

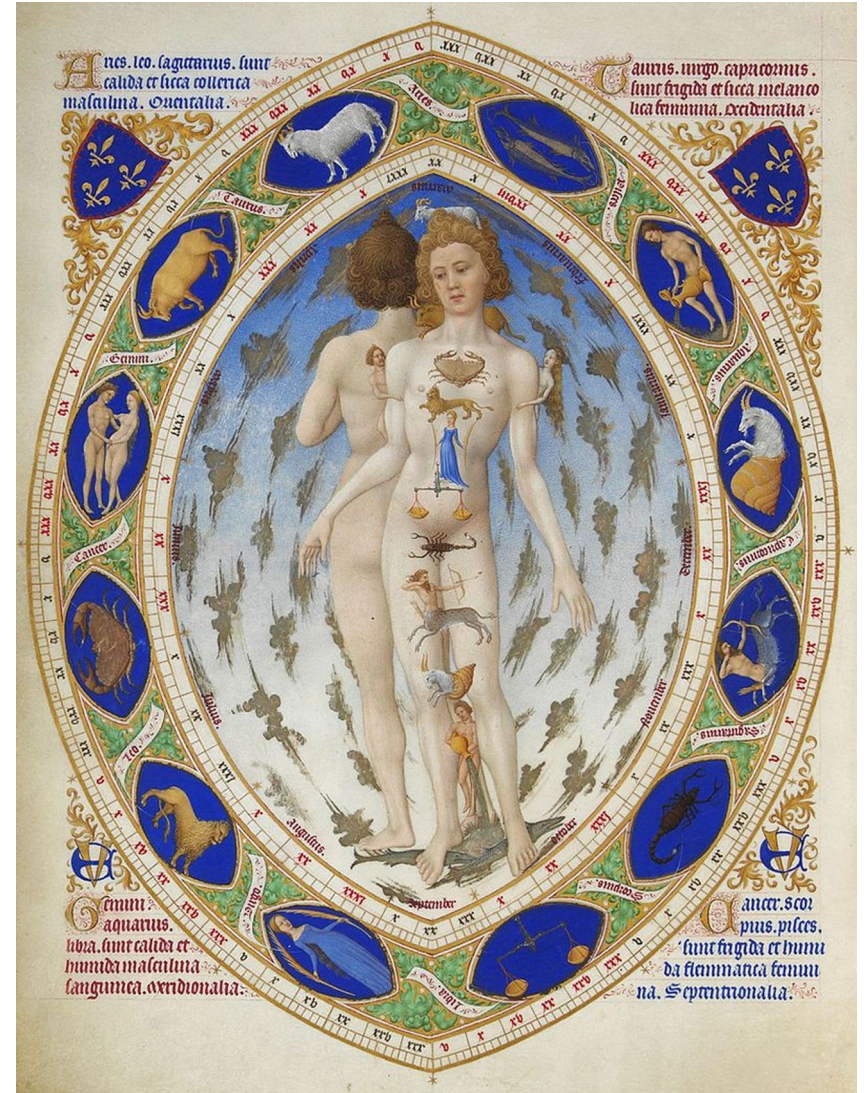
# La physique de la médecine

## Imagerie et traitement

### Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
4. Les ondes
14. Rayonnement et radioactivité
15. Énergie
23. Le corps humain

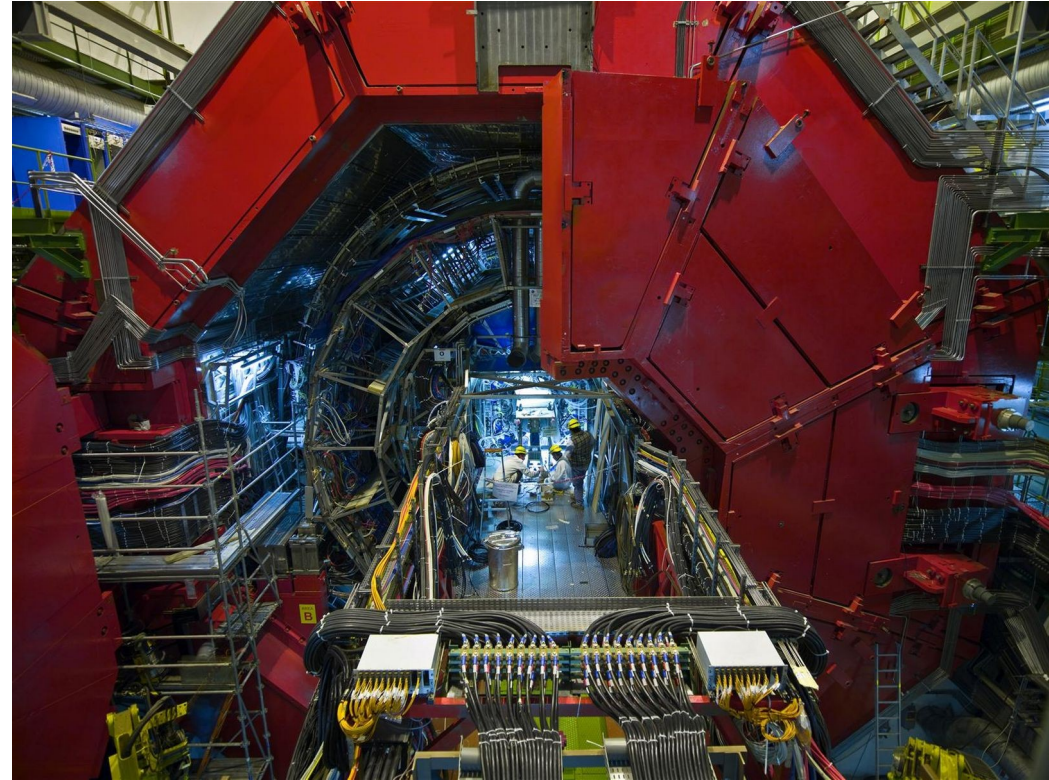
Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées  
Images : Wikipedia sauf mention contraire



Anatomie humaine, enluminure des Très Riches Heures du duc de Berry (début XV° siècle)

# I. INTRODUCTION

## LES RAYONS IONISANTS












<https://home.cern/resources/image/experiments/alice-images-gallery>

DéTECTEUR ALICE, CERN



# Les rayonnements ionisants

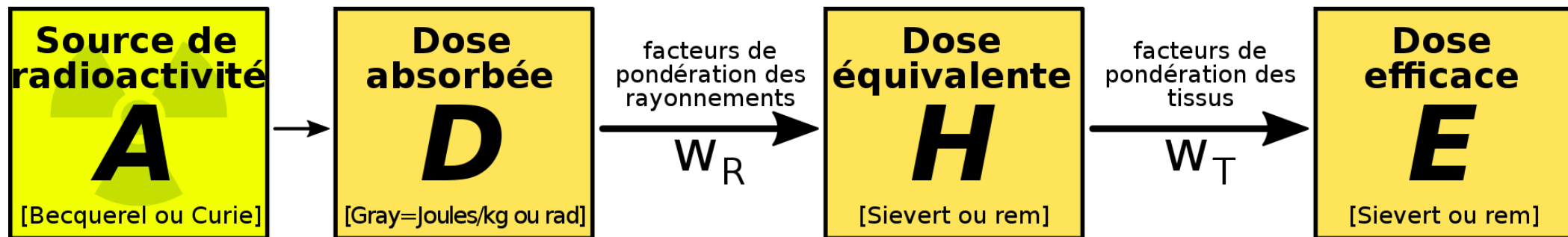
- Rayonnements pouvant **produire directement ou indirectement des ions** lors de leur passage à travers la matière → brûlures, cancers, mort (physiciens, médecins, ...)
- Peuvent être produits par des atomes radioactifs ou des appareils

	<p><b>Les rayons alpha (<math>\alpha</math>) peu pénétrants</b></p> <p>Il résultent de l'expulsion d'un noyau d'hélium, de charge positive (2 protons et 2 neutrons). Leur portée dans l'air est de 2,5 cm à 8,5 cm.</p> <p><b>Une feuille de papier ou la couche externe de la peau les arrêtent.</b></p>			
	<p><b>Les rayons bêta (<math>\beta</math>) plus pénétrants</b></p> <p>Ils résultent de l'expulsion d'un électron. Leur portée dans l'air est de quelques mètres. Ils peuvent traverser la couche superficielle de la peau.</p> <p><b>Une feuille d'aluminium ou une vitre les arrêtent.</b></p>			
	<p><b>Les rayons gammas (<math>\gamma</math>) très pénétrants</b></p> <p>Ils résultent de l'expulsion d'un photon. Ils sont de nature électro-magnétique comme la lumière ou les rayons X. Ils voyagent à la vitesse de la lumière.</p> <p><b>De fortes épaisseurs de matériaux compacts (béton, plomb...) sont nécessaires pour les arrêter.</b></p>			

<https://www.orano.group/fr/decodage/tout-savoir-sur-la-radioactivite>

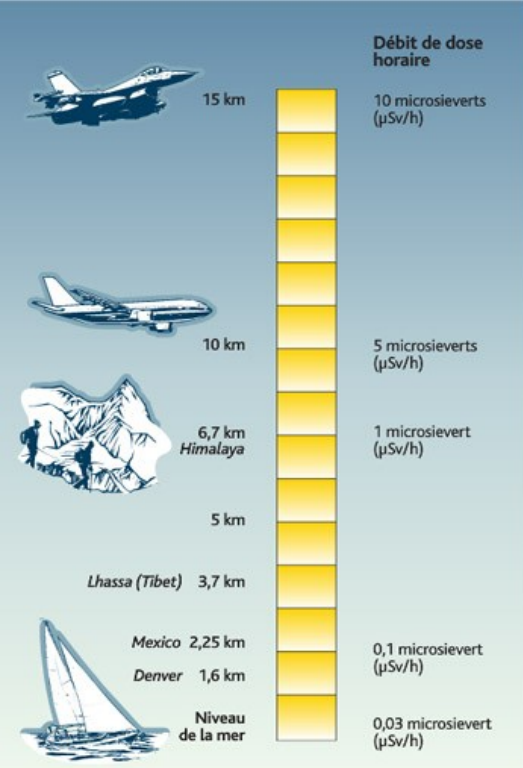
# Mesure des doses et des effets

- **Activité** d'une substance (nombre de **désintégrations par seconde**) :
  - Becquerel :  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$
  - 1 Curie =  $3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$  (1g de radium)
- Dose **absorbée** : gray
  - $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$  = énergie **déposée**
- Doses **équivalente** et **efficace** : sievert = dommages potentiels
  - $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$
  - $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$
- Dose **équivalente** : pondération selon le type de rayonnement
  - X,  $\gamma$ ,  $\beta$  : 1, protons : 2, neutrons : 2-20, autres ( $\alpha$ , fission) : 20
- Dose **efficace** : pondération selon l'organe concerné (CIPR, 2007)
  - Gonades : 0,20
  - Moelle osseuse, colon, poumon, estomac, sein : 0,12
  - Vessie, œsophage, thyroïde, foie : 0,05
  - Surface des os, cerveau, peau : 0,01

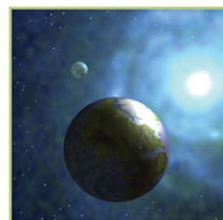


# Échelle des doses

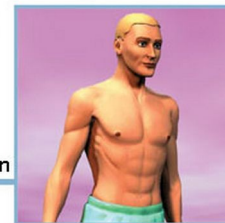
- 0,03 millisievert (mSv) : un vol Paris/New-York (rayons cosmiques)
- 0,7 mSv : une radio des poumons
- **3 mSv : un an d'exposition à la radioactivité naturelle en France**
- 10 mSv : un scanner
- > 100 mSv : augmentation avérée des risques de cancer



## Les sources de radioactivité en France (source CEA/IRSN)



24,5 %  
Rayonnements cosmiques (10,9 %)  
Rayonnements telluriques (13,6 %)



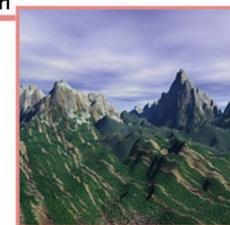
8,2 %  
Corps humain



0,3 %  
Autres (rejets de l'industrie, retombées atmosphériques...)



32,7 %  
Applications médicales



34,3 %  
Radon

Au-delà de 1 sievert reçu en peu de temps : troubles avérés, éventuellement mort à court / moyen terme

<https://www.irsn.fr/Expo-Asn-Irsn/Documents/pages/1-4.php.html>  
<https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/sources-radioactivite/Pages/1-sources-radioactivite-naturelle.aspx?dId=2ef28ef7-3363-4bed-b7b3-47a597e68d1d&dwid=02b23d3f-13d2-4faa-ab26-1e26e8c4700c>  
<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/radioactivite/homme-rayonnements.aspx?Type=Chapitre&numero=2>



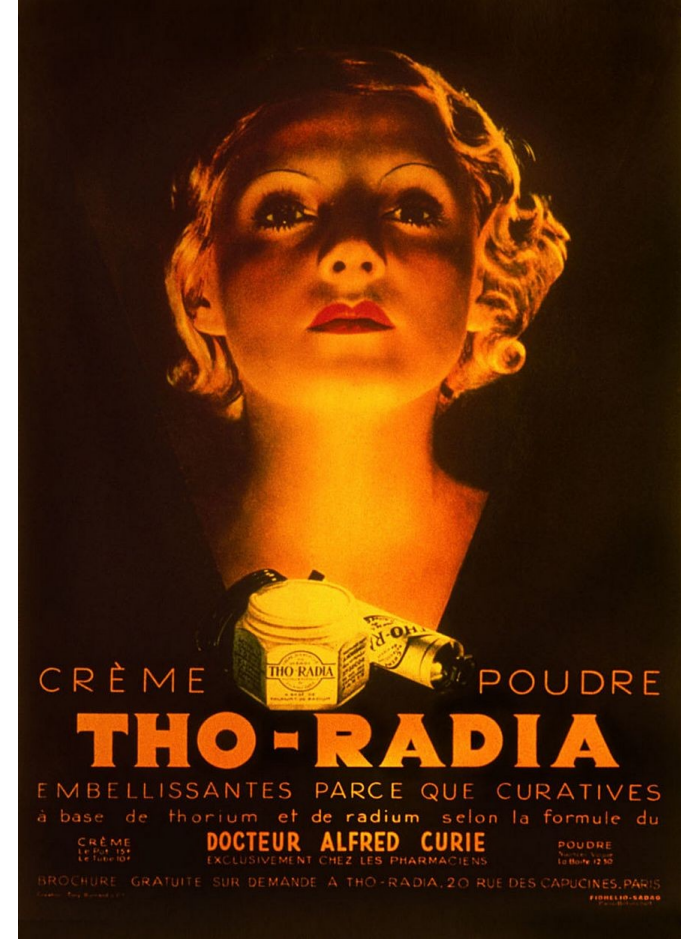
# Radioprotection

- Contrairement à ce que dit la publicité, les rayonnements ionisants sont nocifs...
- Protection : **limite de temps, éloignement et blindage**



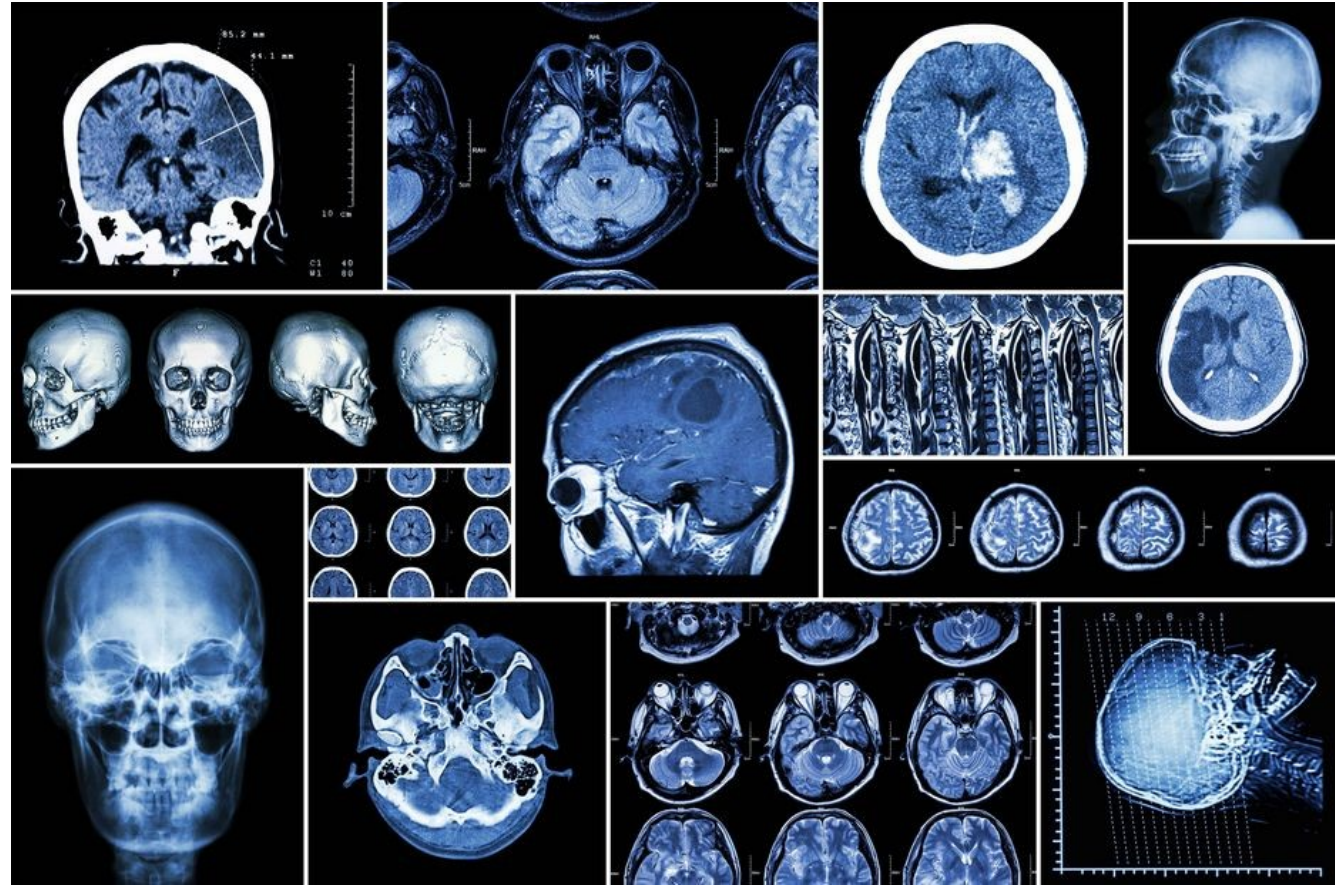
Nouveau pictogramme de risque  
contre les rayonnements ionisants,  
ISO 21482:2007

<https://www.flipada.com/algunos-increibles-usos-que-se-le-daban-a-la-radioactividad/tho-radia/>  
<https://www.hexamed.fr/4620-tablier-plombe-demi-chasuble-60x110cm-pb-035mm-coloris-bleu-marine.html>



(Aucun lien de parenté entre  
Alfred et Pierre & Marie)

## II. IMAGERIE

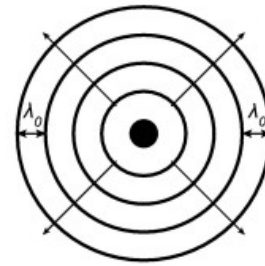




# L'effet Doppler(-Fizeau)

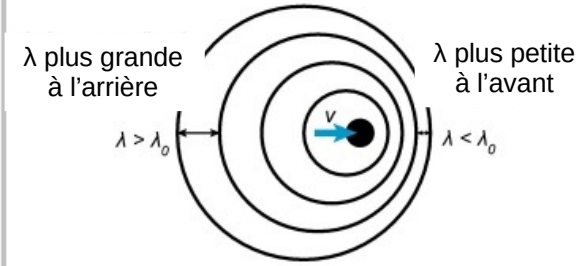
- Effet **cinématique** sur la **fréquence d'une onde** = **variation de la fréquence entre l'émission et la réception** (1842-1848)
- Exemple classique = perception de la hauteur du **son d'une sirène ou d'un moteur**. Le son est différent si :
  - le récepteur est immobile par rapport à l'émetteur (pas de variation)
  - l'émetteur s'approche du récepteur (son + aigu)
  - le véhicule s'éloigne du récepteur (son + grave)
- Permet de **déterminer des vitesses** : avions, voitures (« radar » = radio detection and ranging), sang (« échographie Doppler »)
- Il existe un effet Doppler **relativiste** (pour les photons), qui participe au décalage vers le rouge des objets astronomiques lointains

cas n°1 :  $v = 0$



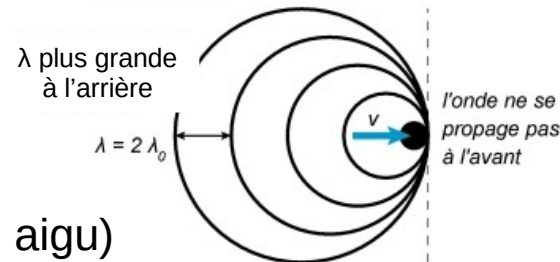
les ondes se propagent par cercles concentriques autour de la source  
 $\lambda_0$  est identique en tout point

cas n°2 :  $0 < v < c$



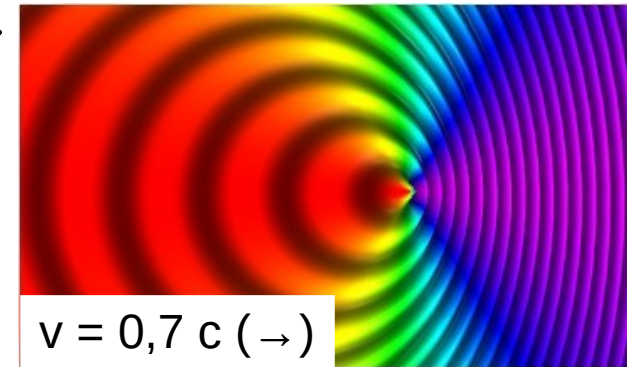
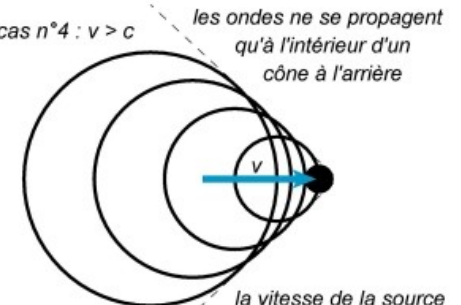
la source se déplace

cas n°3 :  $v = c$



la vitesse de la source et la célérité de l'onde sont égales

cas n°4 :  $v > c$





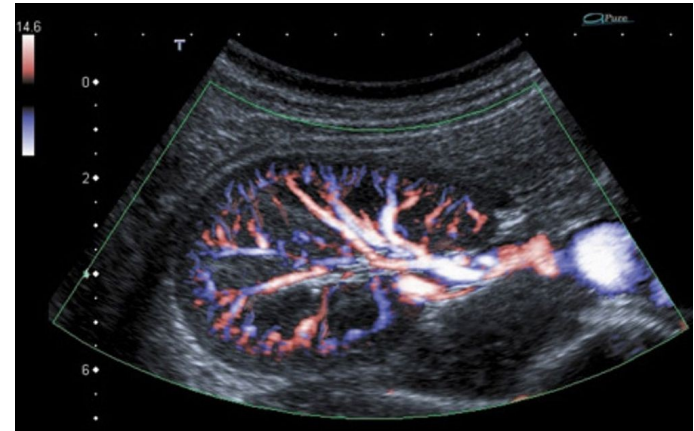
# Échographie



1. Les sondes, 2. Système de visualisation,
3. Gel pour échographie, 4. Console de commande,
5. Console d'acquisition, 6. Imprimante

- Nom inspiré de la **nymphé grecque Écho** et employant le suffixe **γράφειν** (graphein = écrire)
- Technique d'imagerie employant des **ultrasons**, issue de **~200 ans de recherche pluridisciplinaire** : mathématiques, biologie, médecine, électronique, informatique
  - $f = 1\text{--}50$  MHz selon organe étudié : fréquence élevée = meilleure précision mais absorption plus importante
- Visualisation **non invasive en 2D** (principe du sonar : émission et détection d'ultrasons – temps → distance)
- Besoin d'**un gel** pour une **bonne transmission** des ondes (impédances acoustiques de l'air et de la peau  $\neq$ )
- **Échographie Doppler** : captation des vitesses → flux sanguin

<https://radiodiagnostique.be/services/echographie-doppler-infiltration/>

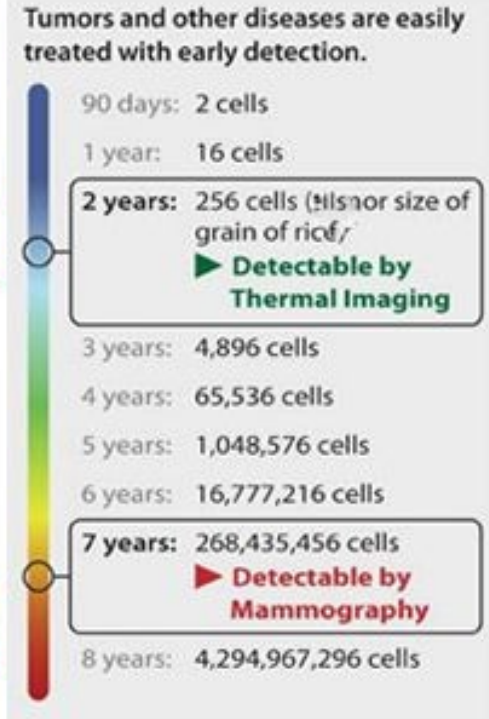
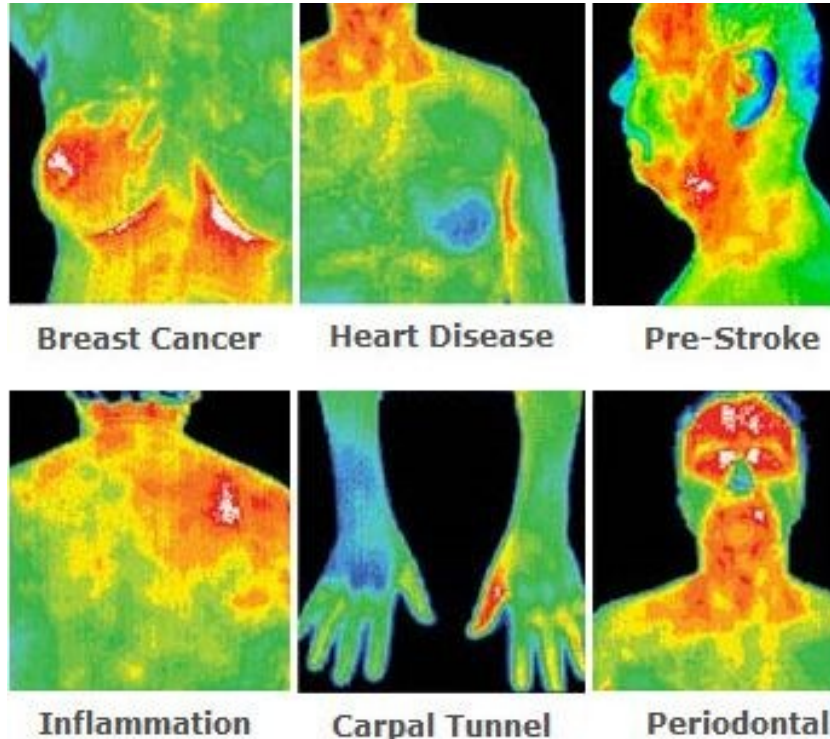
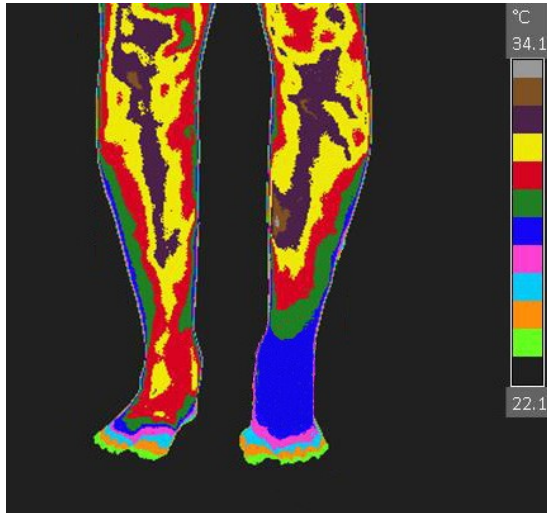


Punie par Héra d'avoir aidé Zeus à la tromper en bavardant pour l'occuper, elle fut condamnée à seulement pouvoir répéter les derniers mots qu'elle avait entendus. Tombée amoureuse de Narcisse mais rejetée car incapable de communiquer avec lui, elle mourut de chagrin.

# Thermographie

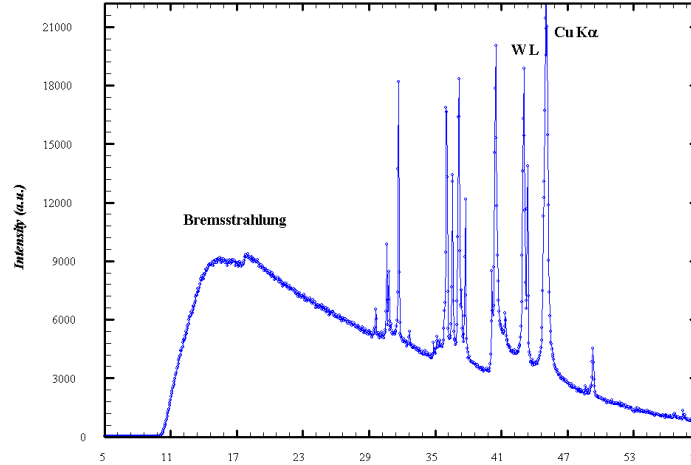
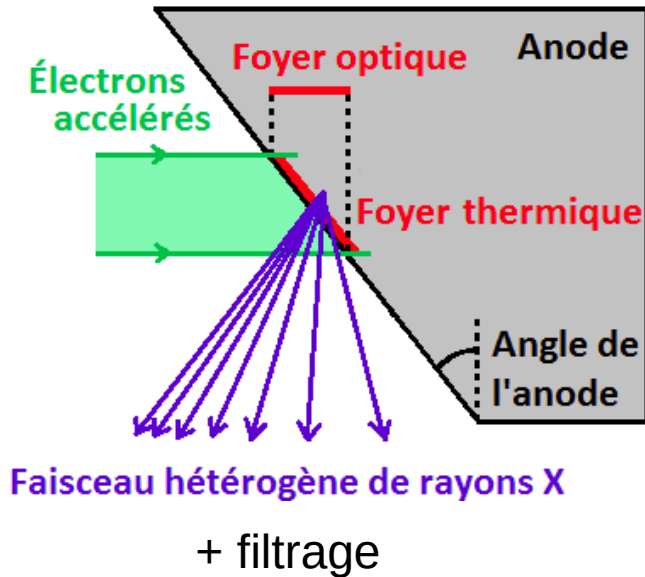
Mesure de la température au niveau de la peau par étude des ondes infrarouges émises

- Résultat d'un « test au froid »



# La radiographie

- Technique d'imagerie de **transmission** par rayons X ou  $\gamma$  (gammagraphie)
  - Ondes électromagnétiques (photons)
  - Énergie de l'ordre de  $10^2 - 10^6$  eV
- Production et **filtrage** des rayons X

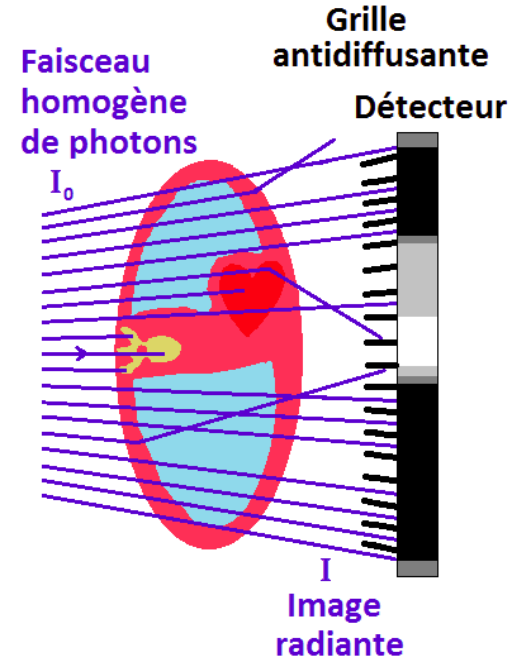


Spectre produit avec un tube à rayons X. Le **fond continu** correspond au **Bremsstrahlung** et les raies proviennent des **transitions électroniques** de l'anode.

Rappel : 1 eV (électron-volt) est l'énergie cinétique acquise par un **électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel d'un volt** :

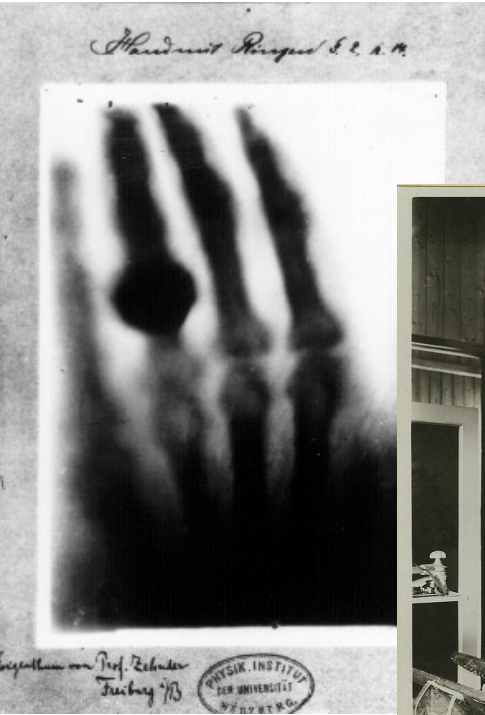
$$1 \text{ eV} = (1 \text{ e}) \times (1 \text{ V}) = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- Détection des rayons X transmis par un **film photographique**
  - La transmission dépend de l'énergie du faisceau

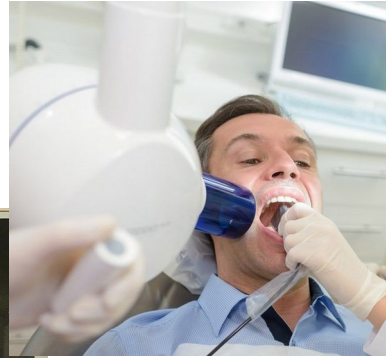




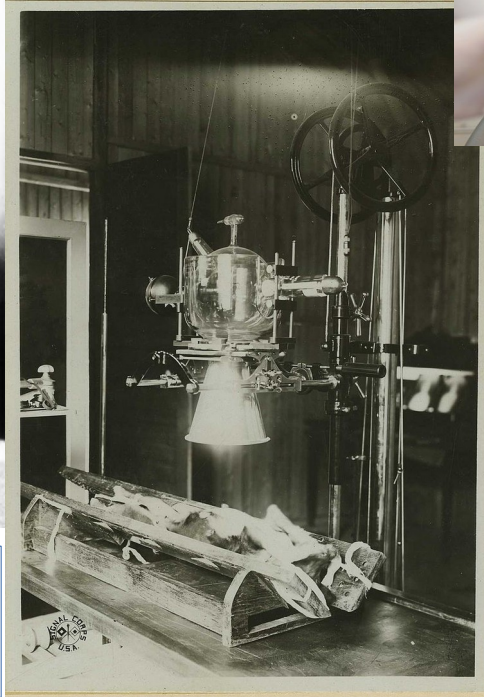
# La radiographie Appareillage & images



Première radiographie de l'histoire (1895) : main d'Anna Bertha Röntgen, femme de Wilhelm Röntgen



Radiographie numérisée dans un cabinet dentaire



Radiographie vétérinaire (1918)

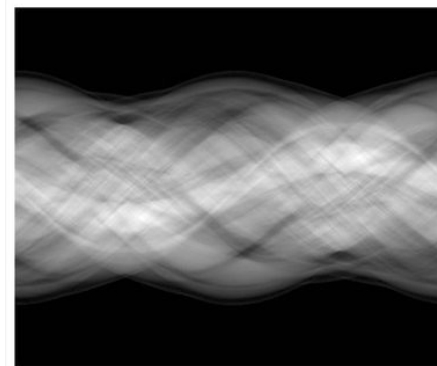
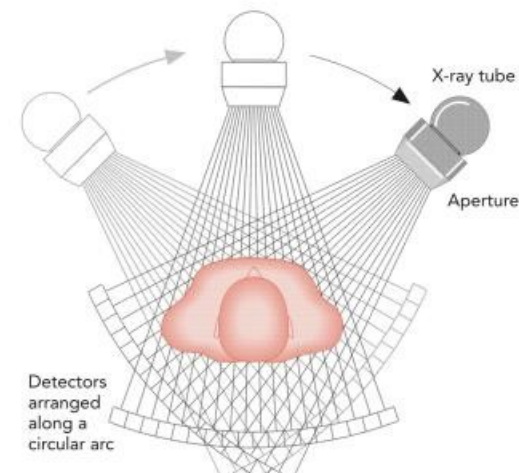


Radiographies avec « soustraction » des tissus / os (combinaisons linéaire de deux images à différents niveaux d'énergie, qui rendent les tissus mous / os invisibles).

# La tomographie

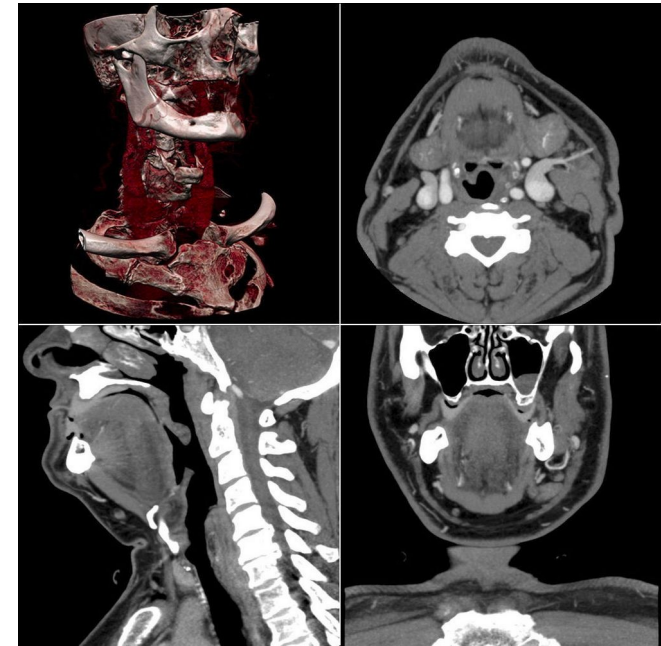
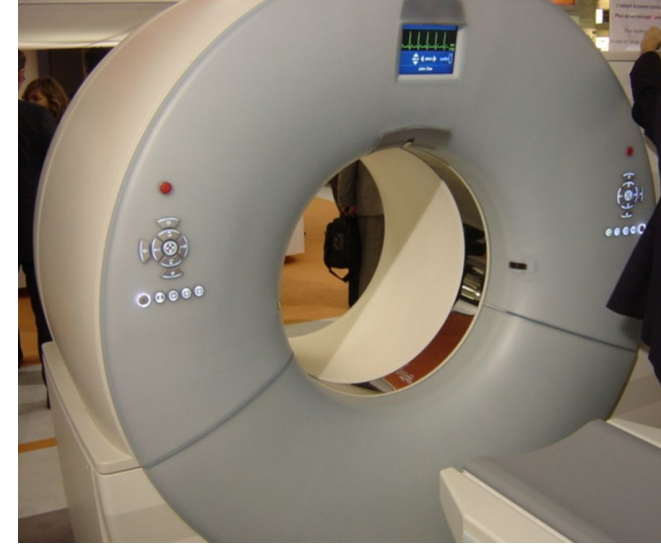
Technique d'imagerie permettant de reconstruire le **volume d'un objet à partir de mesures extérieures**

- Du grec "τομος", coupe, et "γράφειν", écrire
- 2 étapes mathématiques :
  - Élaboration d'un modèle décrivant les phénomènes physiques mesurés
  - Calcul de la distribution tridimensionnelle grâce au modèle (algorithme)
- Mesure :
  - Prise d'image tout autour de l'objet → **sinogramme** (calculé à partir des projections)
  - Reconstruction (« **transformée de Radon** »)
- Utilisée pour :
  - Les scanners
  - La Tomographie par Émission de Positons
  - La Tomographie d'Émission MonoPhotonique



# Le scanner

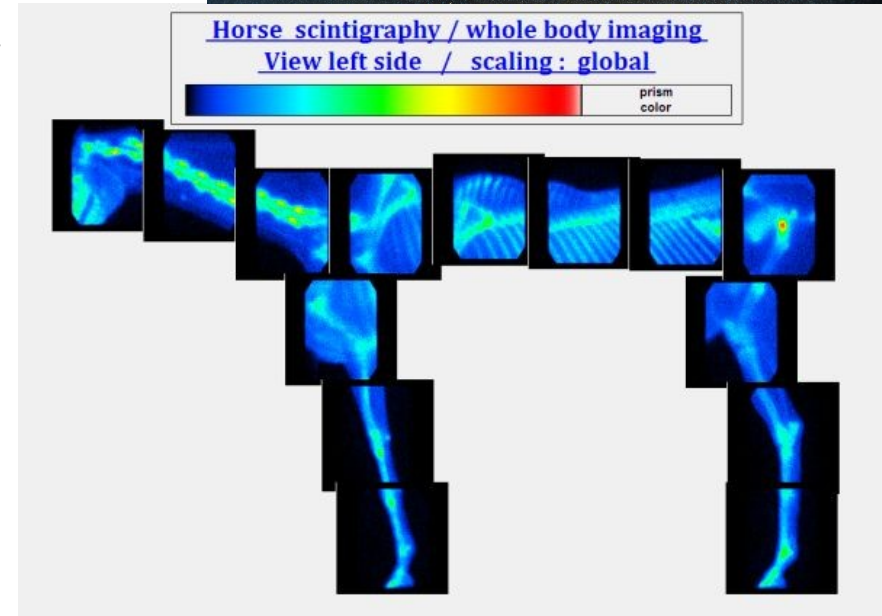
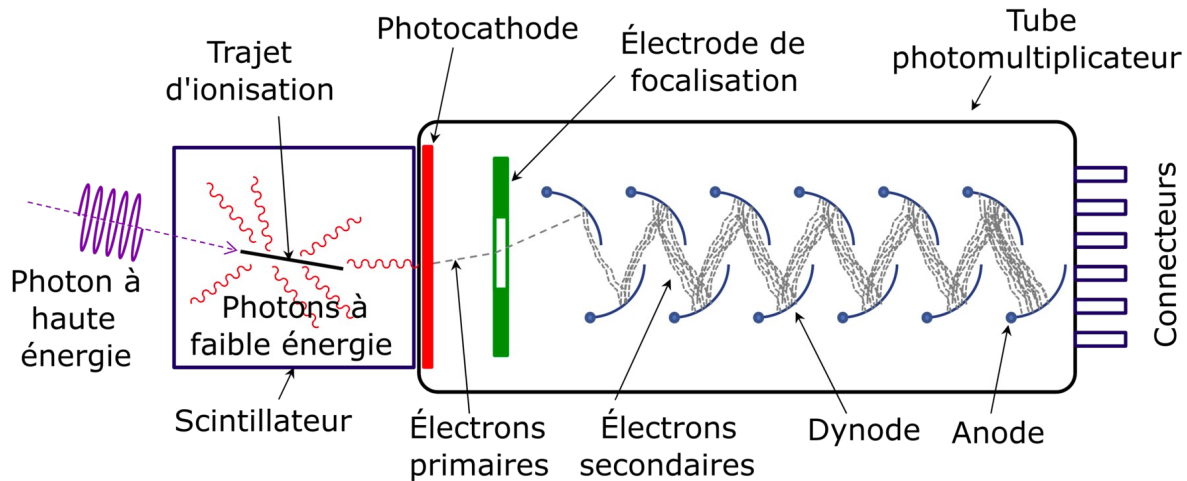
- Technique de la **tomodensitométrie** (TDM) ou :
  - Scanographie
  - tomographie axiale calculée par ordinateur (TACO),
  - C(A)T-scan (computed (axial) tomography)
- Utilise la technique de **tomographie**
  - Émission et détection de **rayons X** autour du patient
- Technique possible depuis les années 1970 (développement de l'informatique)
  - Prix Nobel de médecine 1979





# La scintigraphie

- Produit une image grâce à l'**administration d'un médicament radiopharmaceutique** dont on détecte les **rayonnements** une fois qu'il a été capté par l'organe ou la cible à examiner
- Dose de radioactivité faible pour **minimiser l'irradiation** (une scintigraphie osseuse n'irradie pas plus qu'une radio ou un scanner)
- Détection des rayons  $\gamma$  par des « **caméra à scintillation** » (**gamma-caméras**) puis traitement logiciel

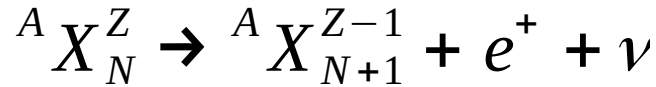


# La tomographie par émission de positons

- Ou « PET scan » : image en 3D de l'activité métabolique d'un organe
- **Scintigraphie** : injection d'un **traceur radioactif** ( $^{18}\text{F}$ ,  $T_{1/2} \approx 2\text{h}$ ), **fixé à du glucose**, qui se dirige vers les **zones de grande consommation** (cellules cancéreuses, cœur, cerveau)
  - Traceurs produits dans un « **cyclotron** » (accélérateur de particules)

- **Radioactivité  $\beta^+$**  :

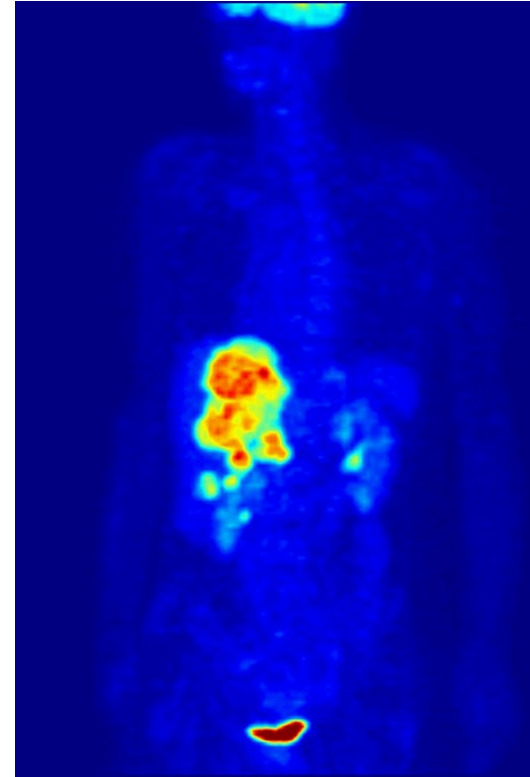
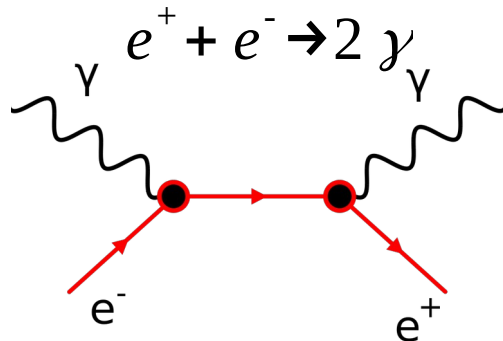
proton  $\rightarrow$  neutron + positon



- Après un parcours de  $\sim 0,5\text{ mm}$ , le **positon ( $e^+$ )** rencontre un **électron ( $e^-$ )**  $\rightarrow$  **annihilation**

$\rightarrow$  émission de 2 photons

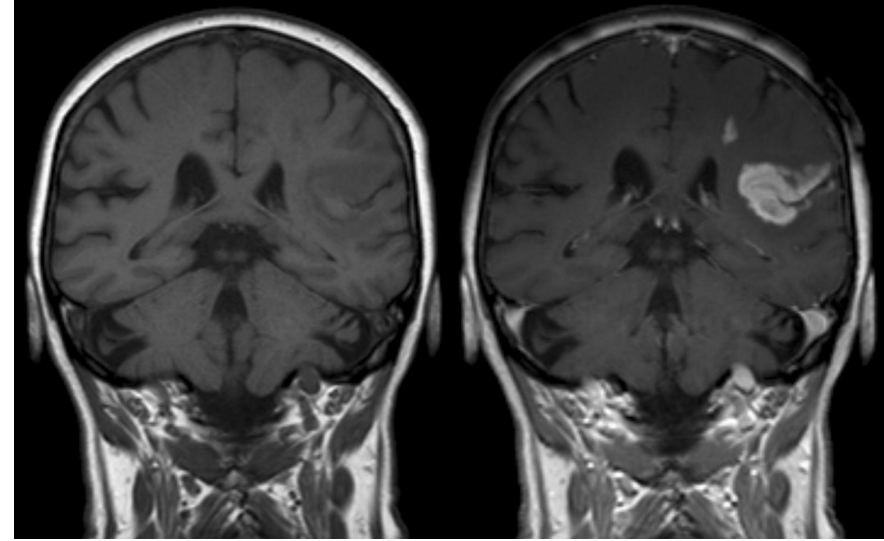
- $E = mc^2 = 511\text{ keV}$
- Émis à  $\sim 180^\circ$  l'un de l'autre
- Détection de la coïncidence



Tomographie d'Émission MonoPhotonique : le traceur émet lui-même des photons  $\gamma$

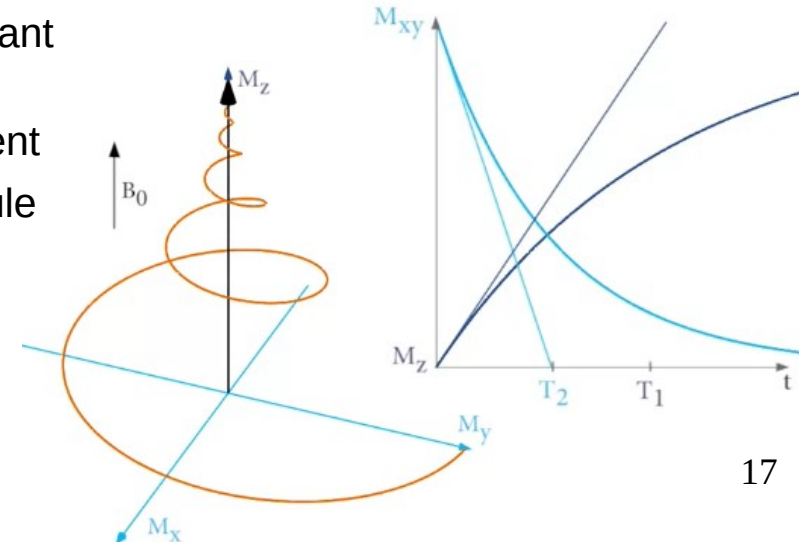
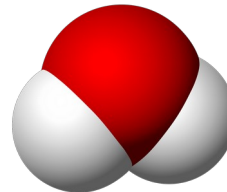
# L'IRM

- Le proton a, comme l'électron, un spin  $\pm 1/2$ 
  - → RMN (Résonance Magnétique Nucléaire)
  - → IRM (Imagerie par Résonance Magnétique)
    - Technique **non invasive & non irradiante**
    - Prix Nobel de médecine 2003



Un **produit de contraste** permet de réduire les temps de relaxation magnétique T1 et T2 et d'améliorer la résolution

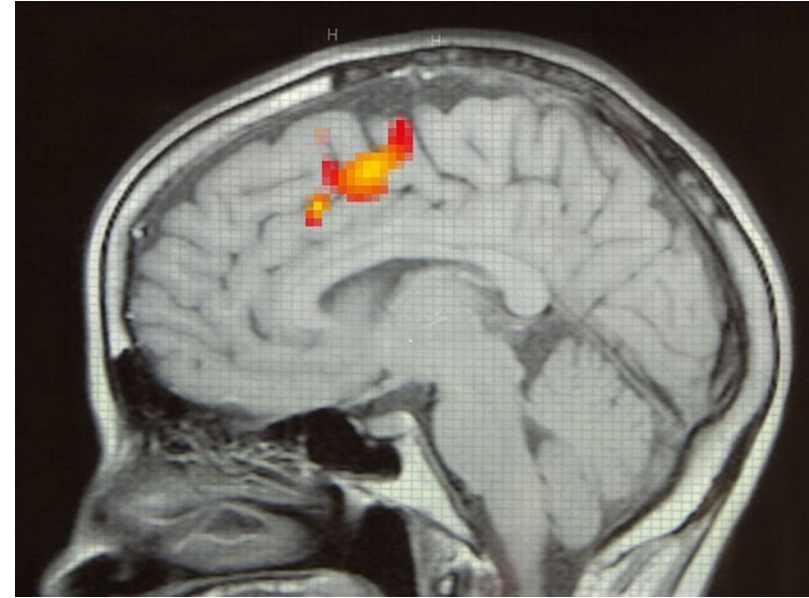
- Principe :
  - Grâce à un champ mag., on aligne les spins des protons auparavant orientés aléatoirement (précession autour de l'axe du champ)
  - Des champs mag. « radiofréquence » vont perturber cet alignement
  - On étudie le retour à l'équilibre (**temps de relaxation**) et on calcule la densité de protons (et donc d'eau) de la zone étudiée
- Corps peu magnétique → champ magnétique très intense
  - 1,6 T  $\approx$  40 000 x champ mag. terrestre
  - Pas de métal à proximité



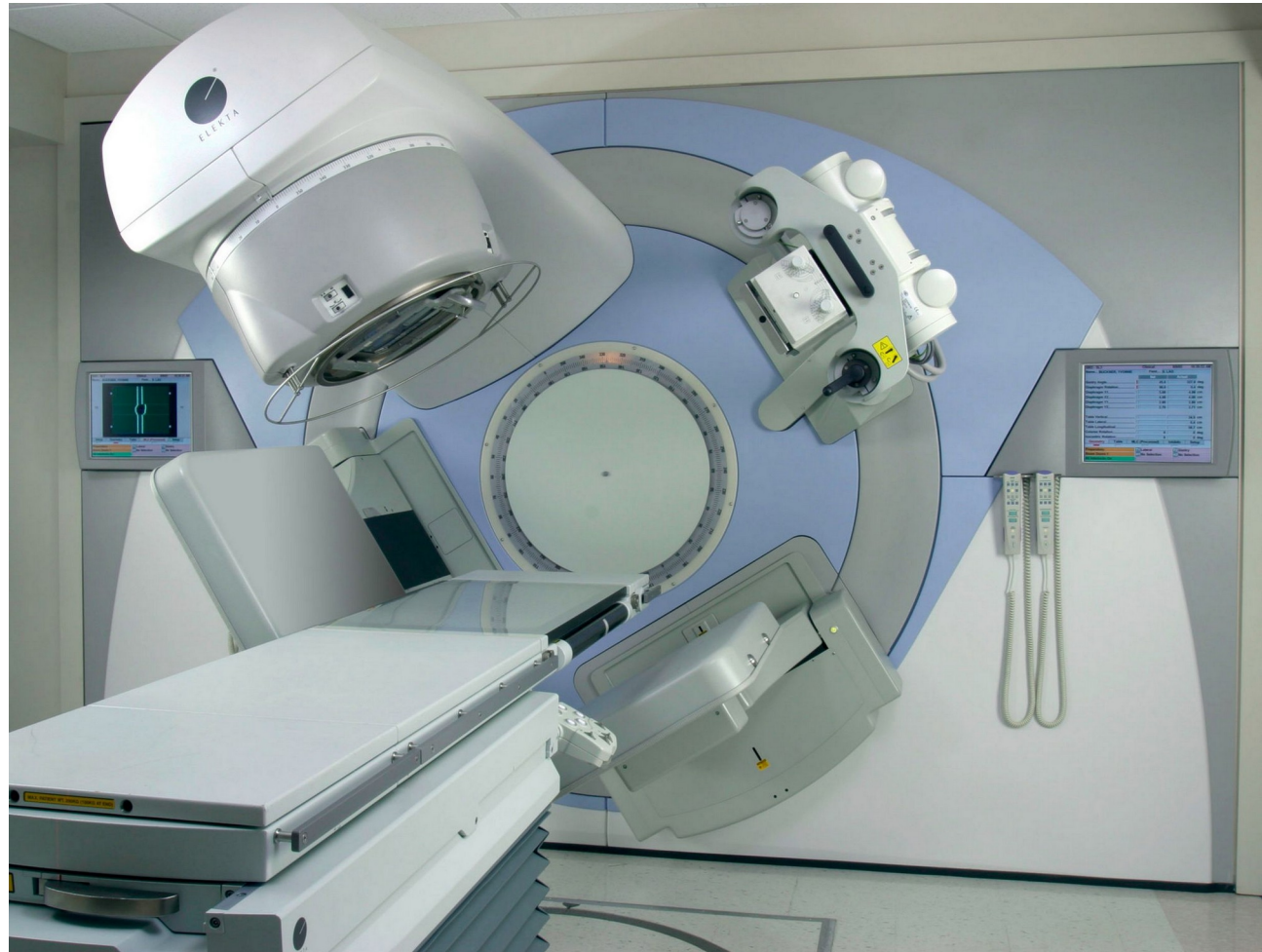


# L'IRMf

- Pour IRM **fonctionnelle**
  - Visualisation de l'**activité cérébrale**
- Détection des **variations hémodynamiques** (du flux sanguin) cérébrales
- S'appuie sur le signal « **BOLD** » (« blood-oxygen-level dependent »)
  - **Augmentation de l'apport d'oxygène** et de glucose dans les zones stimulées
  - Mais **saturation des processus aérobie**s → **processus anaérobies**
    - **sur-oxygénation du sang veineux**
      - C'est-à-dire diminution (de ~1%) de la désoxyhémoglobine **paramagnétique** par rapport à l'oxyhémoglobine invisible à l'IRM



### III. TRAITEMENTS



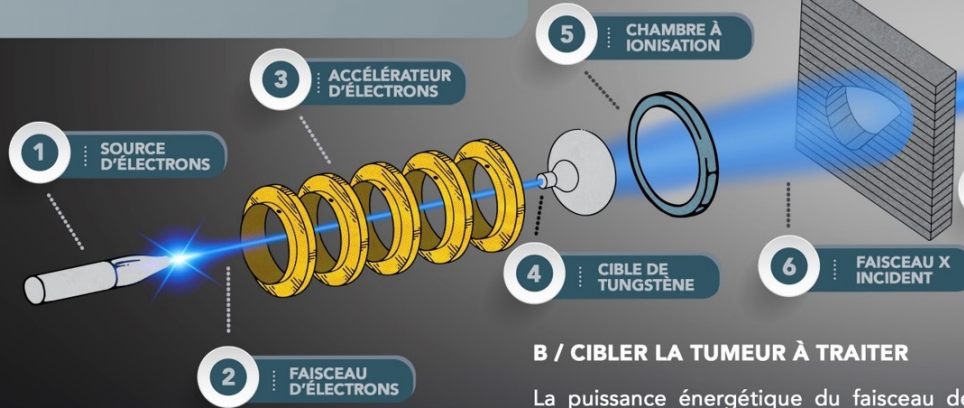
Appareil de radiothérapie (~ 2 M€)

# La radiothérapie – principe

- Traitement « **locorégional** », par opposition à « **systemique** » (sur le corps entier)
- Traitement des cancers par **irradiation par un faisceau d'électrons**

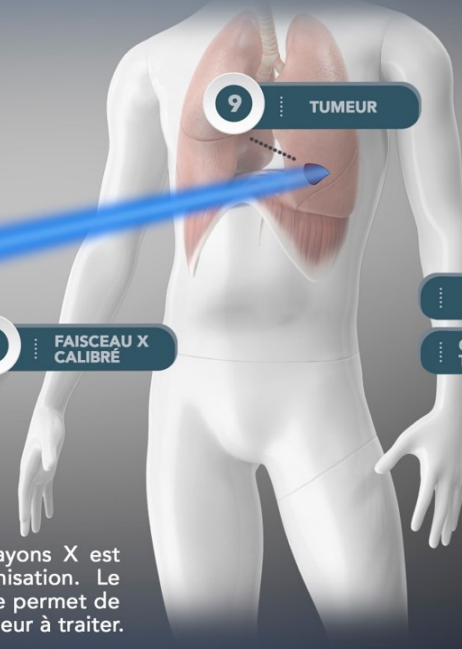
## A / PRODUIRE UN FAISCEAU ÉNERGÉTIQUE

L'appareil de radiothérapie produit en premier lieu des électrons, qui sont accélérés à très grande vitesse à l'aide d'un puissant système électro-magnétique. Ce faisceau électronique très énergétique est brutalement freiné par une cible de tungstène : une partie de son énergie est alors convertie en rayons X.



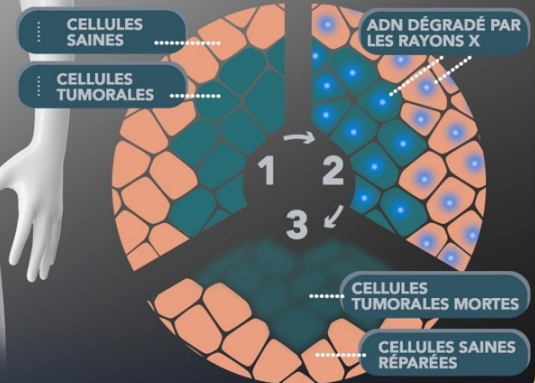
## B / CIBLER LA TUMEUR À TRAITER

La puissance énergétique du faisceau de rayons X est contrôlée au niveau de la chambre à ionisation. Le dispositif de collimateur à lames de tungstène permet de donner au faisceau la même forme que la tumeur à traiter.



## C / DÉTRUIRE LES CELLULES CANCÉREUSES

Le faisceau de rayons X touche toutes les cellules qui se trouvent sur son trajet, ce qui les endommage, en générant notamment des lésions à leur ADN. Les cellules tumorales meurent davantage que les cellules saines, qui parviennent à se réparer. Les cellules mortes sont évacuées et les tissus sains se reconstituent progressivement.





# « Plan de radiothérapie »

Open directory | Open files | **ARTWEB** | Not for clinical use | **AQUILAB** by CMEYA

**Patients & Series**

Create a dose proces...

**ClinicalTrialQa 02-1-T-T**

CT 2016-03-16 AQUILAB

RD 2016-03-16 AQUILAB

RP 2016-03-16 AQUILAB

RS 2016-03-16 AQUILAB

**Contour**

Save...

Boolean | Margin

Interpolation

ROI List: + Add

- All regions of interest
- Canal Med
- Canal+3
- CanalMed+5
- \*Coeur
- Coeur-PTVs
- CONTOUR EXTERNE
- CouchInterior
- CouchSurface
- CTVn
- CTVt
- FDG-GTVt
- FDG-GTVn
- Foie
- Foie-PTVs
- GTV4Dt-CT
- GTVn
- GTVt
- GTVt-CT
- Larynx

500 mm X 500 mm  
512 px X 512 px  
Slice: 45/128

Position: z = 27.5 mm

Slice: 45/128  
187 px X 111 px  
467.5 mm X 277.5 mm

CT | HFS | AQUILAB | (2016-03-16) | L.U.T.: Positive

RTDOSE | AQUILAB | (2016-03-16) | Opacity: | L.U.T.: RTDose full

500 mm X 320 mm  
512 px X 128 px  
Slice: 299/512

Position: y = -42.0 mm

Slice: 72/111  
187 px X 128 px  
467.5 mm X 320 mm

CT | HFS | AQUILAB | (2016-03-16) | L.U.T.: Positive

RTDOSE | AQUILAB | (2016-03-16) | Opacity: | L.U.T.: RTDose full

500 mm X 320 mm  
512 px X 128 px  
Slice: 210/512

Position: x = -45.9 mm

Slice: 83/187  
111 px X 128 px  
277.5 mm X 320 mm

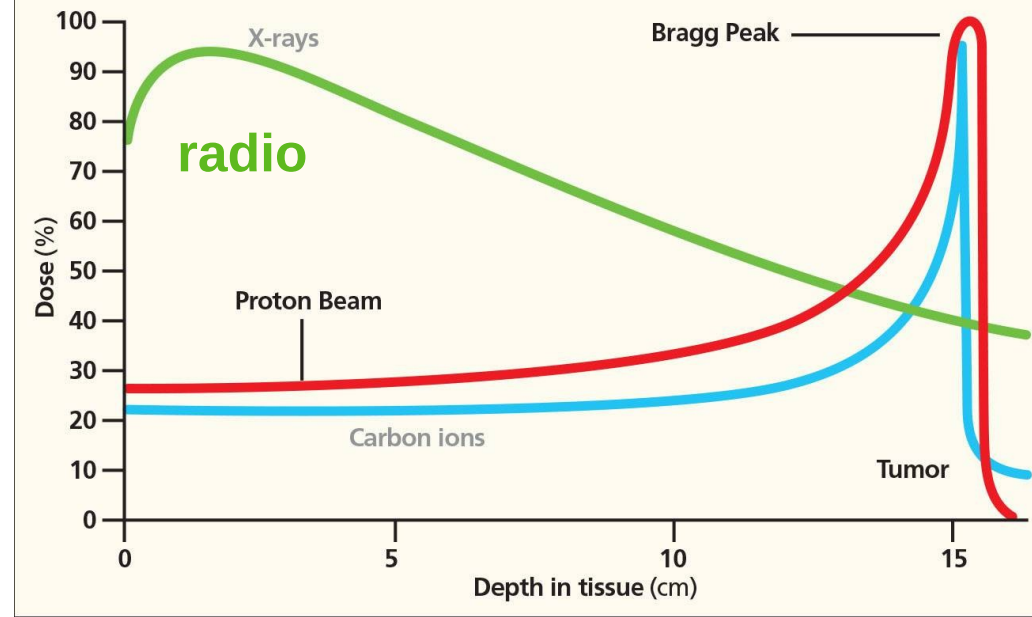
CT | HFS | AQUILAB | (2016-03-16) | L.U.T.: Positive

RTDOSE | AQUILAB | (2016-03-16) | Opacity: | L.U.T.: RTDose full

# L'hadronthérapie

- **Hadron** = composé de **quarks**
  - **protons**, ions **carbone**
- Physique quantique & relativité restreinte → calcul du **dépôt d'énergie dans le milieu** :  
« **formule de Bethe** »
  - Prix Nobel de physique 1967

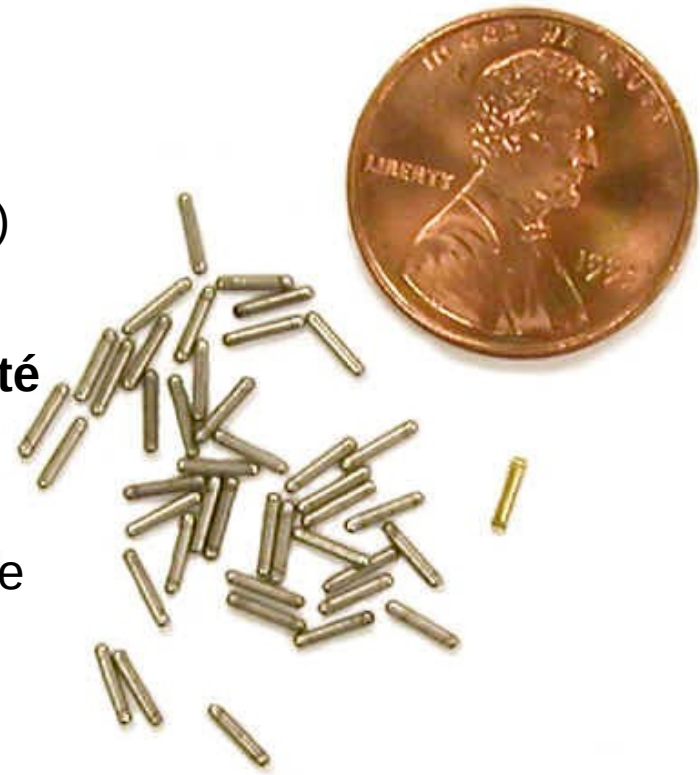
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1-\beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$



- La **section efficace** augmente lorsque l'énergie de la particule décroît  
→ « **pic de Bragg** »
- Le faisceau est conçu pour déposer la **majeure partie de son énergie** au niveau de la tumeur

# La curiethérapie

- Ou « **brachythérapie** » (du grec « brachy », courte distance)
- Technique de radiothérapie mise au point à l'Institut Curie
- Source radioactive scellée placée à l'intérieur ou à proximité **immédiate** de la zone à traiter
  - → cancers du col de l'utérus, de la prostate, du sein ou de la peau
- Initialement, problématique d'**irradiation des opérateurs** due à la manipulation des sources
  - → Développement des systèmes à distance et utilisation de nouvelles sources radioactives
- Dose émise: 2 – 12+ Gy/h
- Deux options :
  - Implantation **temporaire** (~ heure)
  - Implantation **permanente** (grains de la taille d'un grain de riz)



Grains radioactifs