

LUMIERE ET IMAGERIE

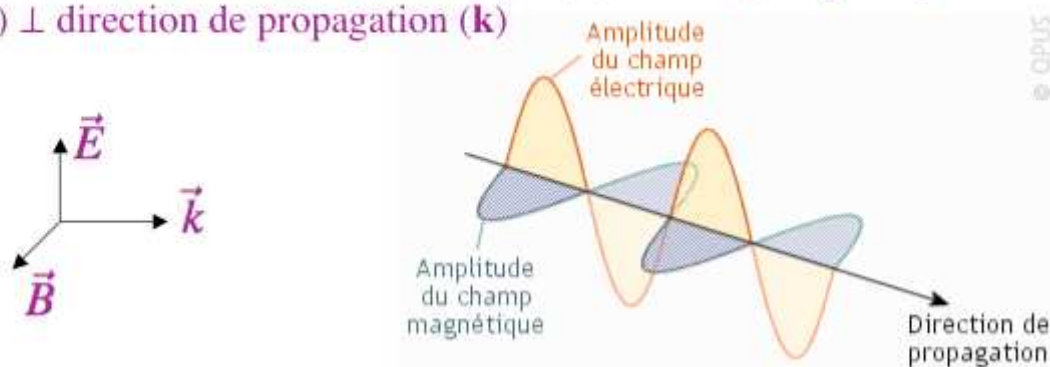
Ce cours reprend le cours de Monsieur Devaux de 2007, il constitue une aide et en aucun cas une référence pour le concours !

C'est un résumé du cours de madame Grenier, reprenant ce qu'il y a à savoir pour le concours, les démonstrations des résultats ne sont pas tous présent dans ce cours, vous devrez vous référer aux PDF du prof.

1) Lumière

La lumière est une onde électromagnétique : elle possède un champ magnétique et un champ électrique qui oscillent. Ces deux champs sont perpendiculaires l'un de l'autre, le champ magnétique est également perpendiculaire avec le vecteurs (\mathbf{k}) qui donne le sens et la direction de propagation de l'onde. Ainsi, si on représente les 2 champs par des vecteurs, on s'aperçoit que ces 3 vecteurs forment un trièdre.

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

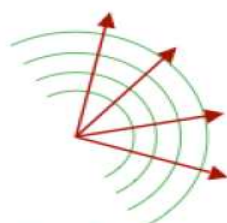


On utilise souvent la notion de « rayon lumineux », mais c'est une abstraction, utile pour résoudre des problèmes d'optique géométrique, en fait la lumière est une onde sphérique.

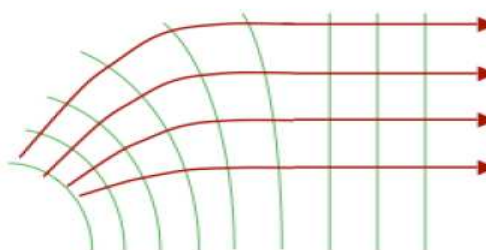
- **Un « rayon lumineux » est une abstraction définie comme étant une ligne partout orthogonale aux surfaces équiphasés (surfaces d'onde)**



onde plane \Leftrightarrow faisceau de rayons parallèles

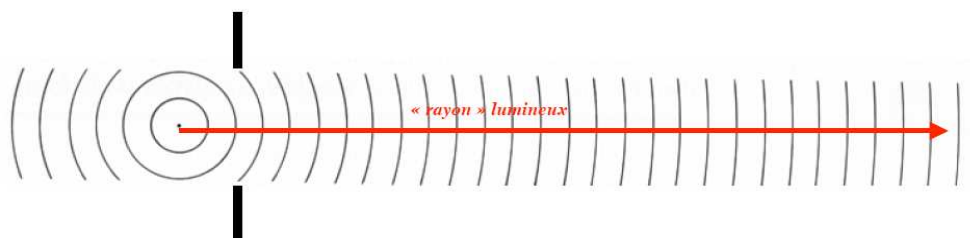


onde sphérique
 \Leftrightarrow faisceau de rayons radiaux



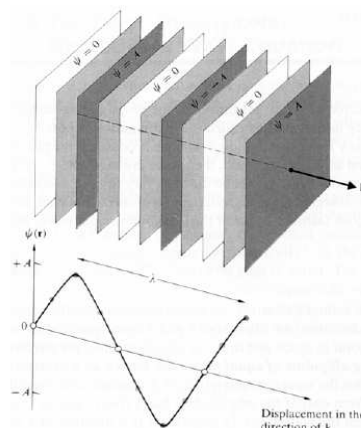
rayons courbés

Cependant, quand la source est suffisamment éloignée de l'observateur, on peut considérer que cette onde sphérique devient plane :



A grande distance la section limitée d'une onde sphérique peut s'assimiler à un plan

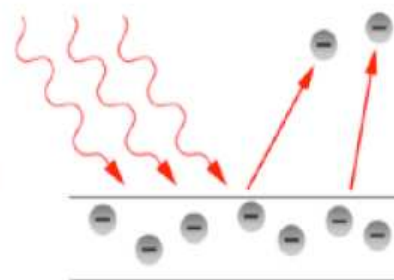
Un rayon lumineux est n'a pas de sens physique, il correspond à une direction normale aux plans successifs de l'onde plane (ou sphérique). Dans les plans successifs les oscillations (transverses) sont en phase



La lumière est créée par les atomes. Vous avez vu en atomistique que ces atomes possèdent des orbitales atomiques, et que quand un électron passe d'un niveau d'énergie à un autre, il émet l'énergie sous forme de photons. Ces photons ont une forme d'énergie quantifiées. Vous verrez certains cas de figure en biophysique, où le photon peut prendre toutes formes d'énergie, de sorte que le spectre d'énergie de tout les photons de cet atome forme une gaussienne.

Les photons ont donc une énergie $E = h\nu$ ($E = h\frac{c}{\lambda}$) mais ils sont également porteurs de quantités de mouvements, que l'on observe lors du phénomène photoélectrique :

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

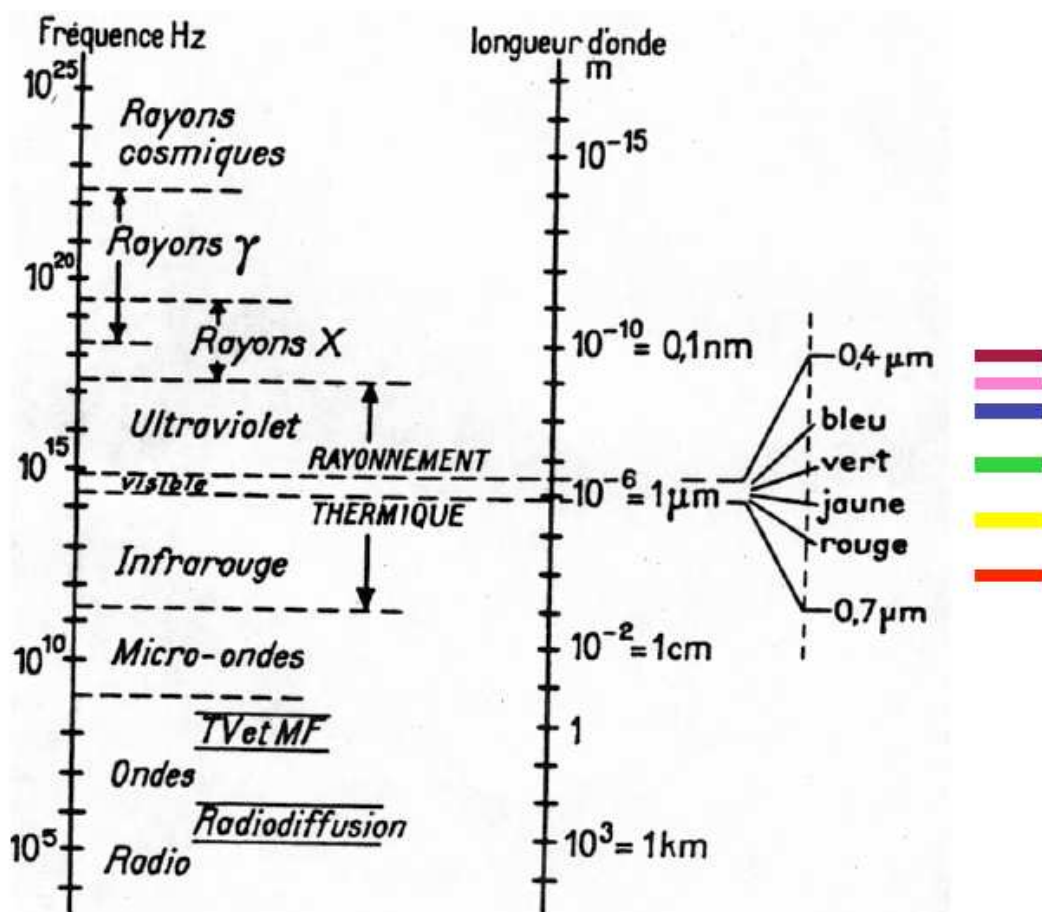


Les photons sont porteurs de quantité de mouvement !

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

$$E = pc$$

La lumière peut être visible ou non, le domaine du visible s'étant pour des longueurs d'ondes comprises entre 400 nm à 700 nm. Au-delà de 700 nm on a les infrarouges, en dessous de 400nm on a les ultraviolets. Voici les différents domaines des rayons lumineux :



2) Loi physique de la lumière

a) réflexion et réfraction : loi de Descartes

Lois de Descartes

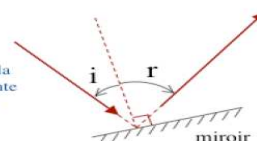
Lois de la réflexion :

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)

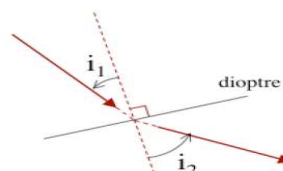


Lois de la réfraction :

1 Le rayon réfracté est dans le plan incident

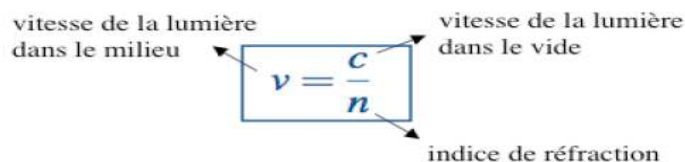
2 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

n = « indice de réfraction », caractéristique du milieu



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)



b) 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 !)

Ainsi si n_1 est différent de n_2 , le chemin le plus court en temps n'est pas une droite.

c) Interférences et diffractions

Interférences : comme la lumière est de nature ondulatoire, on peut avoir des interférences, c'est-à-dire la superposition de plusieurs ondes, et ces superpositions peuvent être destructives, comme vu dans le cours précédent. Ainsi, 2 rayons lumineux peuvent s'annuler pour donner du noir. Cette expérience est mise en évidence par les fentes de Young :



Diffraction :

Lorsque qu'une onde arrive dans une fente, et que cette fente est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, on assiste au phénomène de diffraction : cette fente devient alors une nouvelle source d'ondes. Selon la largeur de cette fente, on aura une onde régénérée de géométrie différente :

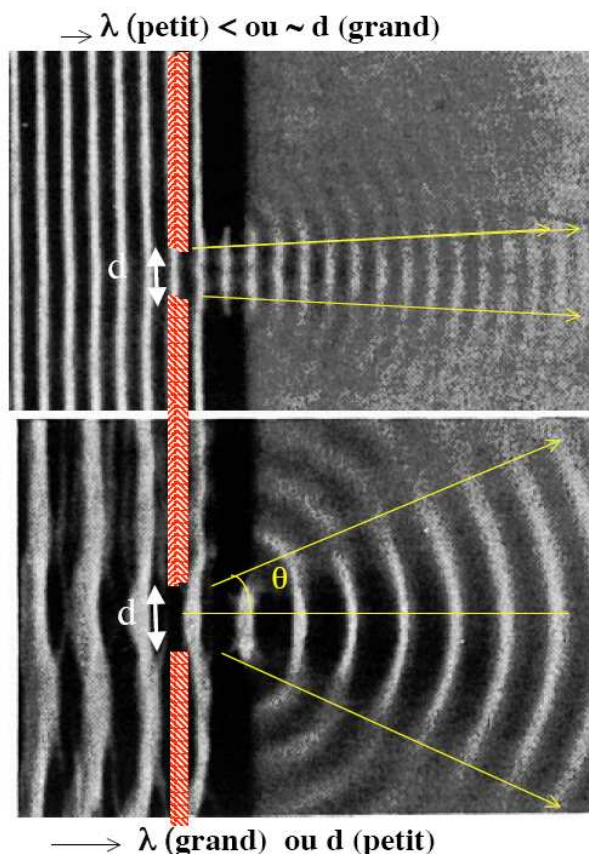
Observation de la DIFFRACTION

Figures obtenues avec des **ondes transverses à la surface de l'eau** : même comportement que des ondes optiques au passage d'une fente de largeur d :

1°) Si $\lambda < d$ le faisceau transmis est pratiquement constitué d'ondes planes parallèles formant un pinceau rectiligne

2°) Si $\lambda > d$ ou $\lambda \approx d$ le faisceau transmis diverge et est formé d'ondes sphériques

Le facteur d'échelle est $\theta_{\text{mini}} \approx \frac{\lambda}{d}$



d) Spectre et couleur

La couleur est une notion subjective liée à l'interaction des photons avec les cellules biologiques.

Un spectre est une répartition de la lumière selon les longueurs d'ondes (ou fréquences).

Un spectre peut être continu ou discret (non continue).

Tout corps à une température donnée, émet de la lumière (visible ou non). Pour étudier ce rayonnement, appelé rayonnement thermique, car il dépend de la température du corps, on introduit le concept du 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

Il existe des lois qui permettent de calculer le flux d'énergie Φ en W/m^2 , c'est la loi de Planck :

- Flux d'énergie, Φ , émis par un corps noir (en W/m^2)

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

De cette loi on en déduit la loi de Stefan-Boltzmann qui établit que la puissance totale rayonnée par unité de surface :

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

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

On en déduit que pour un spectre à une température donnée, la longueur d'onde maximale, c'est-à-dire, la longueur d'onde la plus émise par le corps est :

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

On peut également en déduire les photons émis au maximum d'énergie, on a recourt à la fréquence maximale :

- Fréquence au maximum d'énergie :

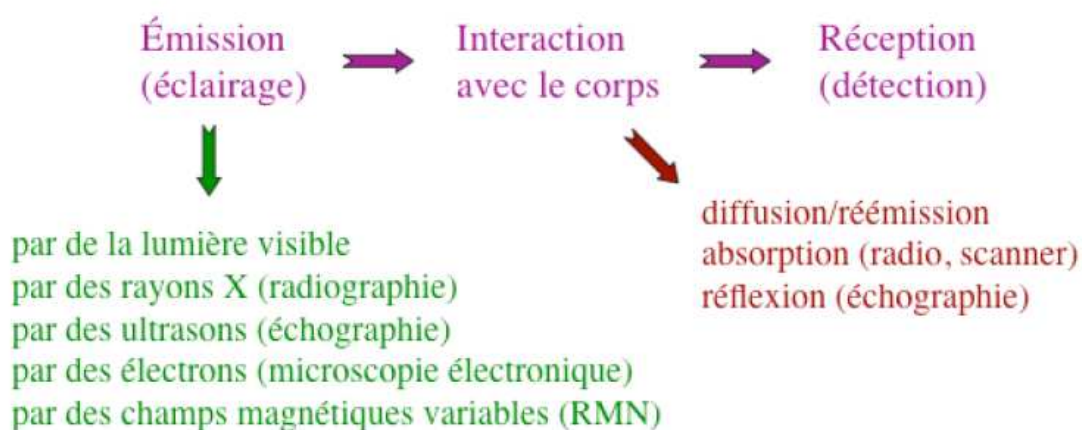
$$h\nu_{\text{max}} = 2.82 \times k_B T$$

Attention : [Les photons au maximum de λ ne sont pas les mêmes qu'au maximum de ν !]

3) Imagerie

La médecine a fait un grand pas en avant avec l'apparition de l'imagerie médicale. Le principe est de faire interagir le corps avec différentes techniques physiques, qui après détection permettent de reconstituer l'image interne du corps.

● Principe général :

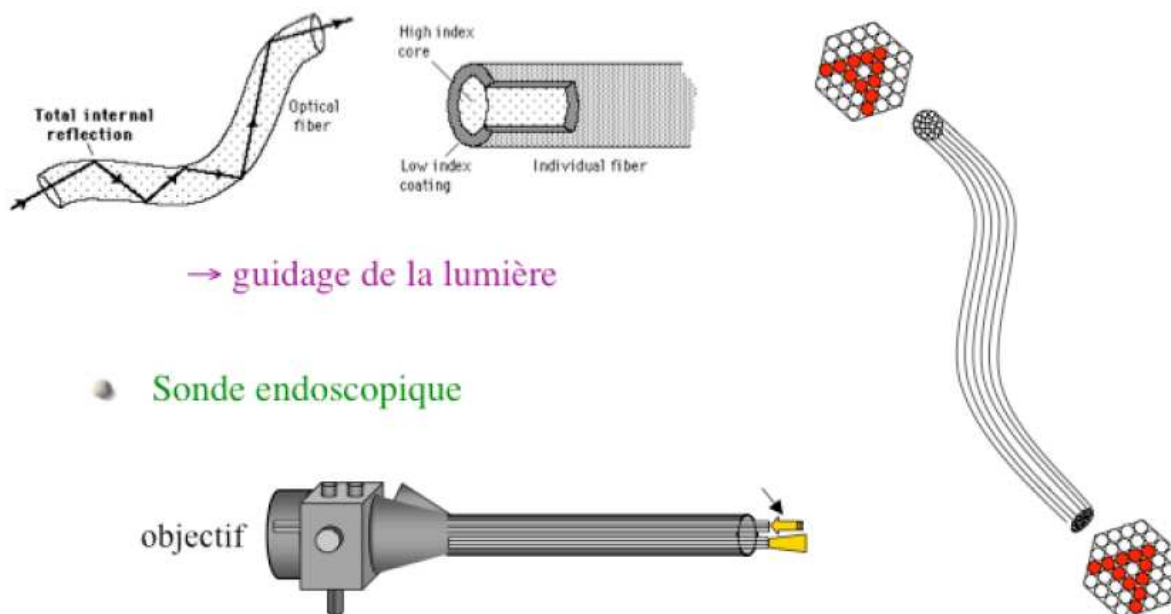


Parmi ces techniques on distingue :

→ Fibre optique et endoscope :

On guide la lumière par un système de fibres optiques, qui garde le même angle de réflexion partout sur la trajectoire des fibres, afin de reconstituer l'image à l'identique :

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



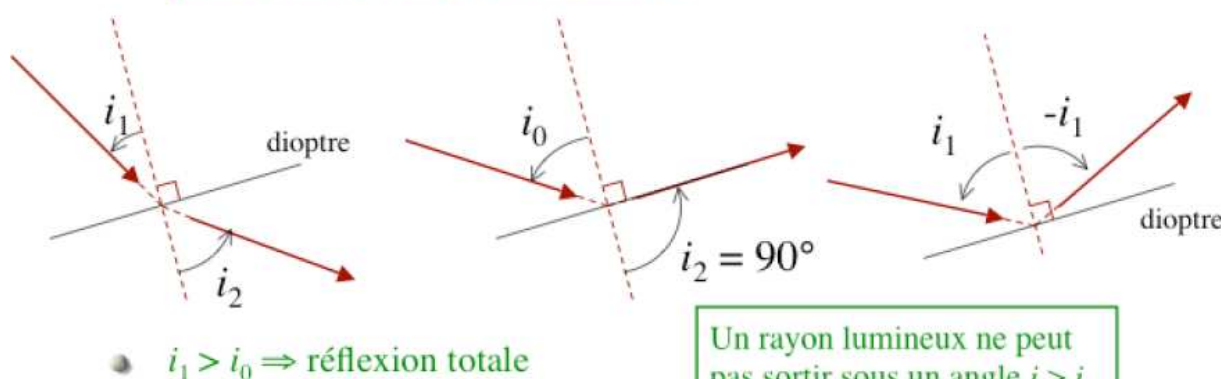
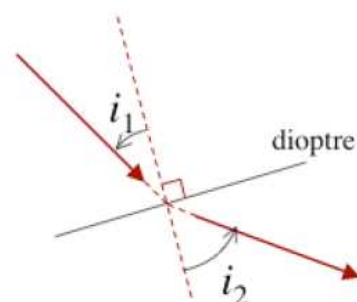
On empêche la réfraction du rayon incident par le phénomène de réflexion totale. En effet, à partir d'un angle d'incidence, et selon le matériau, le rayon incident est totalement réfléchi. C'est ce que l'on observe lorsque l'on nage sous l'eau, où l'on a l'impression que la surface de l'eau est un miroir :

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 $i > i_0$

→ Echographie par ultra son:

- Localisation des objets : estimation de la distance par le temps du trajet aller-retour de l'onde (écho : émetteur/réflexeur/récepteur)

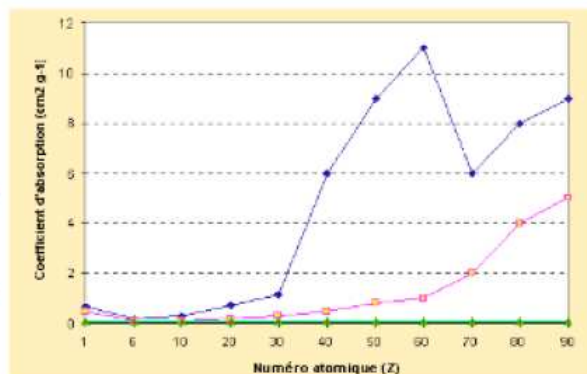
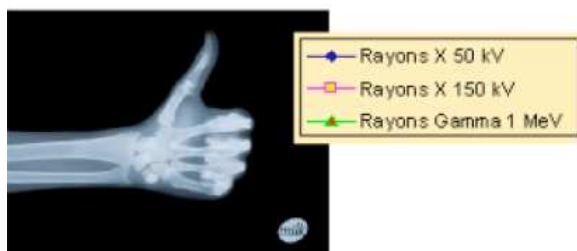
$$\Delta t = \frac{2L}{c}$$

A cause de la grande différence d'impédance de l'air et de l'eau (le corps humain est constitué à 70% d'eau), une onde sonore transmise au corps est ainsi « piégé » à l'intérieur du corps, car elle se réfléchit totalement sur les parois du corps ; Pour éviter cela, on applique un gel visqueux sur la peau du patient, d'impédance voisine du corps humain, afin de faciliter le passage de l'onde du corps au détecteur. Ainsi, en fonction du temps aller-retour de l'onde, on reconstitue une image de l'intérieur du corps.

→ Radiographie (2D):

On envoie des rayons X sur le corps, et en fonction de l'absorption de ces rayons X (cf. orbitale atomique et niveau d'énergie), on constitue une image de l'intérieur du corps.

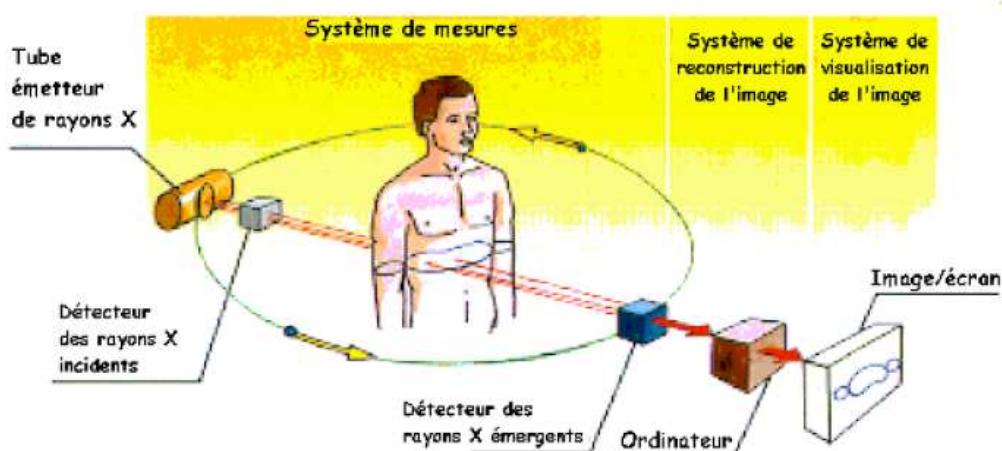
- Radiographie : observation des contrastes d'absorption des rayons X



→ Scanner (3D) :

Selon le même principe, le scanner combine plusieurs axes d'observations, pour donner une image 3D du corps :

- Balayage d'un faisceau de rayons X, l'émetteur tourne autour du patient en même temps que les récepteurs

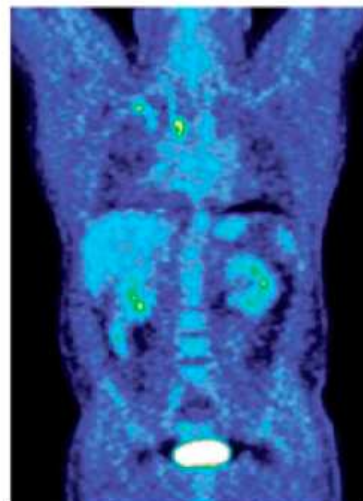
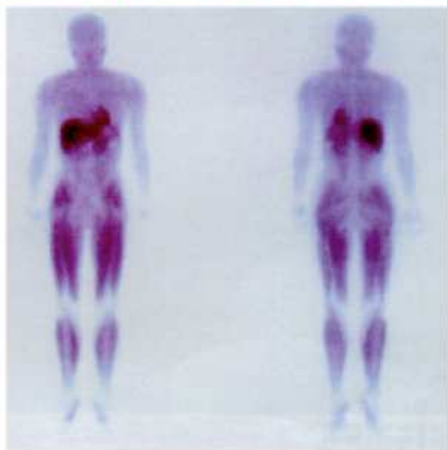


- Reconstruction 3D par calcul (peut être assez complexe)

→ Scintigraphie :

Une substance radioactive est introduite dans le corps humain, on observe le corps en détectant l'émission des rayons gamma très énergétique. Le corps devient source de rayons et non cible de rayons.

- 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)



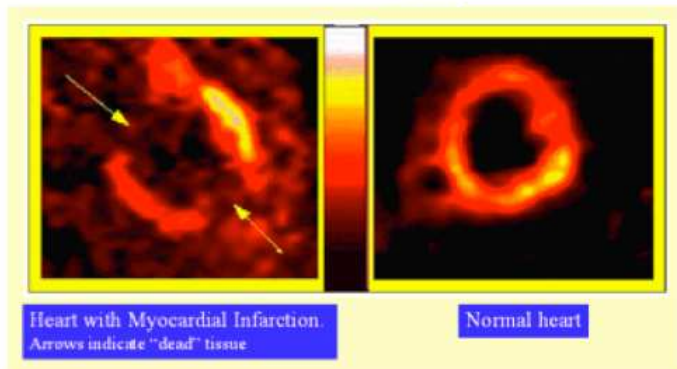
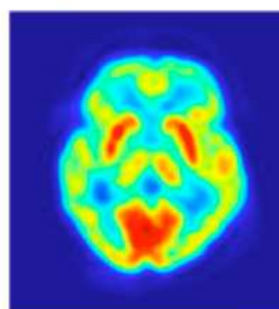
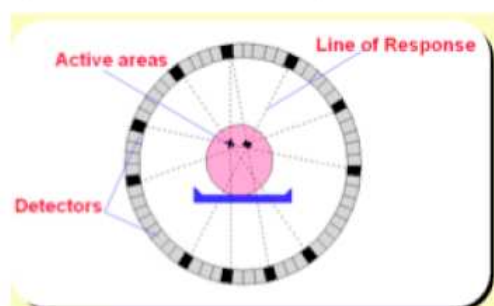
→TEP : topographie à émission de positons

Selon le même principe on injecte une substance radioactives que certains organes assimile bien, en remplaçant un atome d'une protéine par exemple par un isotope, cette protéine devient émettrice de positons, que l'on détecte pour reconstituée une image.

- Injection d'éléments radioactifs émetteurs de positons

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

isotope
radioactif
du fluor



→ Image par résonance magnétique nucléaire IRMN :

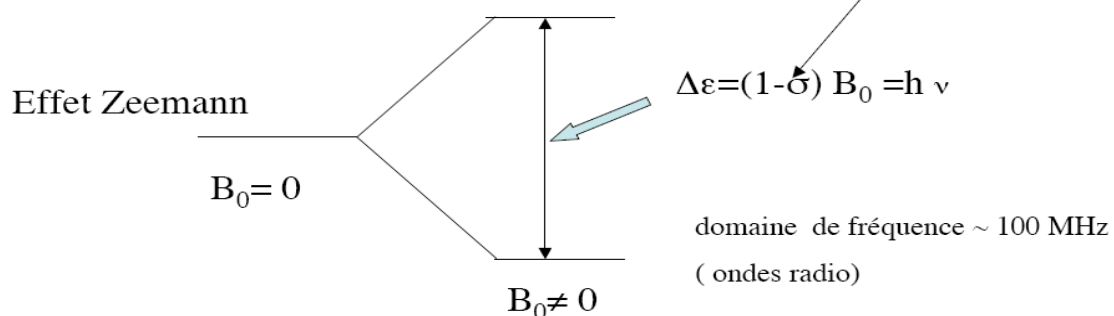
L'appareil IRM est parfois désigné sous le nom de *scanner*, ce qui prête à confusion avec le scanner par rayons X vue ci-dessus.

Principe : en appliquant une combinaison d'ondes électromagnétiques à haute fréquence sur une partie du corps et en mesurant le signal réémis par certains atomes (comme l'hydrogène), il est possible de déterminer la composition chimique et donc la nature des tissus biologiques en chaque point du volume imagé.

Grâce aux différentes séquences, on peut observer les tissus mous; en revanche, l'IRM ne permet pas l'étude des corticales osseuses (tissus « durs ») ni donc la recherche de fractures où seul l'œdème péri-lésionnel pourra être observé.

Principe de base:

Si on envoie une onde électromagnétique de fréquence ν sur une substance chimique placée dans un champ magnétique B_0 les atomes, en particulier l'Hydrogène (H), donnent un signal de RMN équivalent à un signal d'absorption en optique pour un champ magnétique B_{Res} . Cette valeur B_{Res} correspond à une énergie ΔE qui varie un peu (de quelques millièmes) selon la nature chimique dans le quel l'atome est impliqué. C'est ce que l'on appelle le déplacement chimique de l'atome.



Si le champ magnétique et l'échantillon sont homogènes, toutes les molécules d'eau résonnent ensemble cad à la même fréquence d'excitation.

Dans ce cas, on ne pourrait pas distinguer les différentes molécules d'eau, car elles renverraient toutes la même fréquence de résonance.

Cependant si l'on fait varier le champ magnétique selon, par exemple une direction x de l'espace, tel que ce champ varie linéairement, on aura des fréquences de résonances différentes, selon que la molécule d'eau se trouve en un point X_0 ou $X_0 + dx$.

Imaginer maintenant que l'on fasse varier ce champ dans toutes les directions de l'espace, on aura une fréquence de résonance propre pour chaque molécule d'eau de cette espace.

En captant cette fréquence de résonance, on reconstitue ainsi une image.

Cette technique est d'autant plus intéressante qu'elle permet de produire des coupes de différents niveaux du cerveau par exemple.

Ce document, ainsi que l'intégralité des cours de P1, sont disponibles gratuitement à l'adresse suivante : <http://coursp1bichat-larib.weebly.com>