

# Lumière et imagerie

Étienne Parizot  
(APC – Université Paris 7)



## Leçons précédentes

- ① } Mathématiques
- ② } (Fonctions de 1 ou plusieurs variables, dérivation, intégration...)
  
- ③ Espace-temps-matière / cinématique (solides)
- ④ Dynamique : forces, travail, énergie
  
- ⑤ Chaleur, thermodynamique / Gaz parfaits  
(Concepts classiques appliqués à l'échelle microscopique...)
  
- ⑥ } Fluides, viscosité
- ⑦ } (Corps composés non rigides, important pour le corps humain...)
  
- ⑧ } Ondes et oscillations
- ⑨ } (Support matériel, forces de rappel, transport d'énergie...)
  
- ⑩ Lumière et imagerie  
→ réalité physique totalement différente !

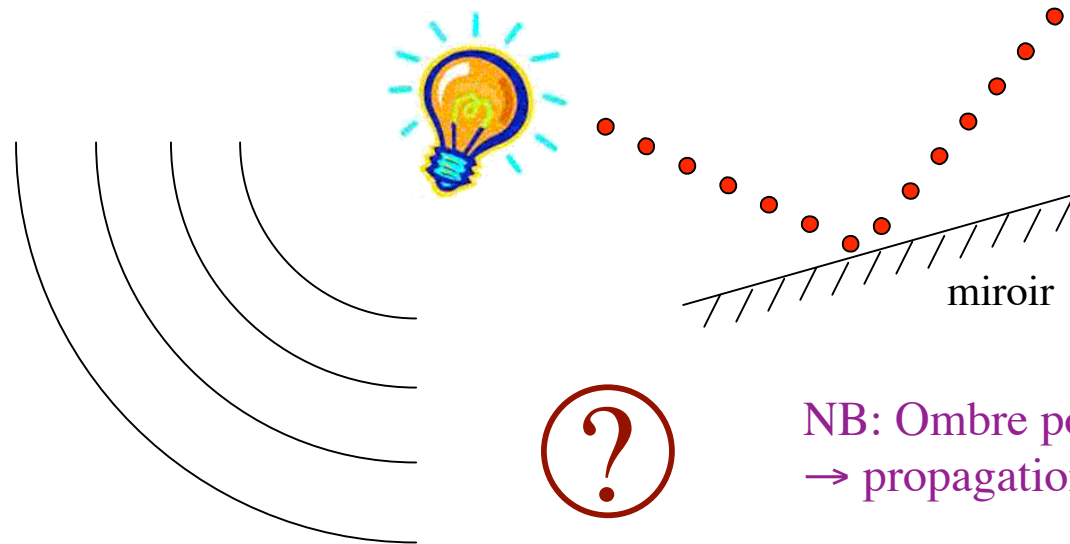
# I - Lumière

# Lumière et abandon de la physique classique

- Physique classique, jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle :
  - théorie de la matière (mécanique, macro et micro, chimie)
  - théorie des phénomènes électriques et magnétiques (Faraday, Maxwell...)
    - théorie de la lumière : onde électromagnétique !
- Avec l'étude de la lumière, la science aborde un aspect totalement différent de la réalité physique, qui montre que les notions intuitives (espace, temps, matière) sont à revoir
  - paradoxes et propriétés contradictoires
- Nature essentiellement relativiste :
  - «  $c$  » non seulement vitesse de la lumière, mais aussi vitesse absolue, liée à la structure de l'espace-temps !
- Nature essentiellement quantique :
  - dualité onde/corpuscule, description fondamentalement probabiliste, « quanta »
  - « discrets »...

# Lumière : onde ou flux de particules ?

- Théorie ondulatoire : Christiaan Huygens (1629–1695)
- Théorie corpusculaire : Isaac Newton (1643–1727)

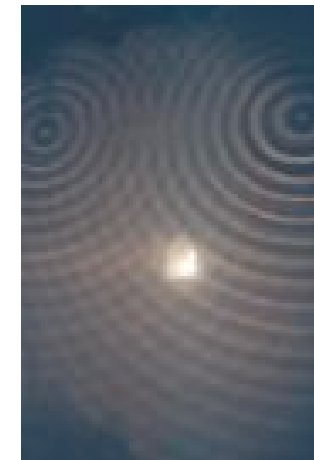
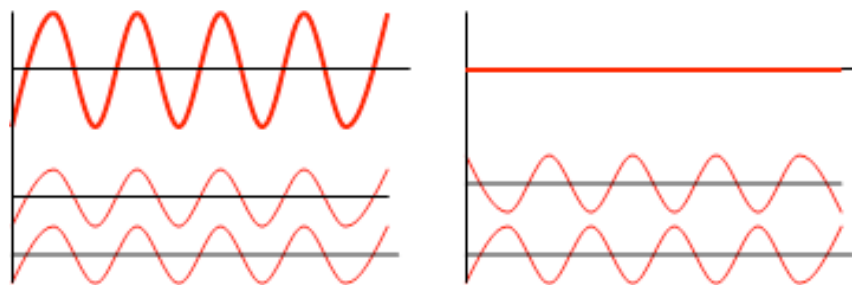


NB: Ombre portée  
→ propagation rectiligne

- ➔ ● En fait, c'est une onde – mais d'un type vraiment très spécial, contradictoire avec la notion classique d'onde ! –,...
- ...et c'est aussi un flux de particules – mais d'un type vraiment très spécial, contradictoire avec la notion classique de particules !

# Lumière : onde ou flux de particules ?

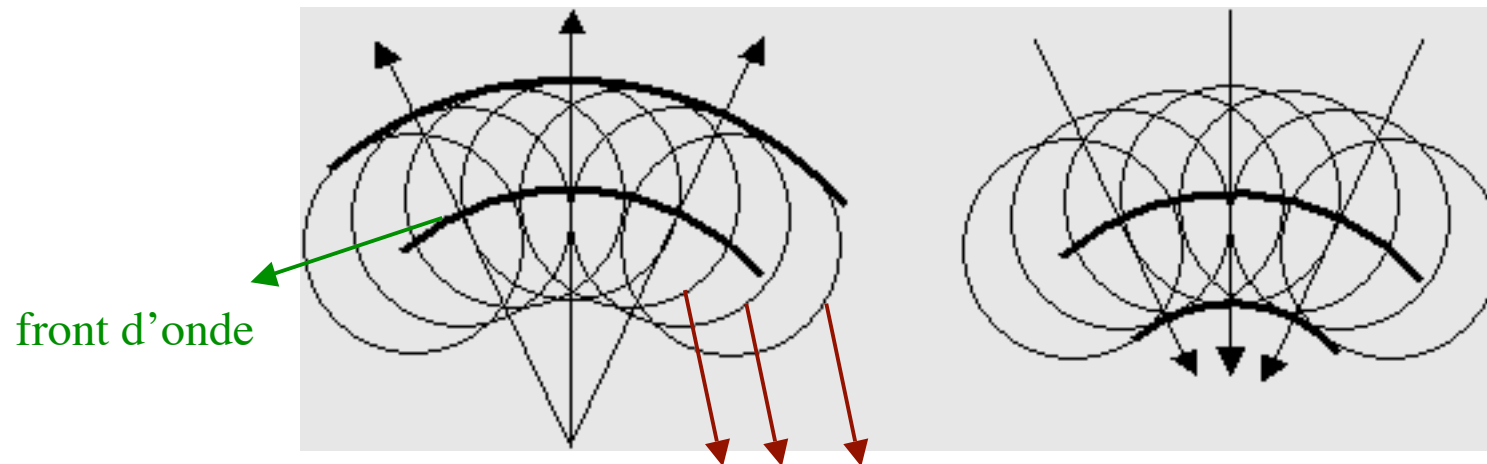
- Caractéristiques des particules :
  - individualité
  - action localisée
  - propriétés numériques : on peut les considérer une par une, en ajouter, en soustraire, etc.
- Caractéristiques des ondes :
  - fréquence, longueur d'onde, amplitude
  - diffraction
  - interférences



ondulations à la surface de l'eau

## Onde : principe de Huygens (« sources secondaires »)

- « Nous pouvons considérer que tous les points atteints en même temps par l'onde sont les centres d'ondelettes qui se renforcent sur leur enveloppe commune : l'onde principale. L'énergie n'est appréciable que sur celle-ci. »
- Chaque point participant à l'onde peut être considéré comme une source secondaire, au même titre que tous les autres points atteints par l'onde au même moment...



Fronts d'onde individuels des "ondes secondaires" qui seraient issues de sources secondaires sur le front d'onde...

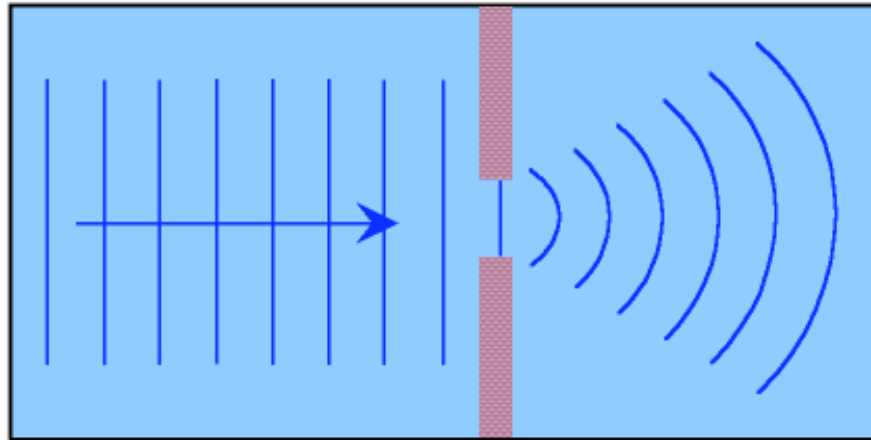
# Principe de Huygens et « sources secondaires »

- Exemple : chaque point de la mer, par exemple au sommet d'une vague, agit comme une source d'onde : s'il était seul, il produirait une onde sphérique, comme un caillou tombant dans un lac...
- Son : onde de pression : chaque point est caractérisé par la pression de l'air locale, qui met en mouvement la "tranche d'air" voisine (les molécules) : ce point agit donc lui-même comme une source "secondaire"
- NB: Cette caractéristique est aisément compréhensible dans une théorie où les effets produits par différentes causes se superposent linéairement (« principe de superposition »), et où la propagation des ondes est due à des phénomènes locaux (forces de rappel, transmission de proche en proche...)
- Principe de Huygens pour la lumière (théorie ondulatoire) : chaque point de l'espace traversé par la lumière peut être considéré comme une source de lumière de même caractéristique que la lumière incidente (amplitude locale, fréquence, longueur d'onde)



# Diffraction d'une onde

- Trou d'une taille comparable à la longueur d'onde :

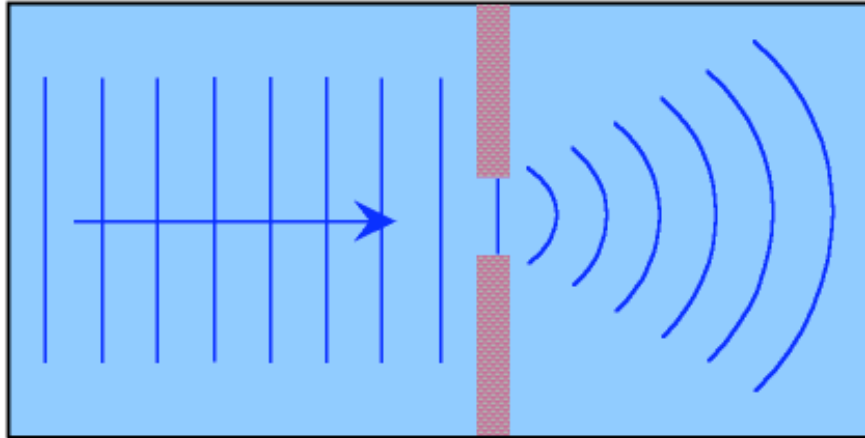


Le trou isole un ensemble de « sources secondaires » cohérentes  
→ le comportement résultant est celui d'une source quasi ponctuelle

- Mais si le trou est beaucoup plus grand que la longueur d'onde, les « sources secondaires » sont incohérentes (car séparées par des distances importantes à l'échelle de la longueur d'onde) : le résultat est peu différent de celui obtenu sans obstacle.

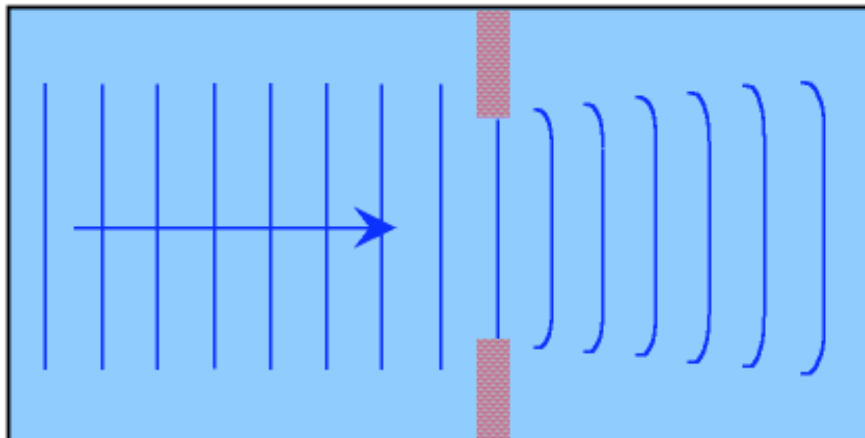
# Diffraction d'une onde

- Trou d'une taille comparable à la longueur d'onde :



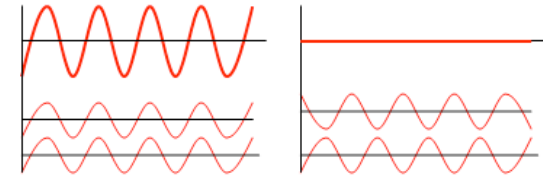
Diffraction importante

- Trou de grande taille par rapport à la longueur d'onde :

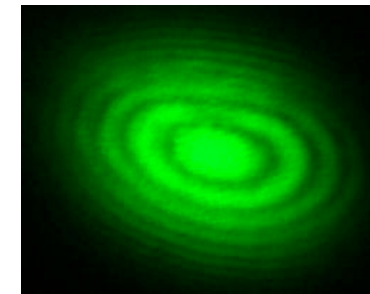
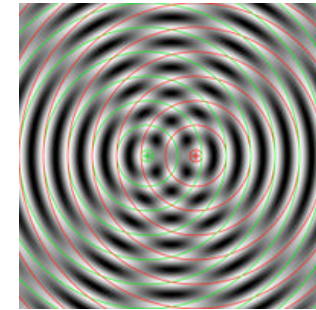
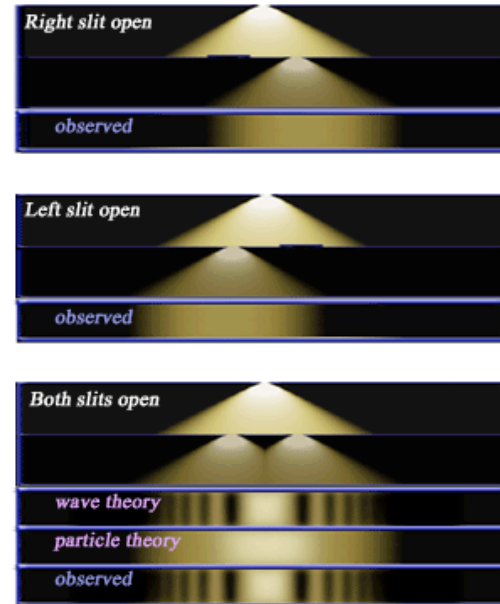
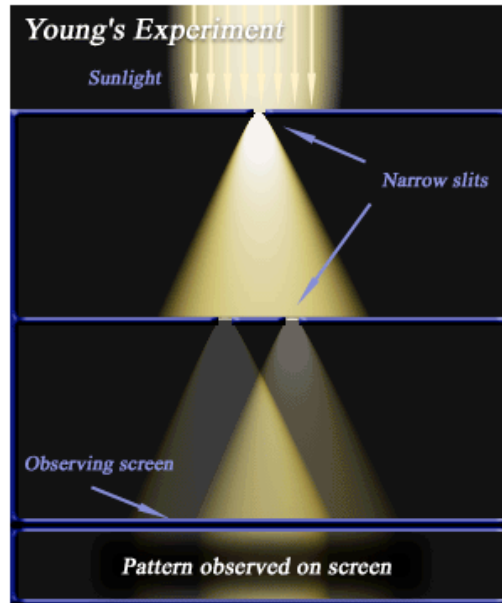


Diffraction négligeable

# La lumière est bien une onde !



- Huygens : double réfraction (spath d'Islande)...
- Fresnel, Young : la lumière peut être diffractée (si le diaphragme est assez petit) + expériences d'interférence !



Interféromètre de Michelson

- Interférences : lumière + lumière = ombre !  
(incompatible avec théorie corpusculaire)

→ mesure des longueurs d'onde !

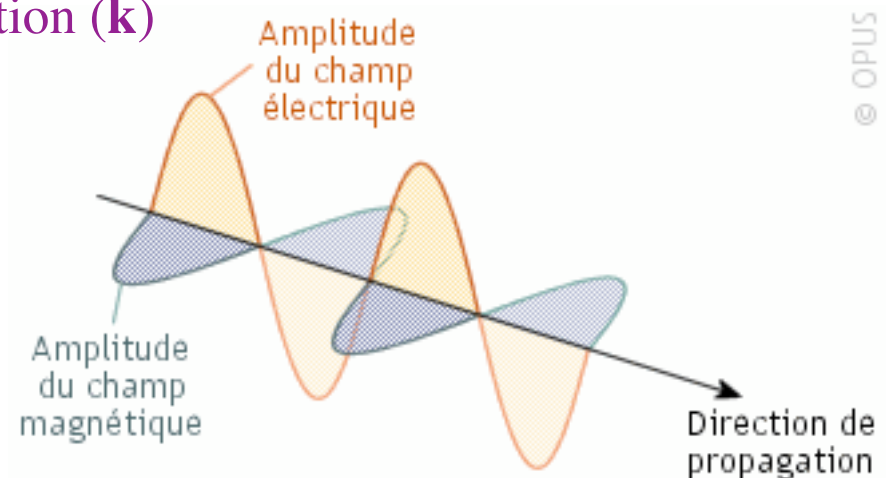
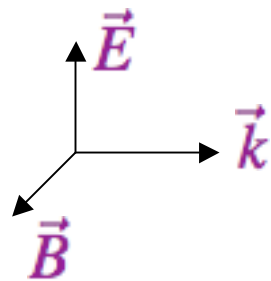
# Lumière = onde électromagnétique

- James Clerk Maxwell (1831–1879) : unification des phénomènes électriques et magnétiques

→ champs E et B, médiateurs d'une interaction fondamentale liée aux charges électriques et à leur mouvement (courants)

Des ondes de champ électrique et de champ magnétique couplées apparaissent de manière naturelle dans la théorie, en raison du lien fondamental existant entre ces champs (phénomène d'induction : quand l'un varie, il génère l'autre...)

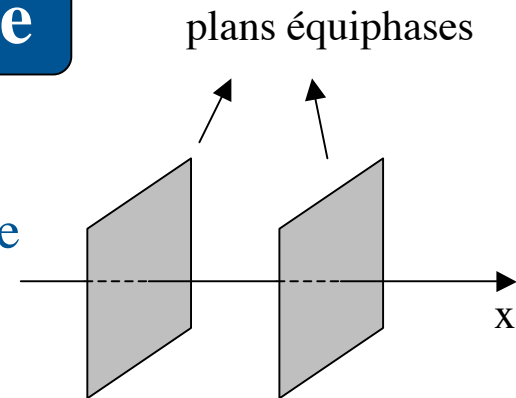
- Onde transversale : champ électrique ( $\vec{E}$ )  $\perp$  champ magnétique ( $\vec{B}$ )  $\perp$  direction de propagation ( $\vec{k}$ )



# Lumière = onde électromagnétique

- Exemple type : onde plane monochromatique

$$E(x, t) = E_0 \sin(kx - \omega t)$$



nombre d'onde

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

longueur d'onde

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

pulsation

fréquence

période

- La vitesse de phase de l'onde est... la vitesse de la lumière !

$$\omega = kc$$

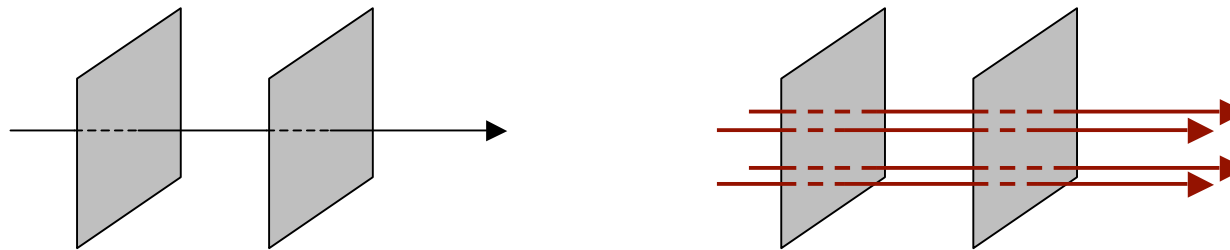
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

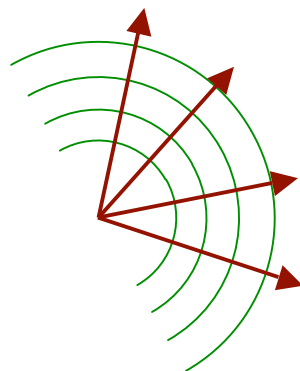
- Cas général : superposition quelconque d'onde planes monochromatiques (cf. théorème de Fourier)

# Onde de lumière et rayon lumineux

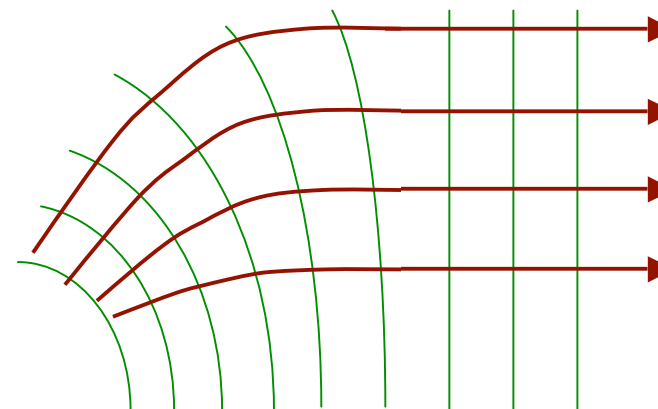
- Un « rayon lumineux » est une abstraction définie comme étant une ligne partout orthogonale aux surfaces équiphasés (surfaces d'onde)



onde plane  $\Leftrightarrow$  faisceau de rayons parallèles



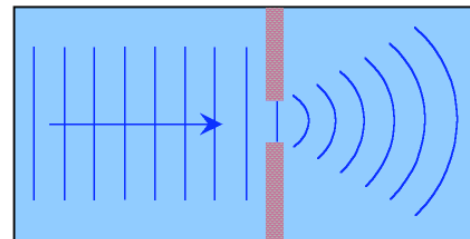
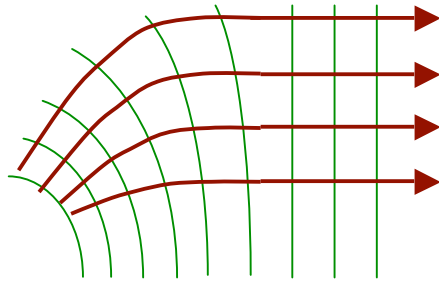
onde sphérique  
 $\Leftrightarrow$  faisceau de rayons radiaux



rayons courbés

# Onde de lumière et rayon lumineux

- Attention ! Un rayon lumineux ne peut pas être isolé !
  - il faut qu'il existe une surface d'onde !
  - diffraction : on ne peut réduire la largeur d'un pinceau lumineux (e.g. par un diaphragme) en deçà de une ou quelques longueurs d'ondes



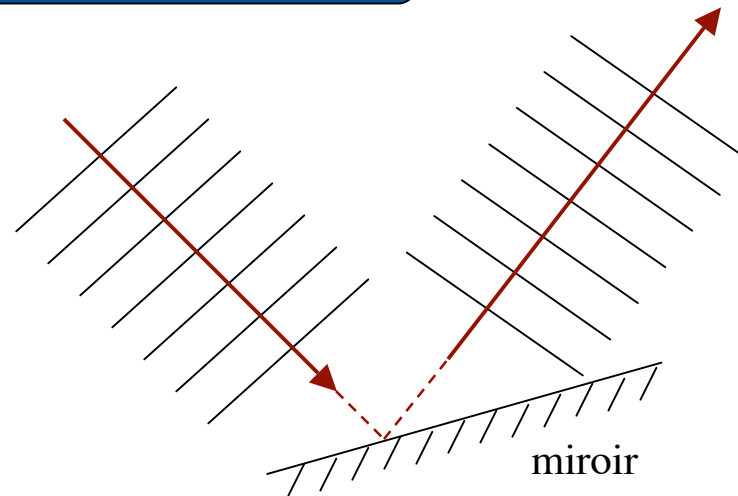
- ⇒ un rayon lumineux n'a pas de réalité physique  
Mais c'est une abstraction utile, au cœur de l'« optique géométrique », qui décrit la propagation de lumière (air, vide, milieux transparents, dioptries, lentilles, miroirs...) via les trajectoires des rayons lumineux.

NB: notion de rayon lumineux introduite par Euclide (-330, -270)

# Réflexion et réfraction de la lumière

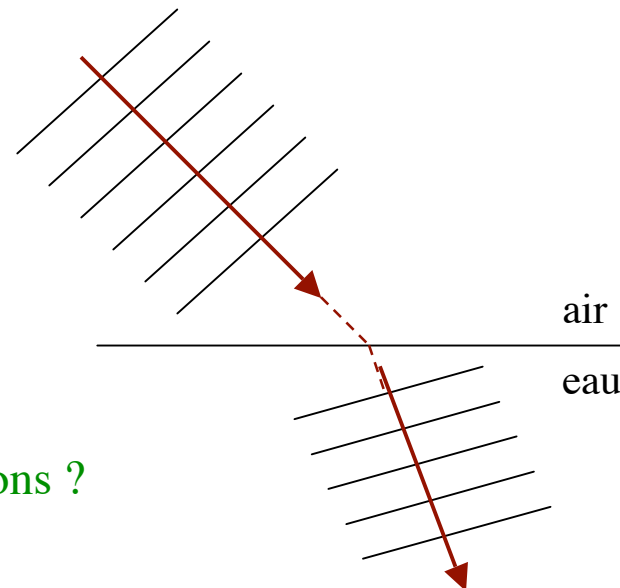
- Réflexion sur un miroir

Il est plus simple de raisonner en termes de rayons que de surfaces d'onde



- Changement de milieu : réfraction

Les rayons changent de direction...



- Pourquoi ? Quelle loi décrit ces déviations ?



# Lois de Descartes

On dit aussi « lois de Snell-Descartes »  
En fait : lois d'Alhazen-Snell-Descartes !

René Descartes (1596 – 1650)

Willebrord Snell (1580 – 1626)

Ibn al Haytham (Alhazen) (965–1039)

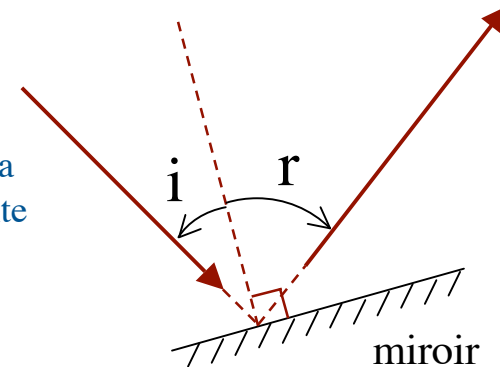
## Lois de la réflexion :

1 Le rayon réfléchi est dans le plan incident

2  $r = -i$

↓  
l'angle de réflexion est égal (et opposé) à l'angle d'incidence

↓  
(défini par le rayon incident et la normale à la surface réfléchissante au point d'arrivée du rayon)

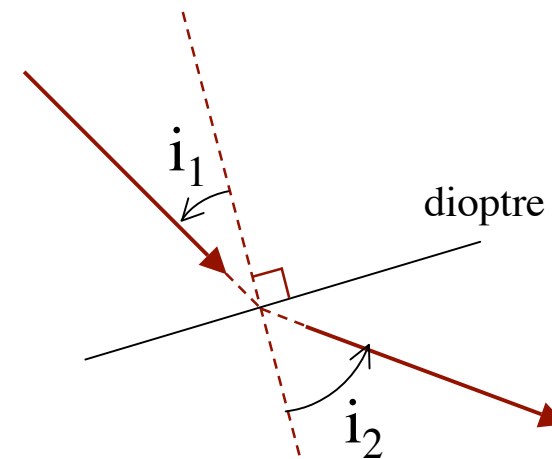


## Lois de la réfraction :

1 Le rayon réfracté est dans le plan incident

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

$n$  = « indice de réfraction »,  
caractéristique du milieu



# Indice de réfraction

- L'indice de réfraction d'un milieu transparent est lié à la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu

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

vitesse de la lumière dans le milieu      vitesse de la lumière dans le vide  
indice de réfraction

- Exemples :

vide	1
air	1,0003
eau	1,33
éthanol	1,362
glycérine	1,473
verre	1,5 à 1,78
diamant	2,417

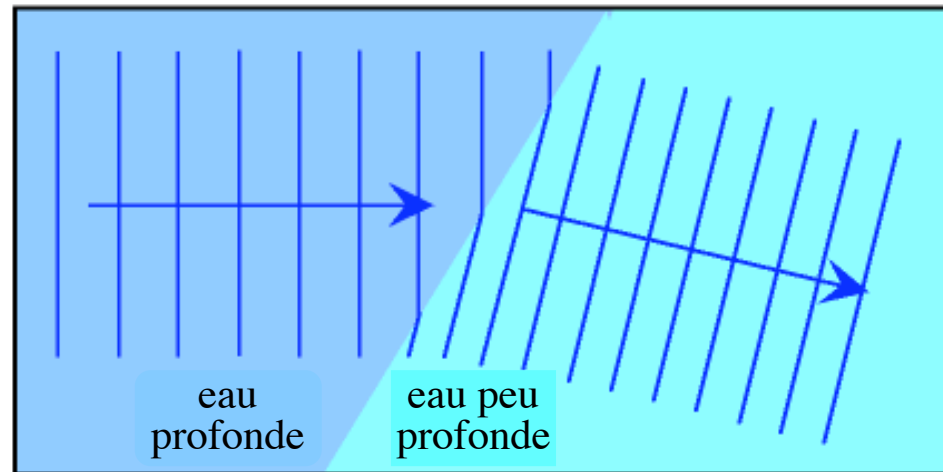
- NB: l'indice de réfraction dépend de la fréquence !

Diamant : 2.407 pour la lumière rouge (687 nm), 2.418 pour la lumière jaune, et 2.451 pour la lumière bleue (431 nm)

# Réfraction et vitesse de propagation

- Ralentissement du front d'onde  $\Rightarrow$  changement d'orientation des surfaces équiphasés  $\Rightarrow$  changement de direction des rayons associés

NB: valable pour la lumière, mais aussi pour les vagues à la surface de l'eau, par exemple !



- La fréquence des ondes n'est pas modifiée par le milieu de propagation  $\Rightarrow$  une diminution de la vitesse entraîne une diminution de la longueur d'onde !

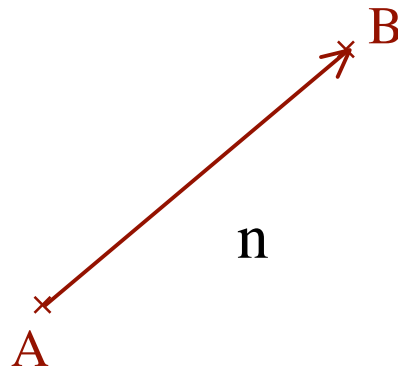
$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n\nu}$$

# Principe de Fermat

- Pour aller d'un point à un autre, la lumière emprunte le chemin le plus court, **en temps** (et non en distance !)

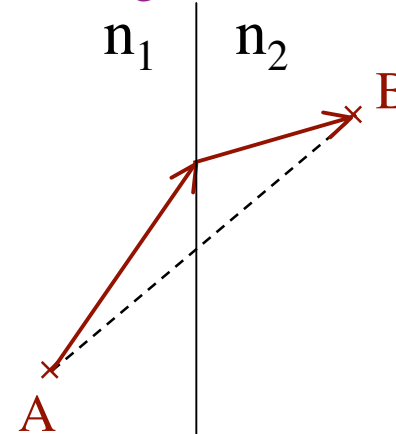
$$\delta\left(\int_A^B dt\right) = 0 \implies \int_A^B dt = \int_A^B \frac{dl}{v} = \int_A^B \frac{n}{c} dl \implies \delta\left(\int_A^B n dl\right) = 0$$

milieu homogène  
(indice constant)



temps le plus court  $\Leftrightarrow$  distance  
la plus courte  $\Rightarrow$  ligne droite

changement d'indice



temps le plus court  $\Rightarrow$  chemin plus  
long dans la partie plus rapide

- Les lois de la réflexion et de la réfraction en découlent !

(démonstration en TD)

# La lumière est faite de particules !

- En 1900, Max Planck introduit la notion de quantum d'énergie associée au rayonnement électromagnétique (lumière):

À une fréquence donnée, un corps ne peut émettre ou recevoir de la lumière qu'avec une énergie totale égale à un multiple entier d'une quantité minimale d'énergie lumineuse, correspondant à un quantum élémentaire : le *photon*.

- Quantum d'énergie à la fréquence  $\nu$  :  $E = h\nu$  ( $E = h\frac{c}{\lambda}$ )

$$\underline{h \approx 6,626\ 068\ 76 \times 10^{-34} \text{ J.s}}$$

« constante de Planck »

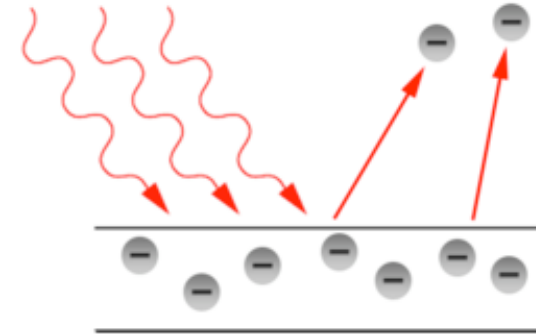
→ extrêmement faible (passe inaperçu à l'échelle ordinaire)

- NB: Planck introduit cette idée de manière empirique : elle lui permet d'expliquer le spectre du rayonnement de corps noir...

➡ acte de naissance de la théorie quantique !

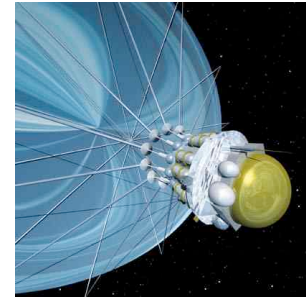
# La lumière est faite de particules !

- **Effet photoélectrique** : émission d'électrons par un matériau exposé à la lumière (découvert en 1887 par Heinrich Hertz)  
→ panneaux solaires, cellules photovoltaïques



- Le phénomène ne se produit pas au-dessous d'une certaine fréquence de la lumière : augmenter l'intensité, et donc l'énergie de l'onde ne change rien !  
→ impossible à comprendre dans le cadre de la théorie ondulatoire.
- En 1905, Albert Einstein explique l'effet photoélectrique au moyen de la théorie des quanta : il décrit ainsi la lumière comme étant composée de « photons »  
transferts d'énergie **individuels** de la lumière aux électrons  
→ interactions ponctuelles et discrètes (i.e. par quantités fixes)

# Le photon : quantum de lumière



- Tous les photons correspondant à une lumière de fréquence donnée ont la même énergie :  $E = h\nu$  (NB: un « quantum », des « quanta »...)

- Plus grande intensité  $\Leftrightarrow$  plus de photons (par seconde)

→ explique le seuil en fréquence – énergie des photons *individuels* ! – de l’effet photoélectrique

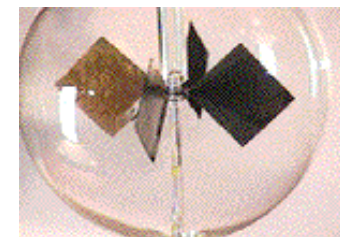
- Les photons sont porteurs d’énergie ( $E = h\nu$ ) : le Soleil chauffe !  
Le feu et les ampoules électriques aussi !

Puissance solaire reçue sur Terre :  $\sim 1000 \text{ W/m}^2$  !

- Les photons sont porteurs de quantité de mouvement !

$$p = \frac{h\nu}{c}$$

$$E = pc$$



pression de radiation

→ collisions photon-matière, avec conservation de E et de p totales

→ Vent solaire, queue des comètes, voiles photoniques, radiomètre de Crookes...

# La lumière : une nature contradictoire

- C'est une onde : diffraction, interférences, mesure de longueur d'onde, (+ identifiée explicitement comme onde électromagnétique !)...
- ...mais une onde d'un type très particulier !
  - pas de support matériel !
  - se propage dans... rien ! (pas d'éther, ou alors « vide quantique »)
  - interagit de manière localisée !
  - toutes les amplitudes ne sont pas accessibles !
  - pas de passage continu d'une amplitude à une autre !



# La lumière : une nature contradictoire

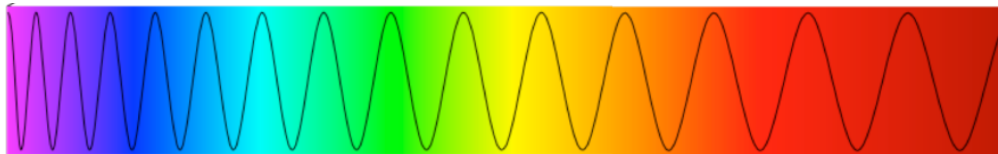
- C'est un flux de particules : interactions discrètes et localisées, quantum d'énergie (individualité), effet photoélectrique, etc.
- ...mais des particules d'un type très particulier !
  - capables de produire des interférences ! ( $1 + 1 = 0$ )
  - ont une longueur d'onde et une fréquence intrinsèques !
  - action localisée, mais probabilité de présence distribuée dans l'infinité de l'espace (*Physique quantique*)
  - masse nulle !  $m = 0$  : pas de la matière, mais interagit avec la matière !
  - $m = 0$ , mais énergie  $E \neq 0$
  - $M = 0$ , quantité de mouvement  $p \neq 0$  !
  - $v = c$ , quelque soit le référentiel ! Impossible d'arrêter un photon...  
(*Physique relativiste*)

➔ Paradoxes insolubles dans une représentation classique du monde !  
→ « théorie quantique des champs »

## II - Couleurs et spectres

# Lumière et couleur

- À chaque fréquence de l'onde électromagnétique (lumière visible) correspond une couleur...



Violet	380–450 nm
Bleu	450–495 nm
Vert	495–570 nm
Jaune	570–590 nm
Orange	590–620 nm
Rouge	620–750 nm

- ...mais l'inverse n'est pas vrai !

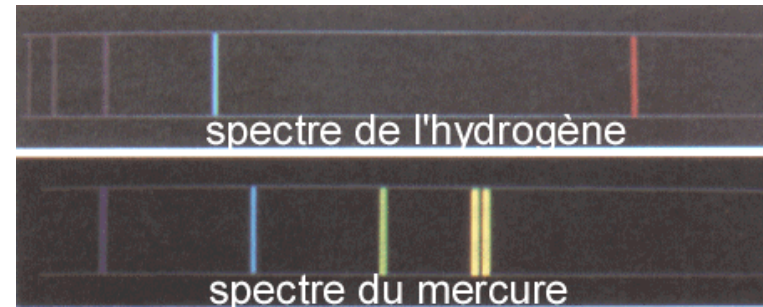
En général, les couleurs résultent de la combinaison d'un grand nombre (infinité) de fréquences (ou longueurs d'onde), avec des intensités relatives spécifiques

- La couleur n'est pas une grandeur physique

Phénomène perceptif, qui donne accès, de manière rudimentaire (mais spectaculaire !), à une information sur le contenu en fréquences (ou en  $\lambda$ ) de la lumière



# Spectre de la lumière



- Lumière monochromatique : une seule longueur d'onde (ou fréquence) présente

C'est toujours une idéalisation, très bien approchée dans le cas de la lumière émise lors d'une transition atomique

Passage d'un état d'énergie  $E_1$  à un état d'énergie  $E_2$  : photon émis d'énergie  $\Delta E = E_2 - E_1 \rightarrow$  fréquence  $\nu$  telle que  $h\nu = \Delta E$

- Cas général : superposition continue d'ondes monochromatiques
- Spectre = répartition de la lumière suivant les différentes fréquences (ou longueurs d'onde) = poids relatif de chaque fréquence (ou longueur d'onde) dans le rayonnement lumineux
- $\rightarrow$  courbe donnant l'intensité en fonction de la longueur d'onde

# Spectre de « corps noir »

- En physique, « corps noir » est un terme technique désignant un corps idéalisé qui serait à l'équilibre thermodynamique (à une certaine température  $T$ ) et parfaitement isolé du monde extérieur, en particulier sans recevoir aucune lumière
- La matière est composée de charges électriques.  
Température non nulle  $\Rightarrow$  charges en mouvement  $\Rightarrow$  génération de champs électromagnétiques : ondes correspondantes = lumière !
- Rayonnement « thermique » ou « de corps noir »  
Rayonnement lumineux émis par un corps isolé à l'équilibre (équilibre matière/rayonnement) : contient toutes les longueurs d'ondes, suivant un spectre déterminé, calculable entièrement à partir de la constante de Planck et de la vitesse de la lumière (Max Planck, 1900)
- Le spectre du « corps noir » dépend de sa température

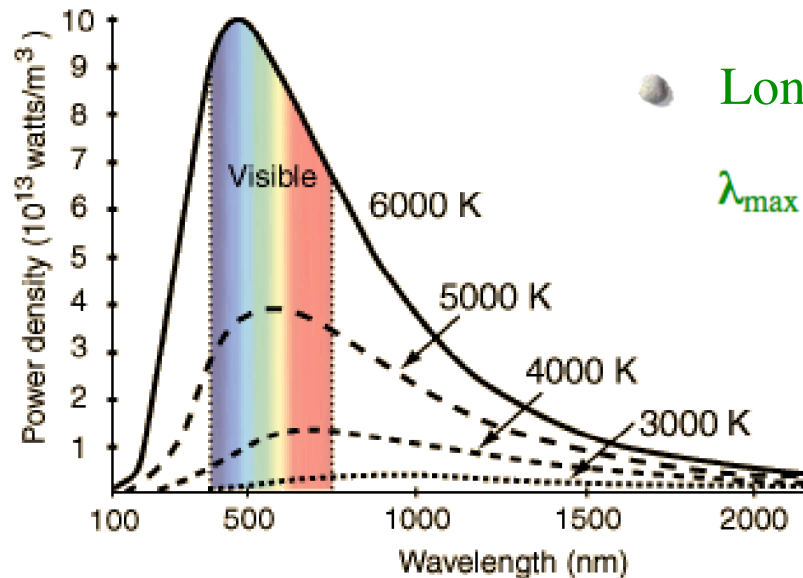
# Température et lumière

- Flux d'énergie,  $\Phi$ , émis par un corps noir (en  $\text{W}/\text{m}^2$ )

Loi de Planck : 
$$\frac{d\Phi}{d\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \times \left[ \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (\text{W}/\text{m}^2/\text{m})$$

- Loi de Stefan–Boltzmann :  $\Phi = \sigma T^4$        $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2}$

$$\sigma = 5,670\,400 \cdot 10^{-8} \text{ J.K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



- Longueur d'onde du maximum d'émission :

$$\lambda_{\max} \simeq \frac{hc}{4.965 \cdot kT} = \frac{2.898 \cdot 10^{-3}}{T} \rightarrow \text{(T en Kelvins)}$$

- Fréquence au maximum d'énergie :

$$h\nu_{\max} = 2.82 \times k_B T$$

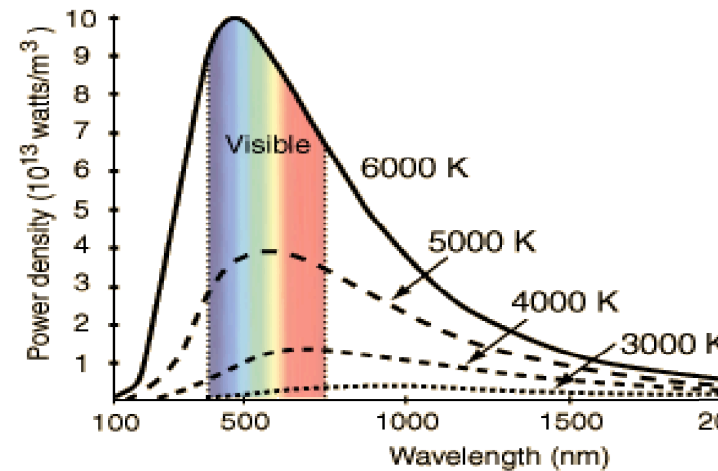
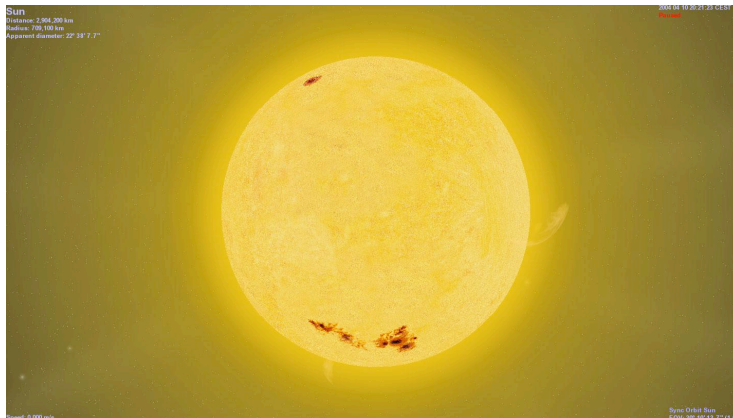
ATTENTION:  $\nu_{\max} \lambda_{\max} \neq c$

[Les photons au maximum de  $\lambda$  ne sont pas les mêmes qu'au maximum de  $\nu$  !]

# Température et lumière

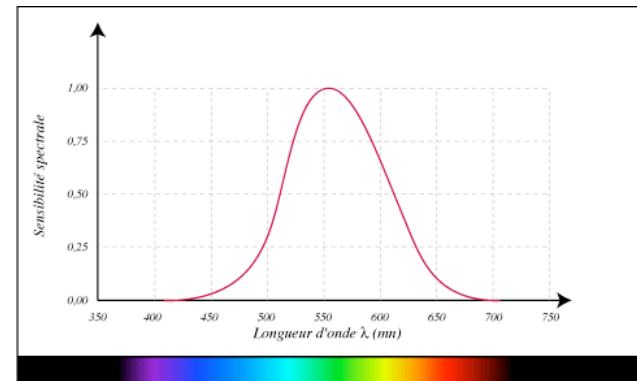
$$\lambda_{\max} \simeq \frac{2.9 \cdot 10^{-3}}{T}$$

- Corps humain à 20°C (293 K) :  $\lambda_{\max} \simeq 10 \mu\text{m}$  (infrarouge)
- Soleil à 5780 K :  $\lambda_{\max} \simeq 0.5 \mu\text{m}$  (jaune)



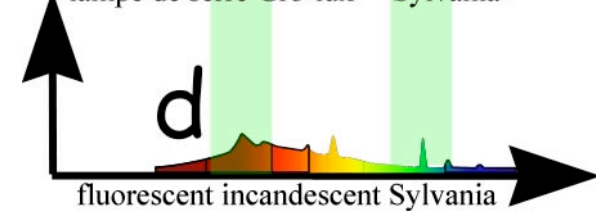
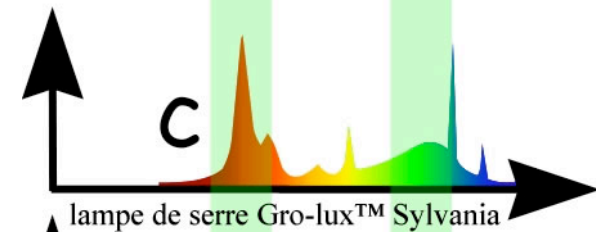
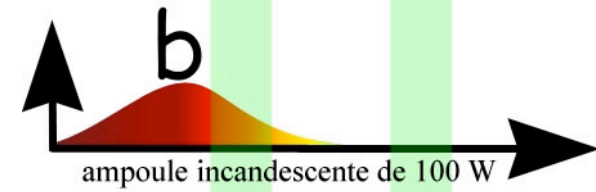
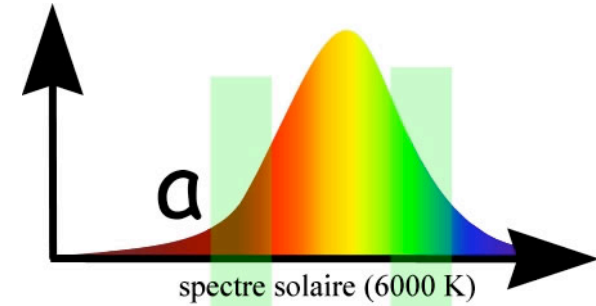
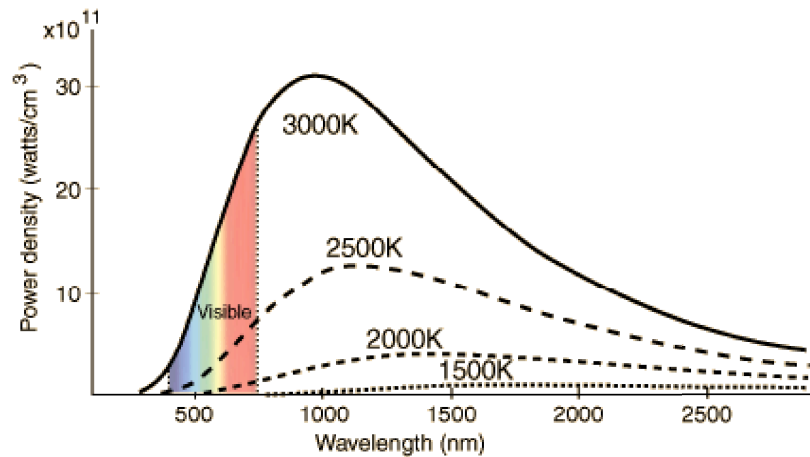
- Miracle de l'adaptation biologique !

Sensibilité maximale de l'œil centrée sur le maximum du spectre solaire !



# Exemples de spectres d'éclairage

- Ampoule à incandescence : 2500 K à 3000 K (halogène)



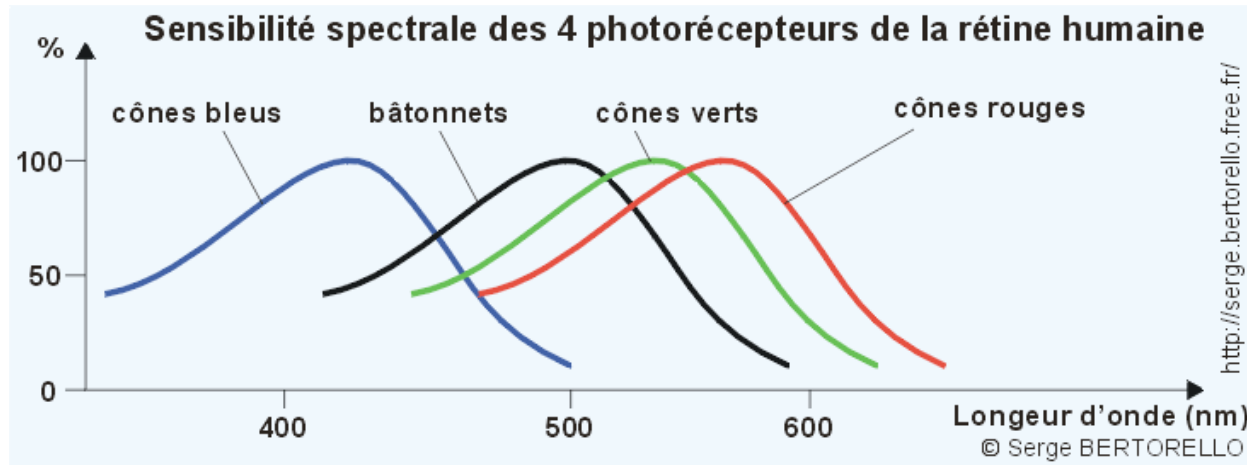


# Spectre et perception de la couleur

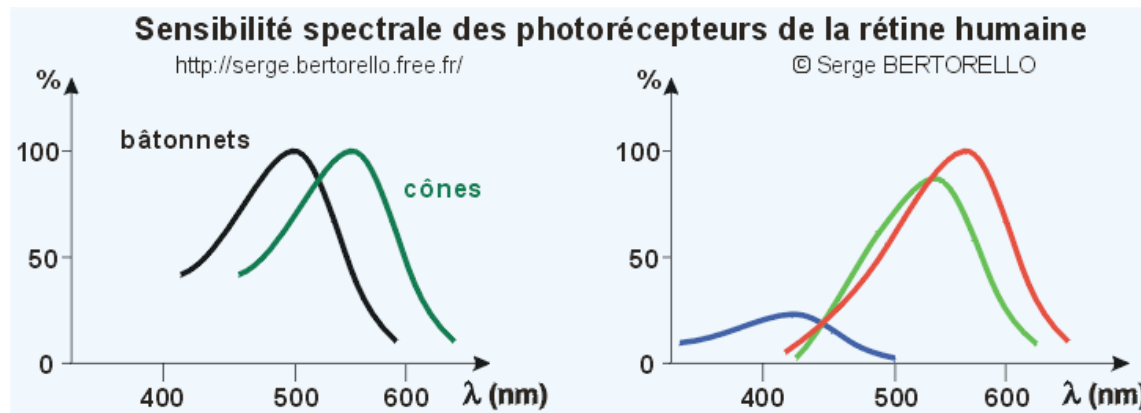
- La couleur qu'on perçoit d'un objet est liée au spectre de lumière qu'on en reçoit (intensité en fonction de la longueur d'onde)  
Dépend de l'éclairage (fréquences présentes initialement) et du coefficient de réflexion de l'objet en fonction de la longueur (couleur intrinsèque)
- La perception colorée est rendue possible grâce à des cellules photosensibles (cônes et bâtonnets) situées sur la rétine, qui réagissent différemment aux différentes fréquences lumineuses
- Il y a trois types de récepteurs (cônes)  $\Rightarrow$  toutes les perceptions sont liées à des combinaisons de trois perceptions élémentaires  
Suffisant pour une perception très riche de couleurs, mais ne restitue pas toute l'information spectrale : la couleur perçue est comme un "résumé" du spectre de la lumière

# Perception de la couleur

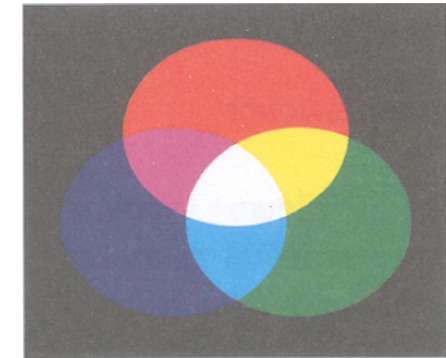
- Sensibilité de l'œil en fonction de la longueur d'onde



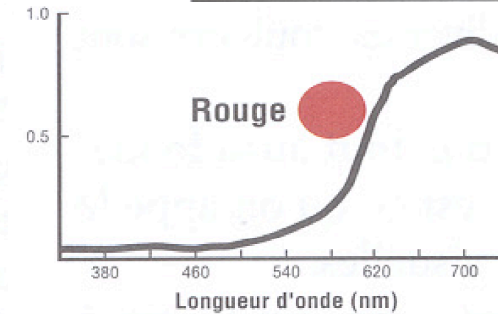
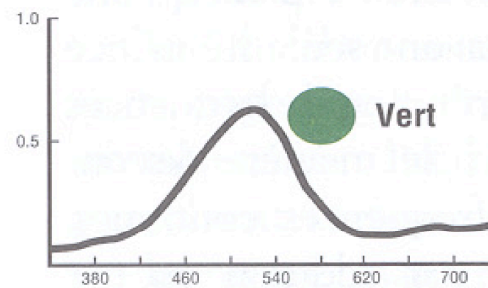
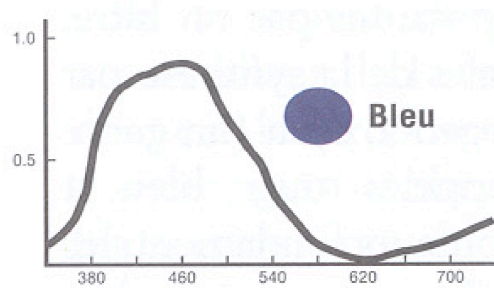
- L'œil humain a de 6 à 7 millions de cônes, et environ 100 millions de bâtonnets (25 à 100 fois plus sensibles que les cônes)



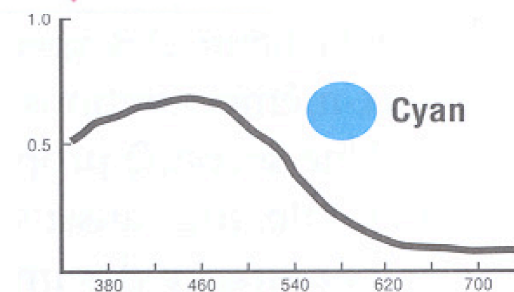
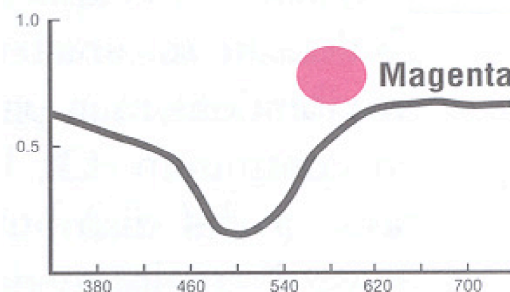
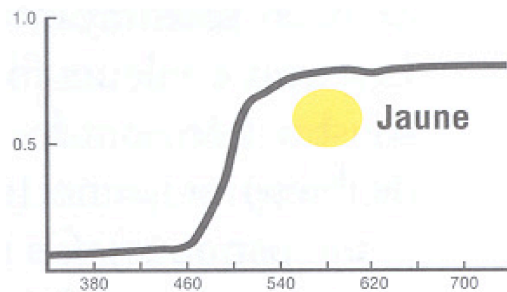
# Composition des couleurs



● Synthèse additive (projection, télévision)



● Synthèse soustractive (imprimerie, photo, filtres, teinture)



## Couleur d'un objet

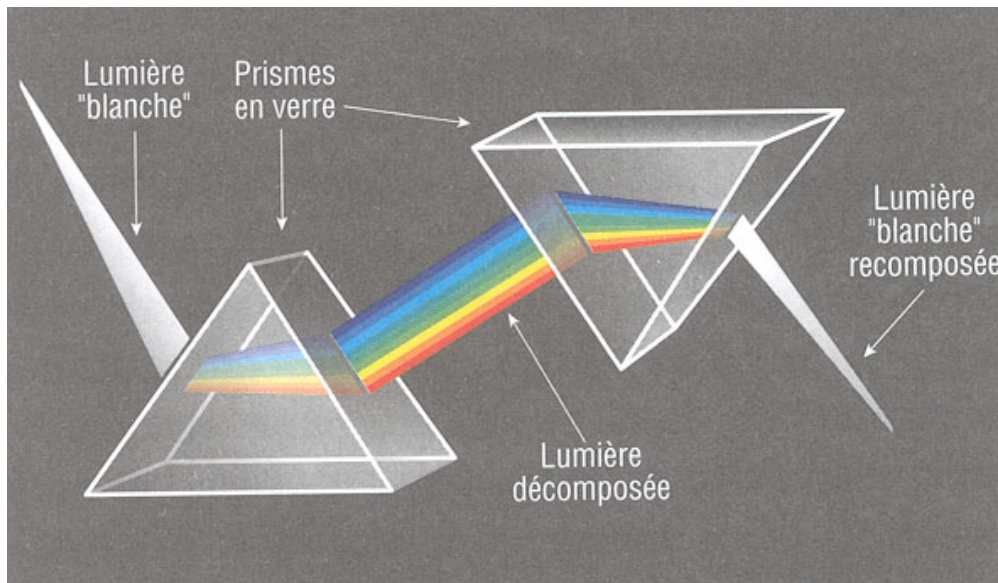
- Couleur intrinsèque = complémentaire des couleurs (longueurs d'onde) absorbées



- NB: la couleur blanche contient toutes les longueurs d'onde, réparties grosso modo suivant le spectre du Soleil

# Dispersion et décomposition de la lumière

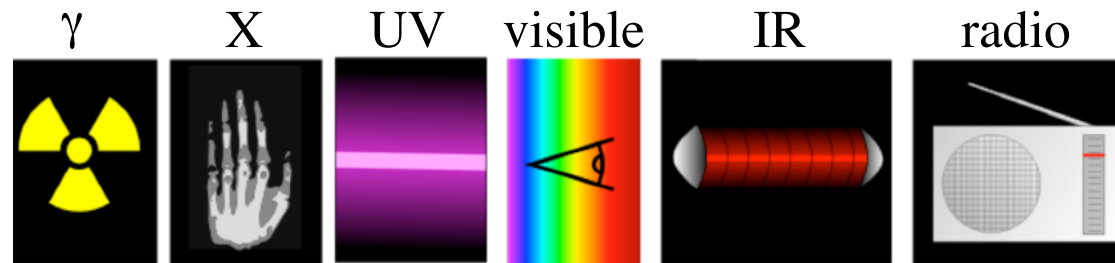
- Dans un « milieu dispersif », la vitesse de propagation des ondes lumineuses dépend de leur fréquence
- → l'indice de réfraction ( $n = c/v$ ) dépend de la longueur d'onde  
→ différentes couleurs (monochromatiques) sont réfractées dans des directions différentes !
- Décomposition de la lumière par un prisme...



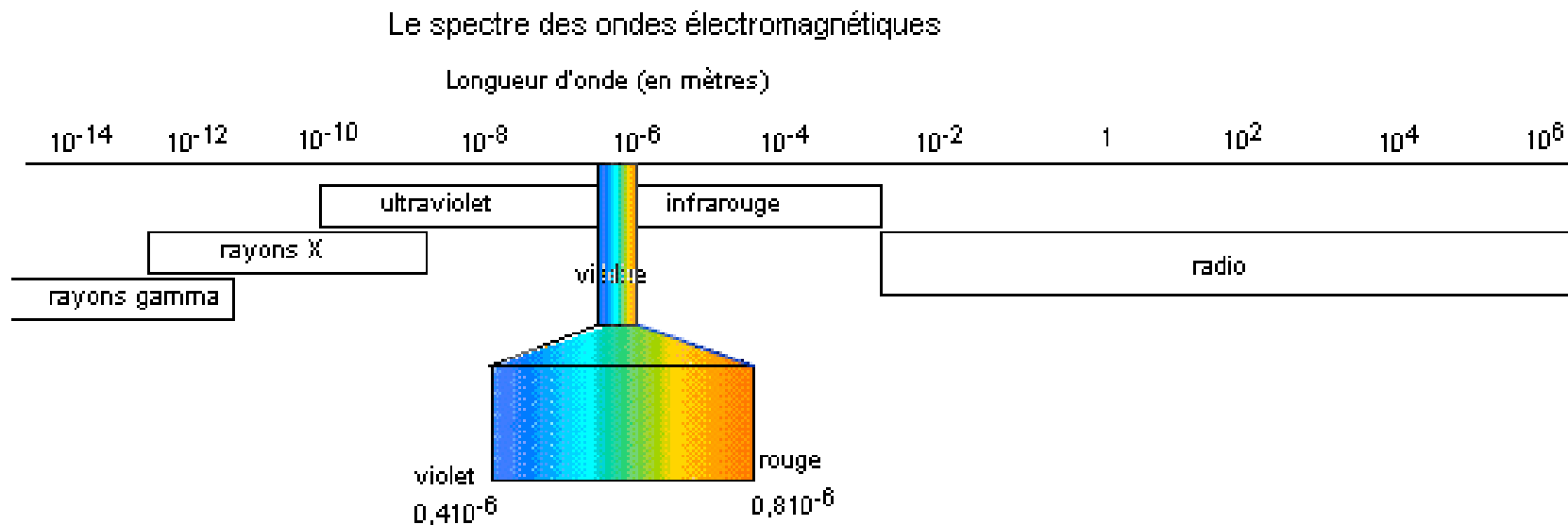
...et recombination

- NB: tous les milieux sont dispersifs, à des degrés divers (sauf le vide !)

# Lumière visible et couleurs invisibles

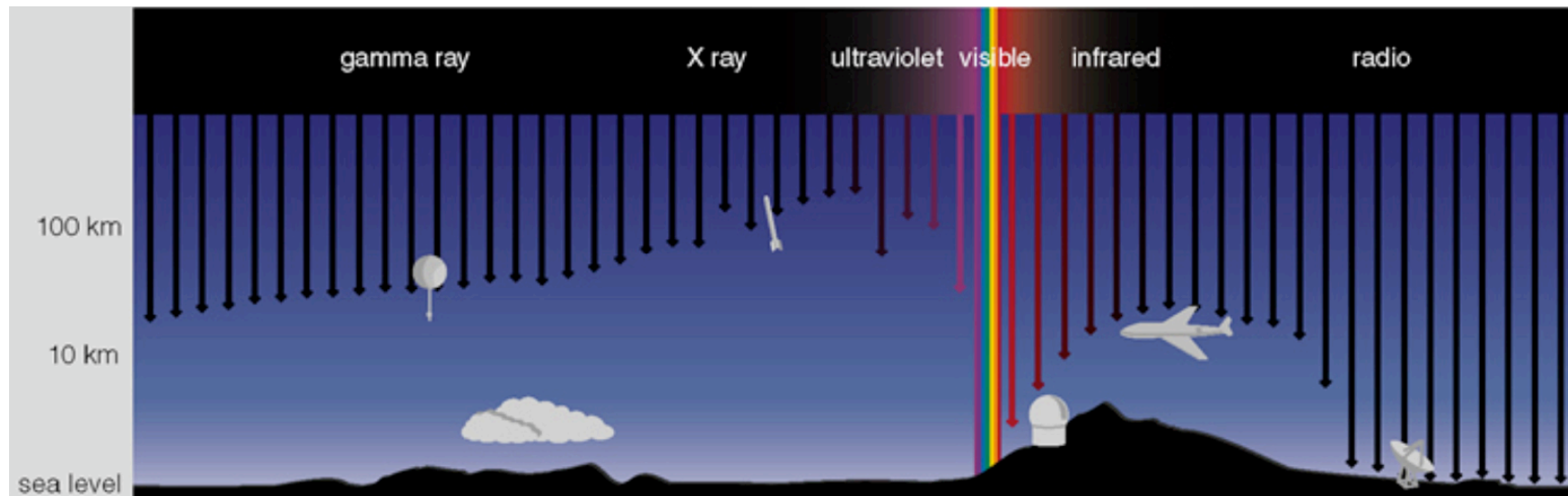


- Les ondes électromagnétiques existent à toute fréquence (ou longueur d'onde) : tous les rayonnements correspondants sont de nature absolument identique à la lumière visible



# Absorption du rayonnement par l'atmosphère

- L'atmosphère nous protège des rayonnements dangereux, i.e. des photons énergétiques : fréquence élevée ( $E = h\nu$ )



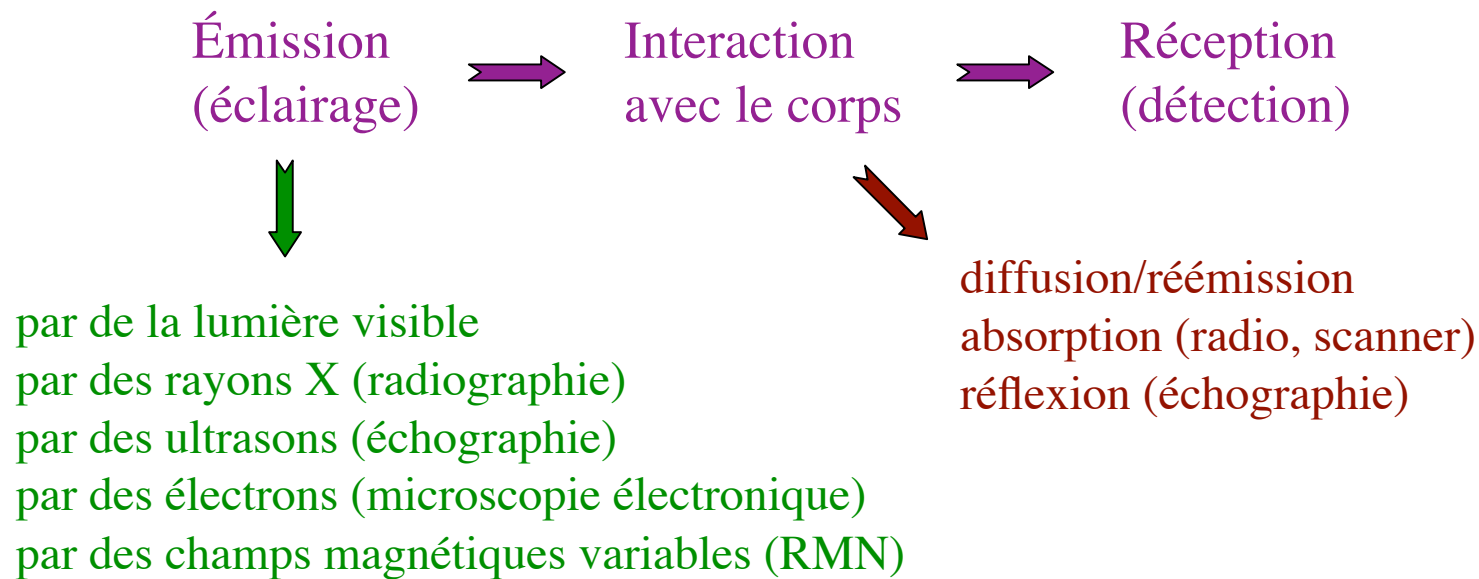
- Le domaine du visible n'est pas affecté !

# III - Imagerie



# Principe de l'imagerie

- But : produire une image, c'est-à-dire une représentation d'un corps physique contenant des informations spatiales, géométriques, sur ce corps
- Principe général :



# Observation de l'intérieur du corps

- Éclairer avec des ondes pénétrantes : rayons X, ultrasons

Rayons X : plus ou moins pénétrant, suivant le milieu (densité, etc.)  
→ **image en absorption : négatif**

Ultrasons : réflexion sur les zones de transition entre différents milieu, d'impédances acoustiques différentes  
→ **image en réflexion : positif**

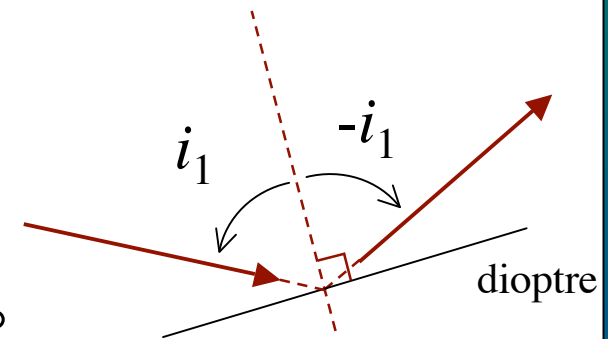
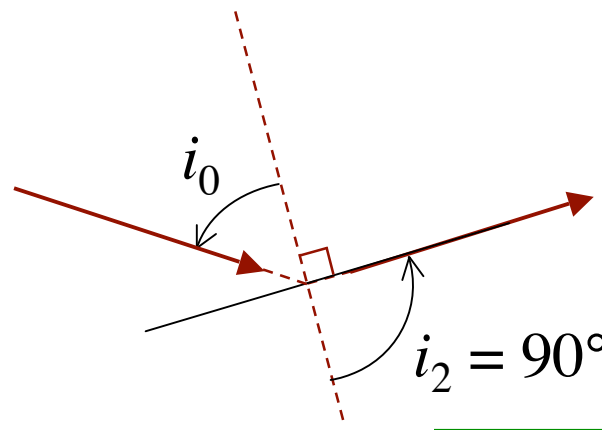
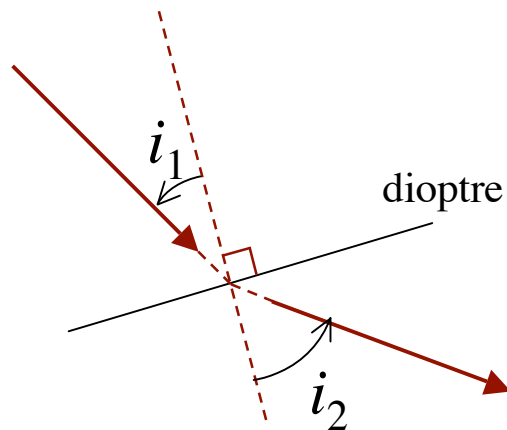
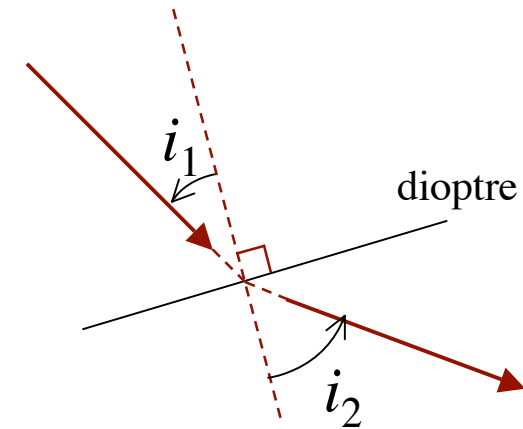
- Ou bien pénétrer à l'intérieur, et regarder : endoscopie  
→ transmettre l'image à l'extérieur → fibre optique

# Réflexion totale

- Loi de la réfraction :

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1$$

- Si  $n_1 > n_2$ , il existe un angle d'incidence limite,  $i_0$ , au-delà duquel  $(n_1/n_2) \sin i_0 > 1$ , ce qui veut dire qu'aucun angle  $i_2$  ne peut vérifier la loi de la réfraction !

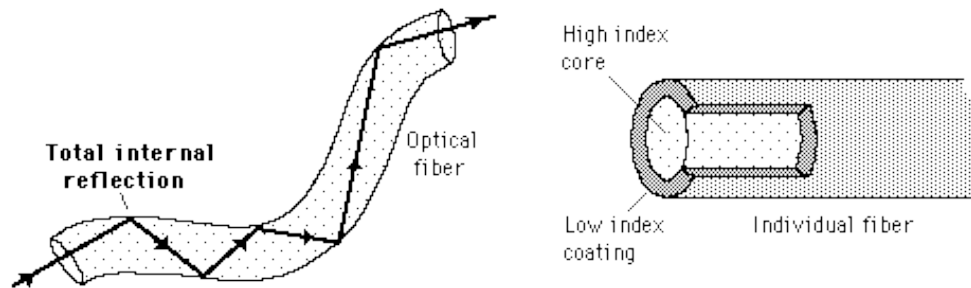


- $i_1 > i_0 \Rightarrow$  réflexion totale

Un rayon lumineux ne peut pas sortir sous un angle  $i > i_0$

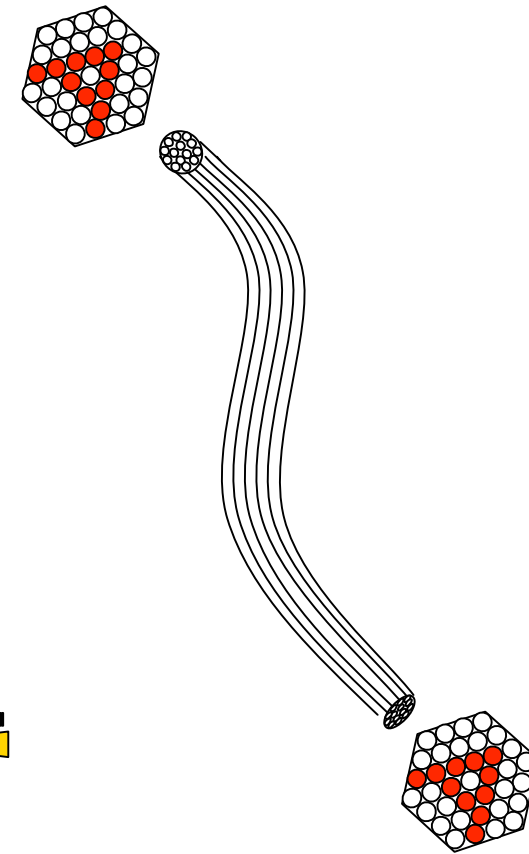
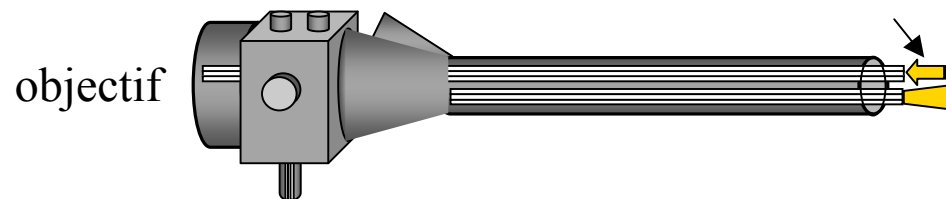
# Fibre optique et endoscope

- Garder l'angle entre les rayons lumineux et la normale aux parois de la fibre supérieur à l'angle de réfraction lumière



→ guidage de la lumière

- Sonde endoscopique

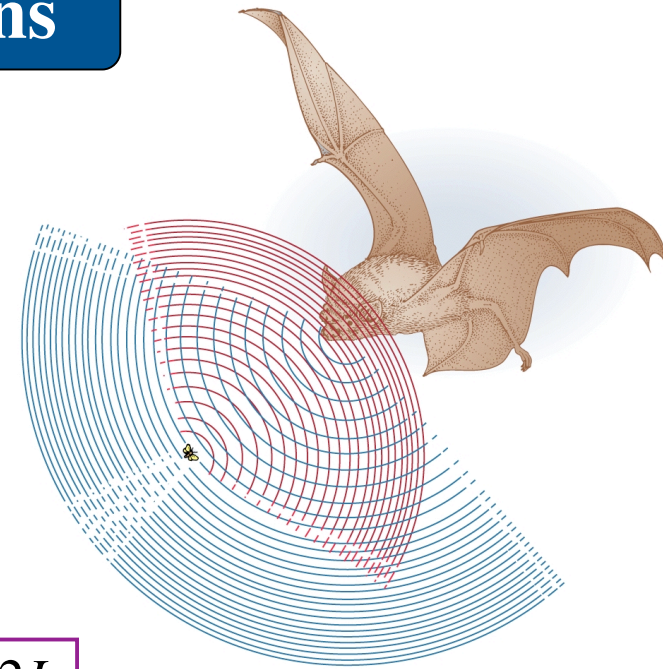


# Échographie : écho d'ultrasons

- Technique d'imagerie standard...  
chez la chauve-souris !
- Localisation des objets : estimation  
de la distance par le temps du trajet  
aller-retour de l'onde (écho :  
émetteur/réflecteur/récepteur)

$$\Delta t = \frac{2L}{c}$$

- Échographie médicale :
  - sonde à ultra-sons directive
  - réflexion sur les sauts d'impédance acoustique (densité  $\times$  vitesse du son)
  - $\rightarrow$  sensible aux changements de densité



# Échographie : écho d'ultrasons

- Coefficient de réflexion des ondes sonores :

$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 = \left( \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 \approx \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \right)^2 \text{ si } c_1 \approx c_2$$

- $Z_{\text{air}} \ll Z_{\text{eau}} \rightarrow$  réflexion totale !

$\rightarrow$  nécessité d'une adaptation d'impédance, sinon l'onde ne ressort pas du corps !

$\rightarrow$  gel sur la peau

$\rightarrow$  pas d'image derrière des zones d'air (poumons, vessie...)

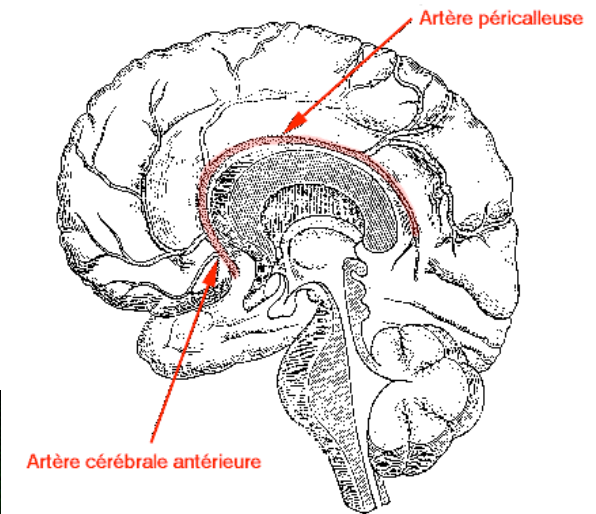
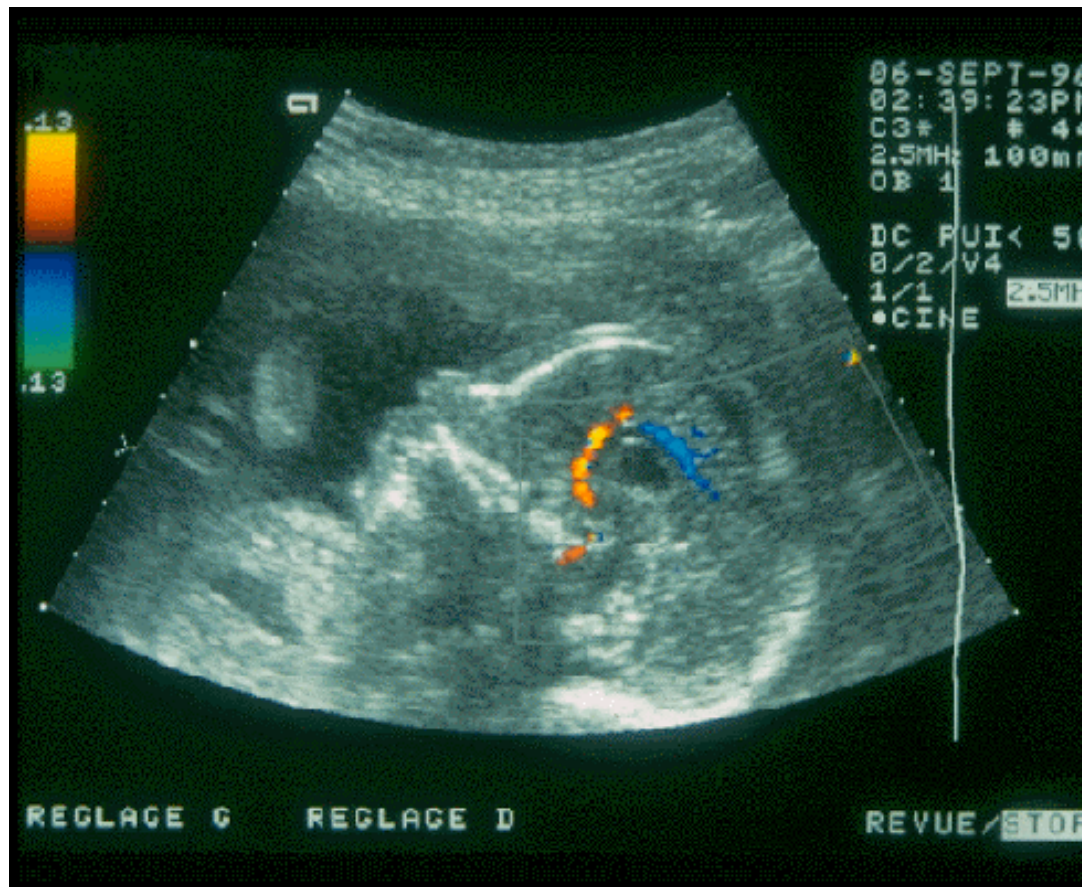
- Sensible aux contrastes de densité :

- onde réfléchie encore détectable si  $\Delta\rho/\rho \approx$  quelques %
- onde réfléchie intense si  $\Delta\rho$  est grand (os), mais peu d'intensité transmise au-delà...
- absorption des ondes dans les tissus :  $I = I_0 \exp(-L/L_{\text{abs}})$



# Échographie + Doppler

- Exemple : artères péricalleuse et cérébrale antérieure d'un fœtus





# Radiographie

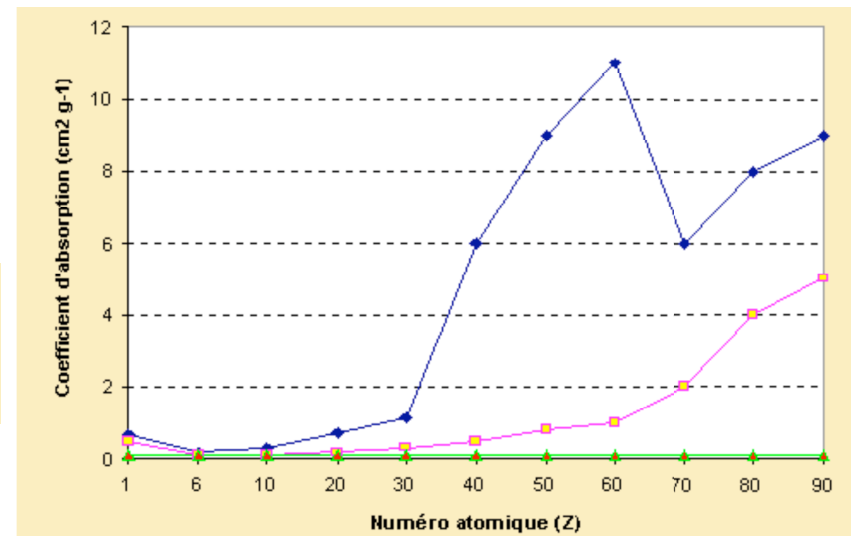
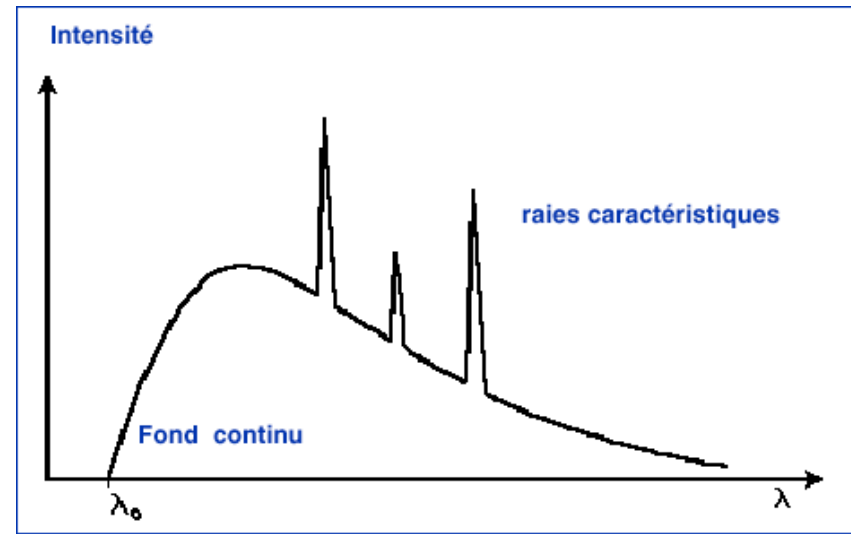
- Éclairement du corps par des rayons X

- Radiographie : observation des contrastes d'absorption des rayons X

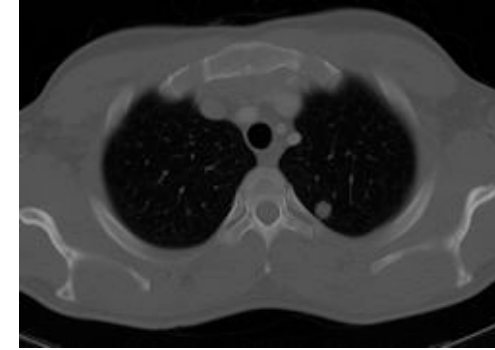


● Rayons X 50 kV  
 ■ Rayons X 150 kV  
 ▲ Rayons Gamma 1 MeV

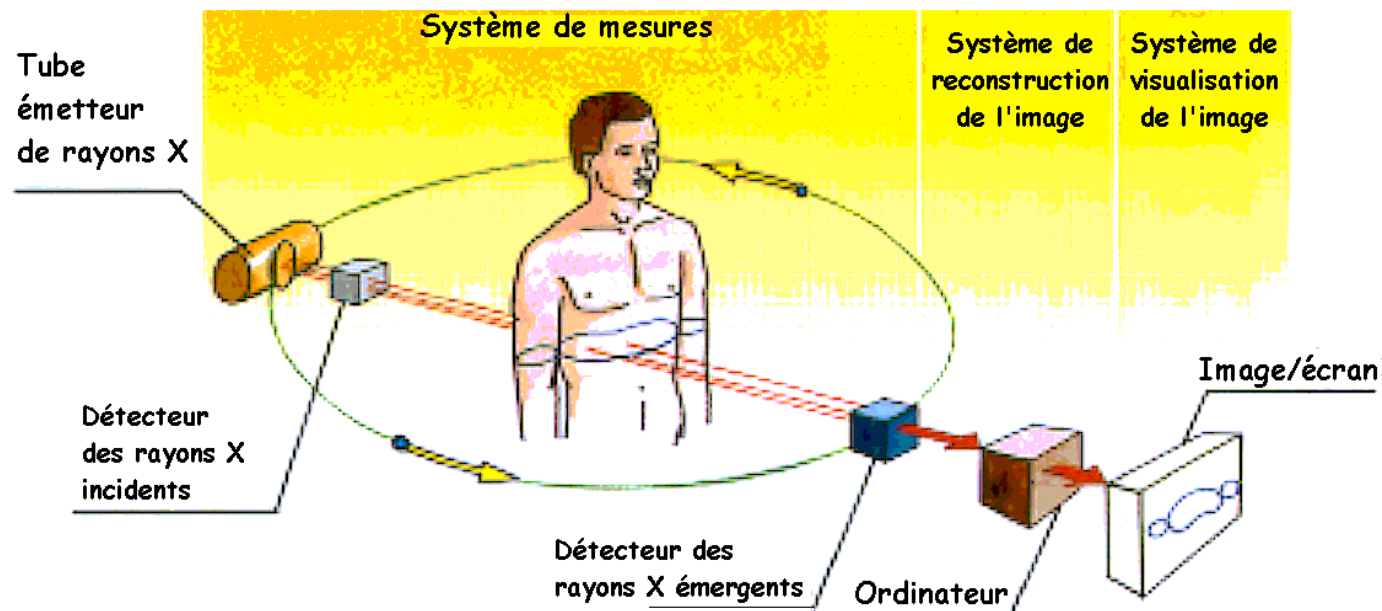
Spectre type :



# Scanner : radiographie 3D



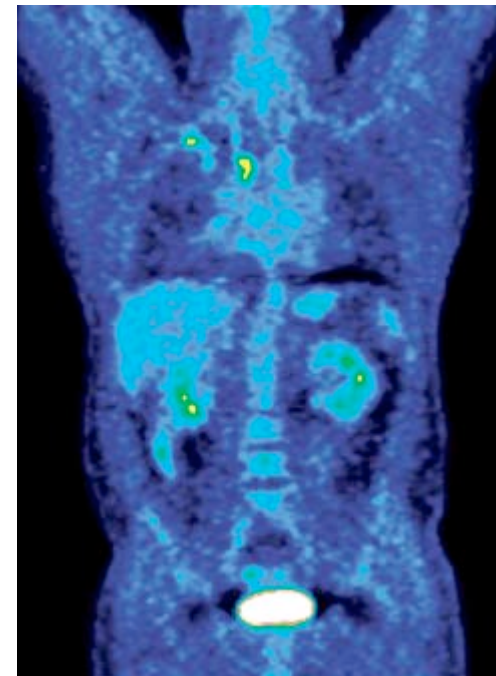
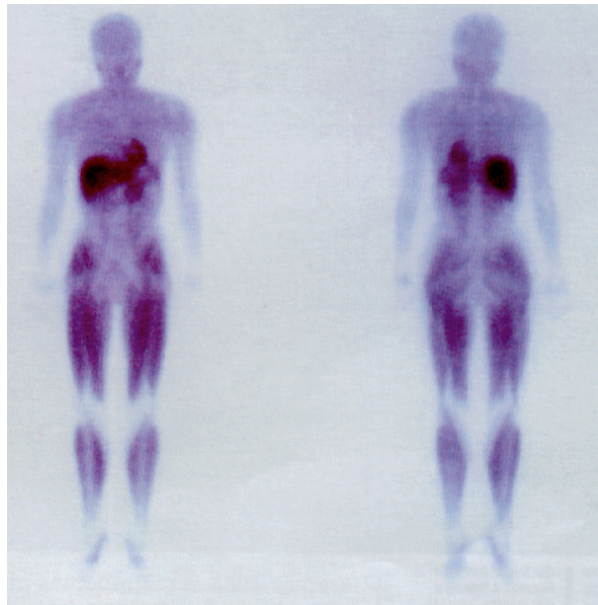
- Reconstruction d'une image 3D, par comparaison de l'absorption des rayons X suivant des axes différents
- Balayage d'un faisceau de rayons X, l'émetteur tourne autour du patient en même temps que les récepteurs



- Reconstruction 3D par calcul (peut être assez complexe)

# Scintigraphie

- Pas d'« éclairage » : les parties à imager sont elles-mêmes émettrices de rayonnement, grâce à la fixation d'une substance légèrement radioactive préalablement introduite dans l'organisme
- Utilisations typiques : thyroïde, cœur, os, poumons
- Détection grâce à une caméra à rayons gamma (photons très énergétiques)

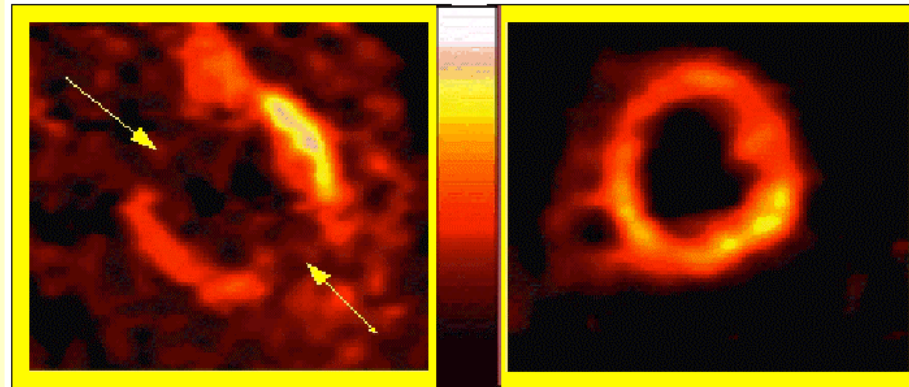
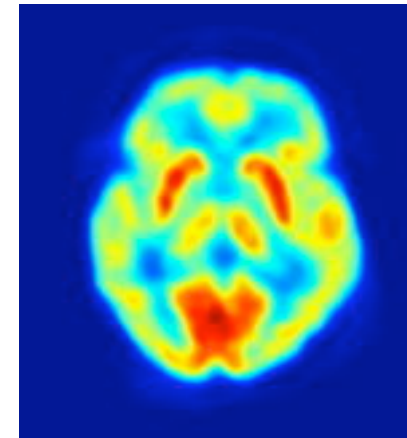
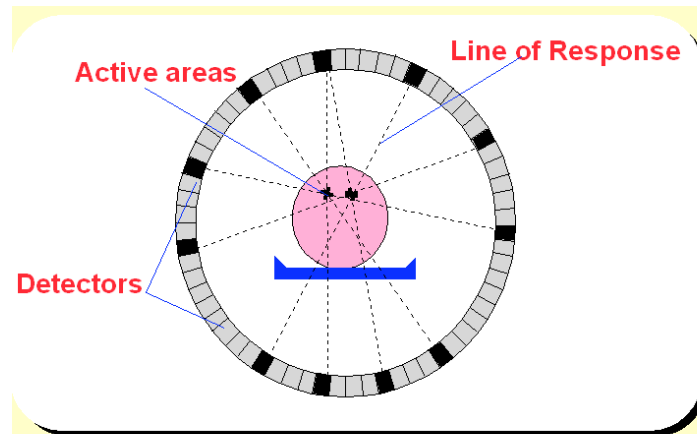


# TEP : tomographie à émission de positons

- Injection d'éléments radioactifs émetteurs de positons

$^{18}\text{F}$ , dans le  $^{18}\text{F}$ -FDG (sucre semblable au glucose, rendu radioactif)

isotope  
radioactif  
du fluor



Heart with Myocardial Infarction.  
Arrows indicate "dead" tissue

Normal heart