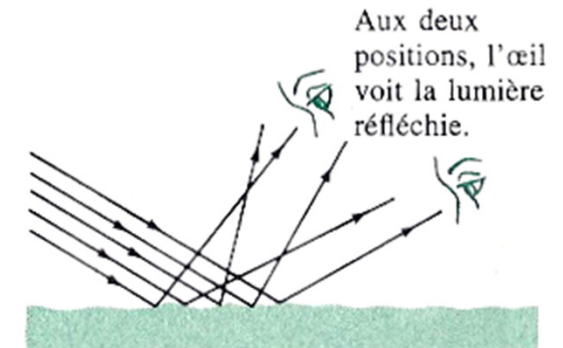
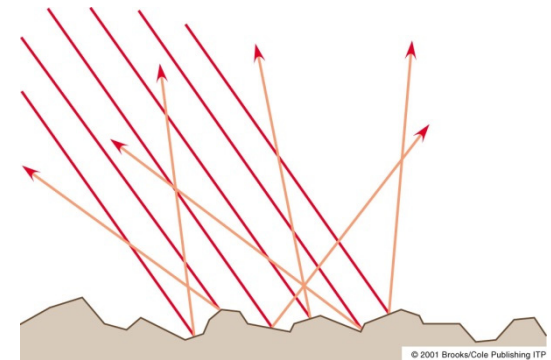
La loi de la réflexion demeure valide pour chaque micro surface. La réflexion diffuse qui réfléchit la lumière dans toutes les directions permet de voir un objet ordinaire sous plusieurs angles.

Lorsqu'un faisceau étroit de lumière se réfléchit sur un miroir (**réflexion spéculaire**), notre œil ne peut le voir que s'il se trouve exactement dans l'angle de réflexion.

Réflexion diffuse



Réflexion spéculaire



La réflexion sur un miroir plan

Une personne se regarde dans un miroir: la lumière d'un point (S) de son visage tombe sur le miroir. Une partie de cette lumière est réfléchiée vers l'œil de l'observateur sous condition que $\theta_i = \theta_r$. L'ensemble œil-cerveau interprète ce rayon comme venant en ligne droite de P , l'image de S située derrière le miroir. Le point P fait partie d'une **image virtuelle** derrière le miroir. On appelle cette image virtuelle parce qu'elle ne peut pas être projetée sur un écran.

QUESTION : Où se situe l'image virtuelle?

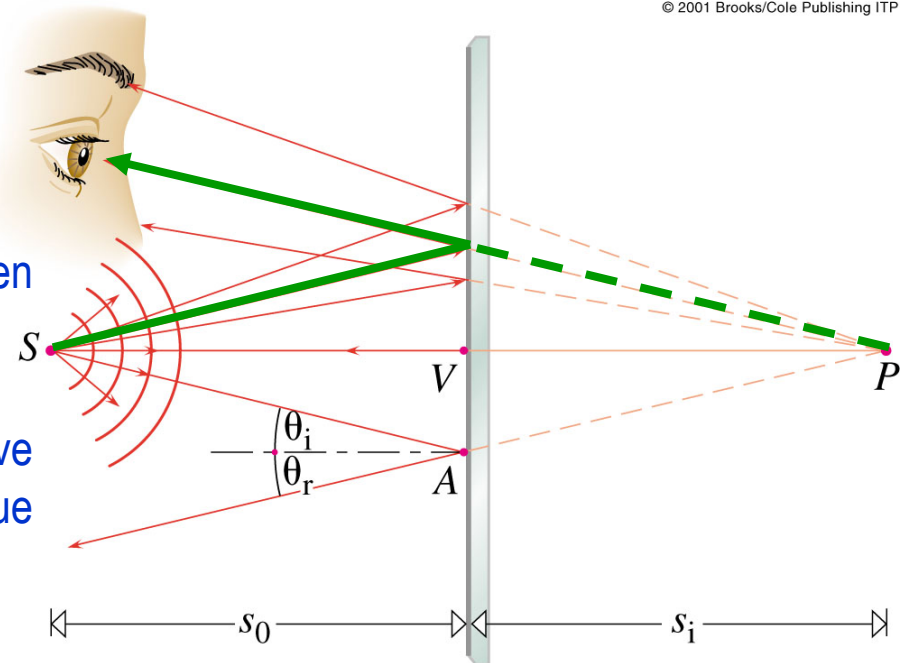
SOLUTION : $\angle VSA = \theta_i$ $\angle VPA = \theta_r$

Par la loi de la réflexion $\theta_i = \theta_r$.

Les deux triangles VAS et VAP ont le côté VA en commun: ils sont par conséquent égaux.

Ainsi $VS = VP$ et l'image de l'objet se trouve derrière le miroir à la même distance normale que l'objet:

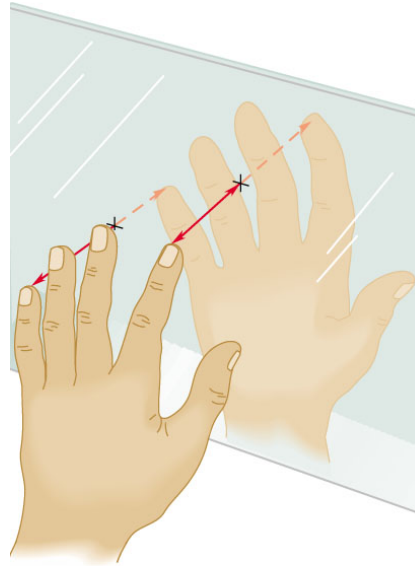
$$s_i = s_o$$



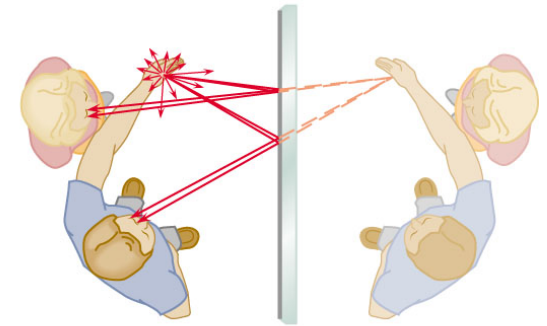
La réflexion sur un miroir plan

L'image d'une main peut être facilement tracée en utilisant des rayons émis perpendiculairement au miroir ($\theta_i = \theta_r = 0$).

L'image d'une main gauche est une main droite de même grandeur. La réflexion sur un miroir transforme un système de référence droit en un système de référence gauche et vice-versa (symétrie par rapport au plan du miroir).



(a)



(b)

© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

L'image miroir est virtuelle, non déformée, non renversée, de même grandeur et située derrière le miroir à la même distance que l'objet. On parle d'une image virtuelle pour la distinguer d'une image réelle que la lumière traverse vraiment et qui apparaît sur un écran mis à la position de l'image. Nous verrons plus loin que les lentilles peuvent former des images réelles.

La réfraction – La loi de Snell-Descartes

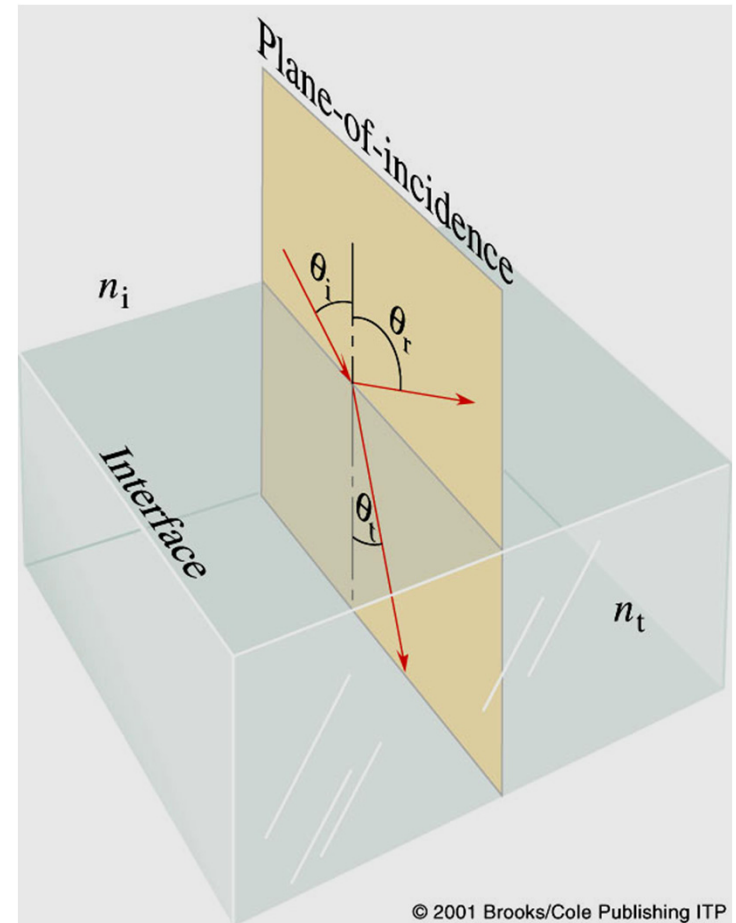
Quand la lumière passe d'un milieu à un autre, une partie de la lumière incidente est réfléchiée à l'interface, et le reste passe dans le nouveau milieu.

Un rayon lumineux qui arrive à l'interface avec un certain angle θ_i (non perpendiculaire) est dévié en entrant dans le nouveau milieu. Cette déviation s'appelle **réfraction**.

La réfraction est une conséquence directe de la réduction de la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu dense comparé à sa vitesse dans le vide.

Les rayons incident, réfléchi et réfracté sont dans le **plan d'incidence**. On mesure les angles d'incidence, θ_i , et de réfraction, θ_r , par rapport à la normale à la surface. n_i et n_t sont les indices de réfraction de chaque milieu respectif. En 1621, Descartes et Snell ont établi indépendamment la relation entre *les angles et les indices de réfraction*:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_r$$



Indice de réfraction

Lorsque la lumière rencontre une matière transparente, elle est ralentie et ne peut plus se propager à la vitesse $c = 2.9979 \times 10^8$ m/s.

L'indice de réfraction, n , mesure ce ralentissement: n est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide, c , à la vitesse de la lumière, v , dans un milieu matériel :

$$n = \frac{c}{v} \geq 1$$

Dans l'eau, la lumière voyage à $\sim 3/4c$.

Dans l'air, sa vitesse n'est que très légèrement moindre que dans le vide. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de l'indice de réfraction pour la lumière jaune ($\lambda = 589$ nm).

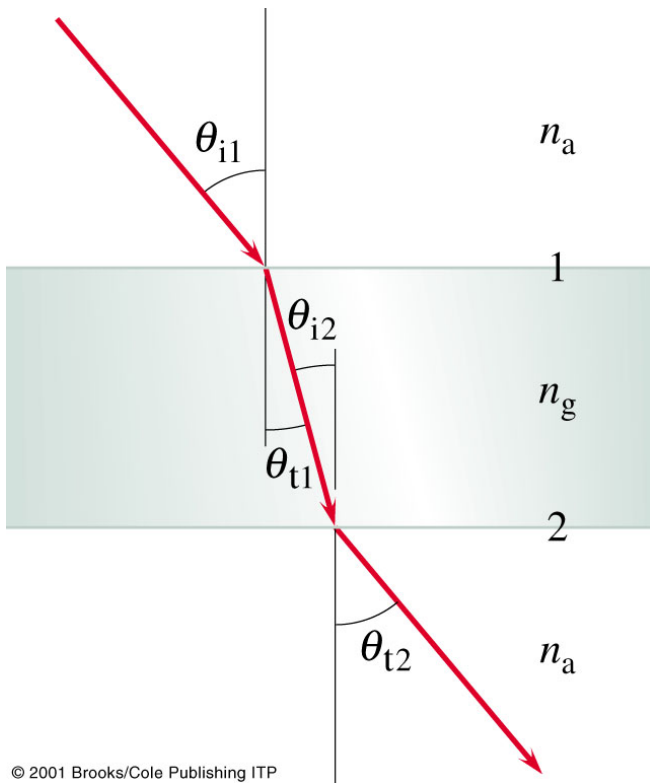
Milieu	Indice	Milieu	Indice
Vide	exactement 1	Chlorure de sodium (sel)	1,54
Air (CNTP)	1,00029	Glace	1,31
Eau (20°)	1,333	Alcool	1,36
Quartz	1,4584	Benzène	1,501
Verre	1,52	Polystyrène	1,59
Diamant	2,417	Phosphure de Gallium	3,5

NB: n varie un peu avec la longueur d'onde de la lumière, sauf dans le vide, c'est pourquoi on spécifie souvent λ .

Dans certains matériaux, l'indice de réfraction peut dépendre de la direction de polarisation de la lumière. Ce phénomène s'appelle **biréfringence**.

La loi de Snell-Descartes – Exemple

QUESTION : Soit un faisceau de lumière arrivant sur une plaque de verre ($n_g = 1.5$) sous un angle d'incidence de 60° . a) A quel angle est-il transmis dans la lame? b) Montrez que le faisceau émerge de la seconde face parallèlement à sa direction initiale (on suppose que la lame est dans l'air, $n_a = 1$).



SOLUTION : a) On applique la loi de Snell-Descartes à la 1^{ère} interface: $n_a \sin \theta_{i1} = n_g \sin \theta_{t1}$:

$$\sin \theta_{t1} = (n_a / n_g) \sin \theta_{i1} = (1.0 / 1.5) \sin 60^\circ = 0.577$$
$$\rightarrow \theta_{t1} = 35.3^\circ$$

b) On applique la loi de Snell-Descartes à la 2^{ème} interface: $n_g \sin \theta_{i2} = n_a \sin \theta_{t2}$:

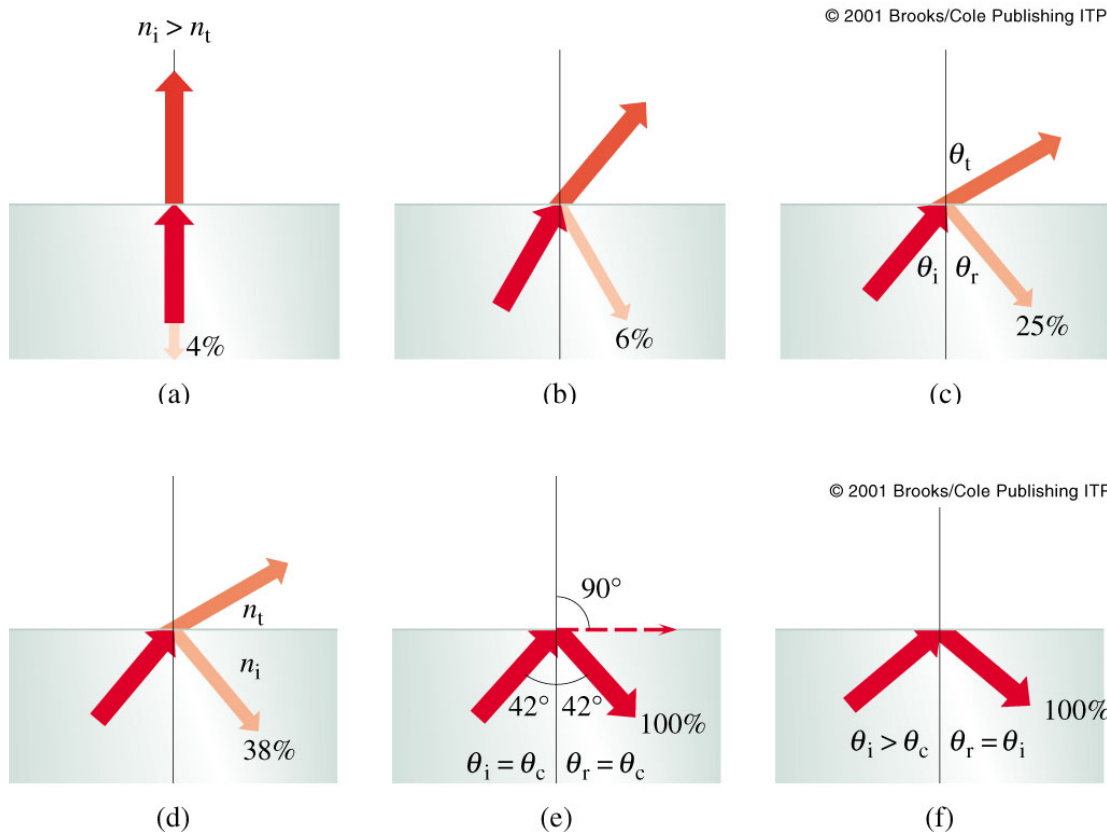
$$\sin \theta_{t2} = (n_g / n_a) \sin \theta_{i2} = (1.5 / 1.0) \sin 35.3^\circ = 0.867$$
$$\rightarrow \theta_{t2} = 60^\circ$$

La lumière émerge parallèlement à sa direction incidente.

Réflexion totale

Quand la lumière passe d'un milieu à un autre d'indice de réfraction plus petit (par exemple de l'eau à l'air), la lumière dévie en s'éloignant de la normale.

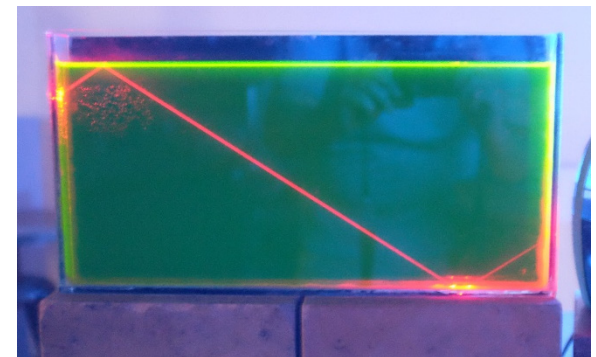
Dans ce cas il existe un angle d'incidence particulier (**angle critique**) où l'angle de réfraction sera 90° et le rayon réfracté rase la surface.



D'après la loi de Snell-Descartes:

$$\sin \theta_c = \frac{n_t \sin 90^\circ}{n_i} = \frac{n_t}{n_i}$$

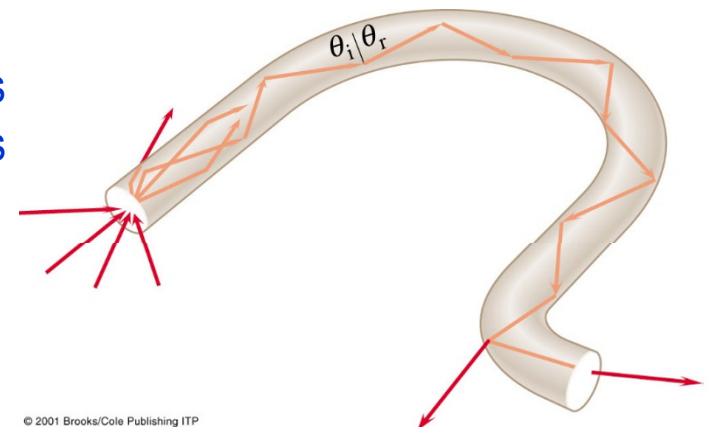
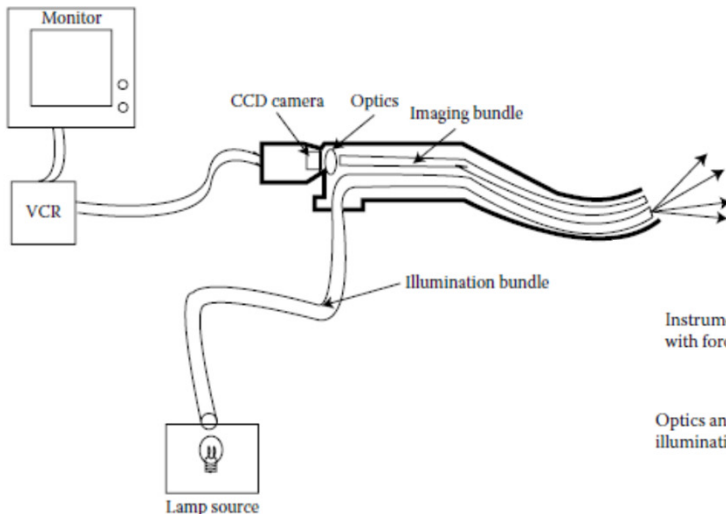
Pour les angles d'incidence supérieurs à θ_c , toute la lumière est réfléchi. Ce phénomène est appelé **réflexion totale interne**.



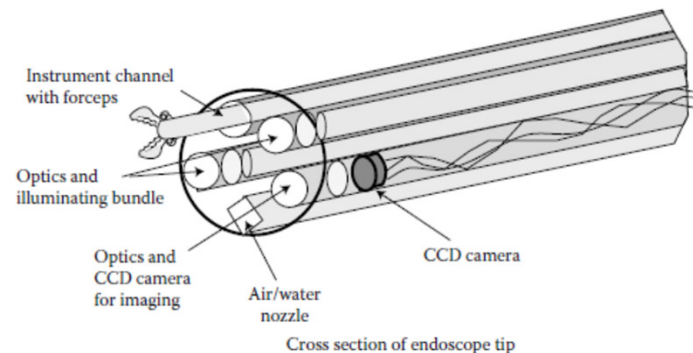
Les fibres optiques

Les fibres optiques sont une des applications les plus importantes de la réflexion interne totale. On peut transmettre très efficacement la lumière et le proche infrarouge ($\lambda=1300\text{ nm}$) le long de fibres minces d'un diélectrique transparent. À cause du petit diamètre de la fibre ($50\mu\text{m}$), la plupart de la lumière entrant à une extrémité tombe sur la surface cylindrique latérale sous un grand angle d'incidence; elle subit alors une réflexion totale et cela peut se répéter des centaines de fois par centimètre.

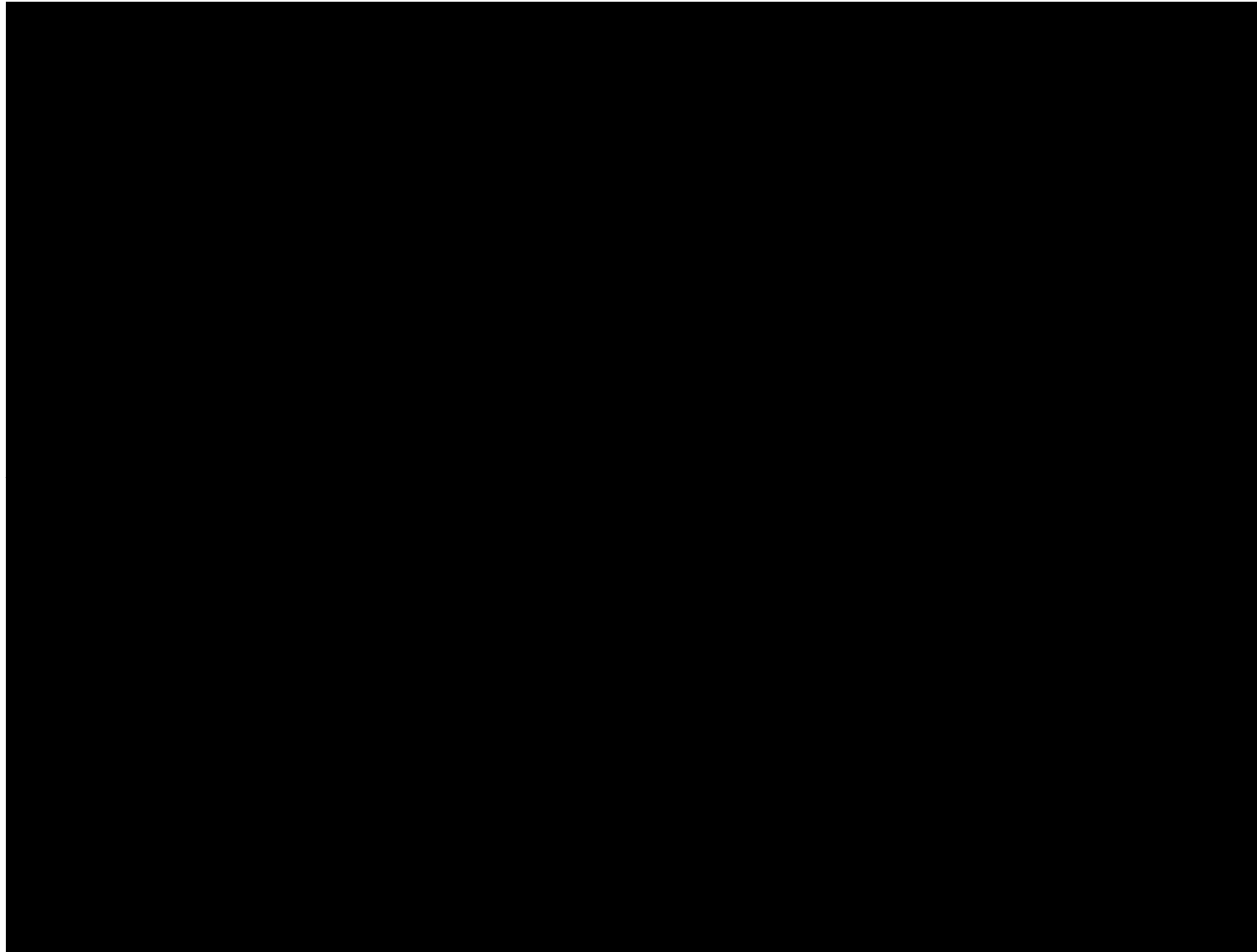
Il est fréquent aujourd'hui d'utiliser des fibres optiques pour observer des endroits inaccessibles, comme les organes à l'intérieur du corps (endoscopes).



© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP



Les fibres optiques



Dispersion chromatique

L'indice de réfraction n d'un milieu quelconque, excepté le vide, dépend de la longueur d'onde, donc de la fréquence de la lumière. La **variation de la vitesse de propagation avec la fréquence** de la radiation est appelée **dispersion**.

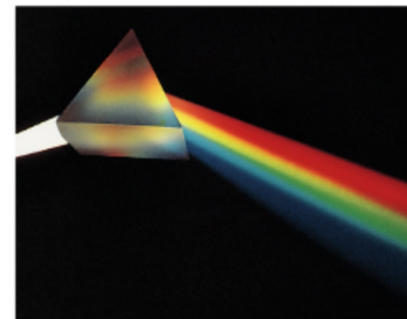
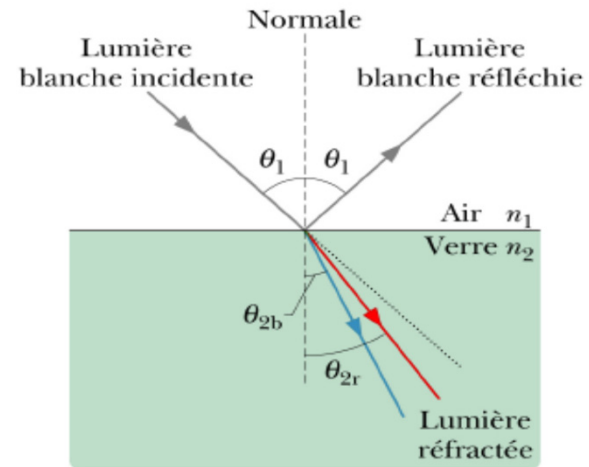
La conséquence de cette dispersion est que des longueurs d'onde différentes sont réfractées à des angles différents par une interface. **La lumière blanche est formée d'un mélange de longueurs d'onde s'étendant au moins sur tout le spectre visible**. Ces composantes se séparent lorsqu'elles franchissent une jonction air-verre sous une incidence non nulle.

Un prisme permet d'amplifier la séparation des couleurs: la dispersion de la 1^{ère} interface est amplifiée par la seconde.

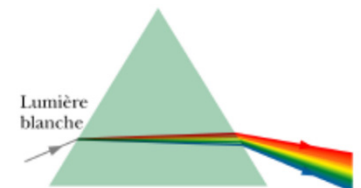
Dans le spectre visible, la dispersion chromatique du verre s'exprime comme (Loi de Cauchy):

$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} \quad \left(n = \frac{c}{v} \right)$$

La composante bleue est plus déviée que la composante rouge.



a)



b)

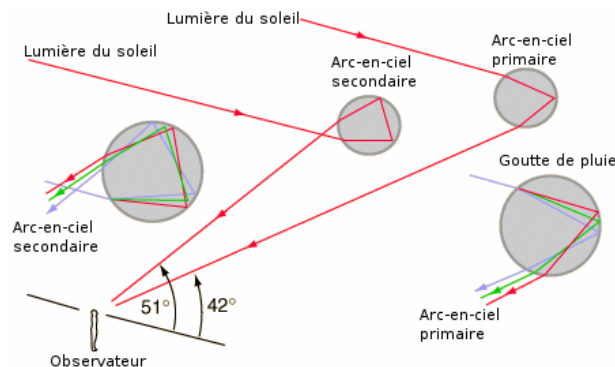
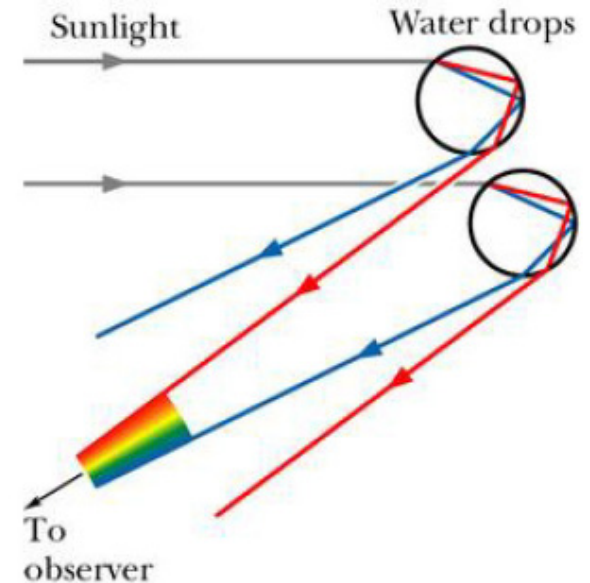
Arc-en-ciel

L'arc-en-ciel est certainement l'exemple de dispersion chromatique le plus spectaculaire:

Quand la lumière du soleil est interceptée par une goutte de pluie ayant un diamètre de l'ordre du mm, une partie de la lumière est **réfractée** à l'intérieur de la goutte, puis **réfléchi** sur la face intérieure de la goutte (réflexion totale), puis à nouveau **réfractée** à la sortie de la goutte.

L'arc-en-ciel qu'on voit est produit par la lumière réfractée par des milliers de gouttes: le rouge provient de gouttes situées plus haut dans le ciel, le bleu de gouttes plus basses.

Il peut y avoir un deuxième arc-en-ciel, plus faible. Il est le résultat d'une deuxième réflexion de la lumière à l'intérieur de la goutte d'eau.



PROCHAINE SÉANCE D'EXERCICES

Mardi 3 Mars 13:15 – 15:00

Salles Müller et S1-S2