

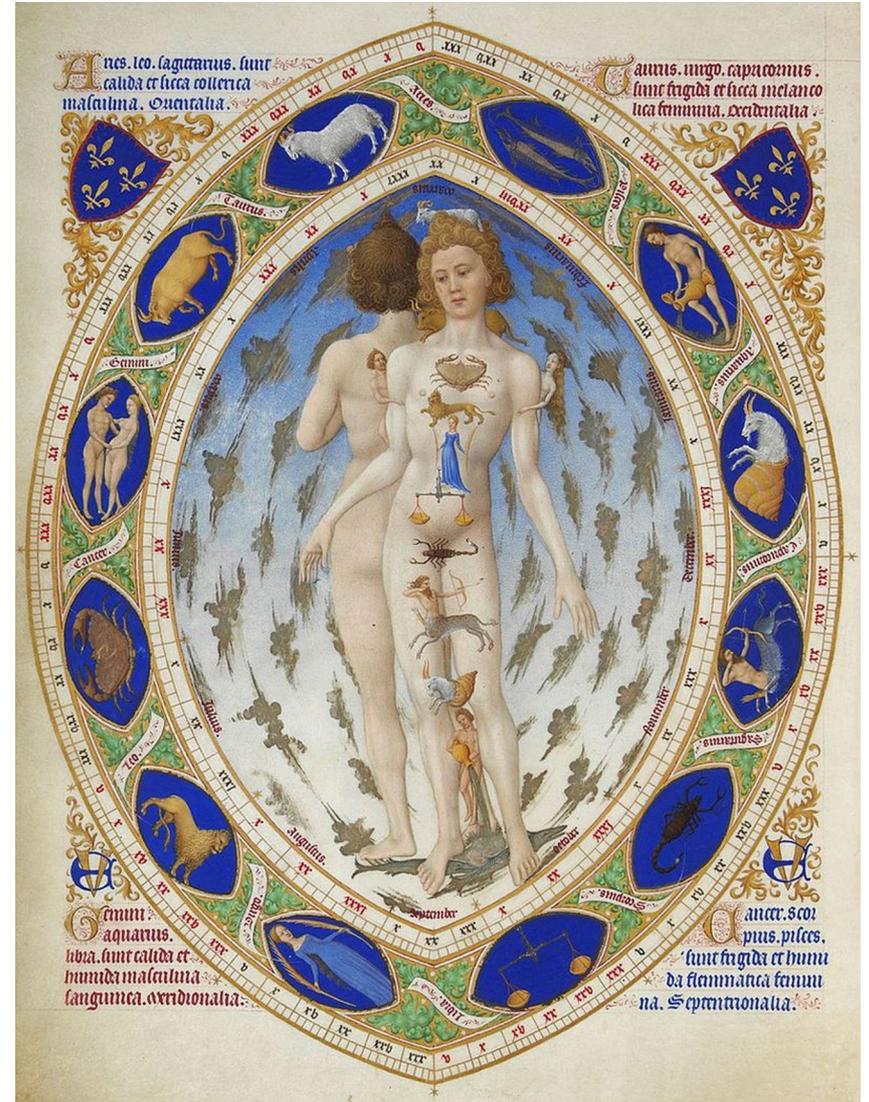
La physique de la médecine

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

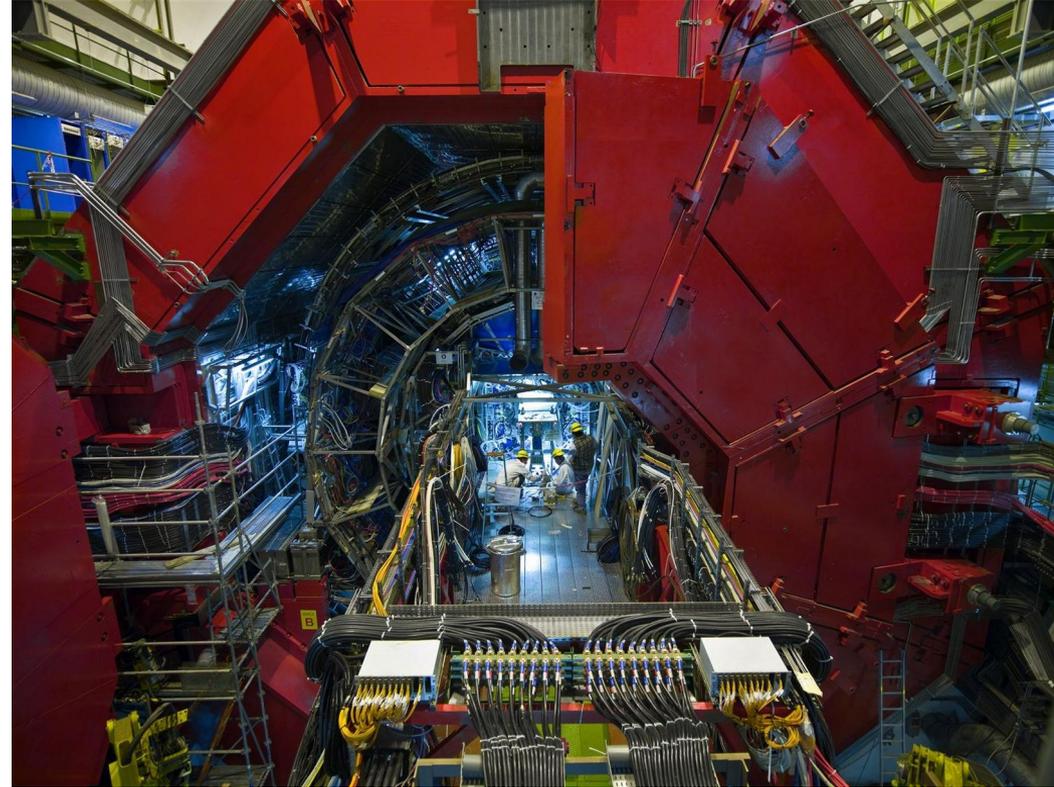
Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées
Images : Wikipedia sauf mention contraire



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

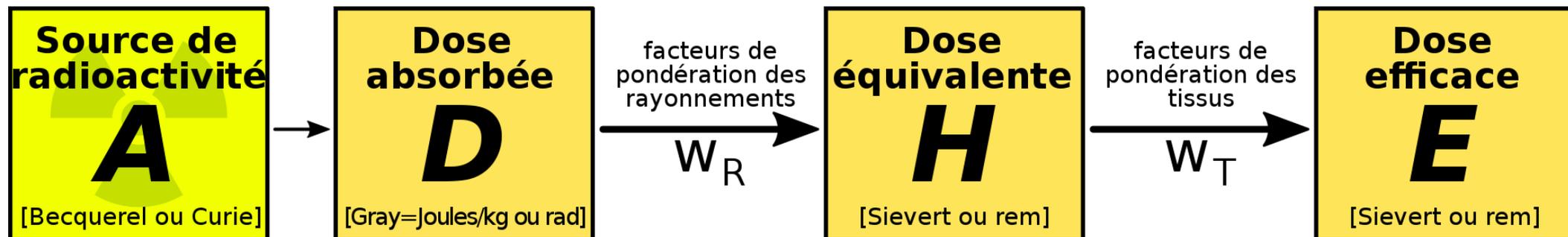
Les rayonnements ionisants

- 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>Les rayons alpha (α) peu pénétrants</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>Une feuille de papier ou la couche externe de la peau les arrêtent.</p>			
	<p>Les rayons bêta (β) plus pénétrants</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>Une feuille d'aluminium ou une vitre les arrêtent.</p>			
	<p>Les rayons gammas (γ) très pénétrants</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>De fortes épaisseurs de matériaux compacts (béton, plomb...) sont nécessaires pour les arrêter.</p>			

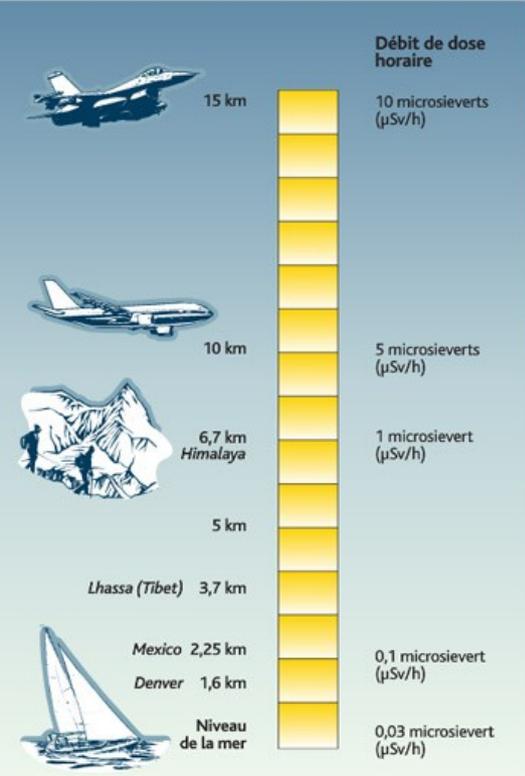
Mesure des doses et des effets

- **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, γ , β : 1, protons : 2, neutrons : 2-20, autres (α , 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

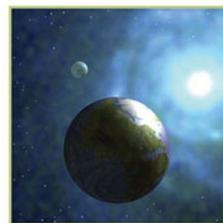


Échelle des doses

- 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)



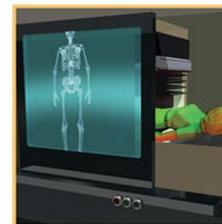
24,5 %
Rayonnements cosmiques (10,9 %)
Rayonnements telluriques (13,6 %)



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>

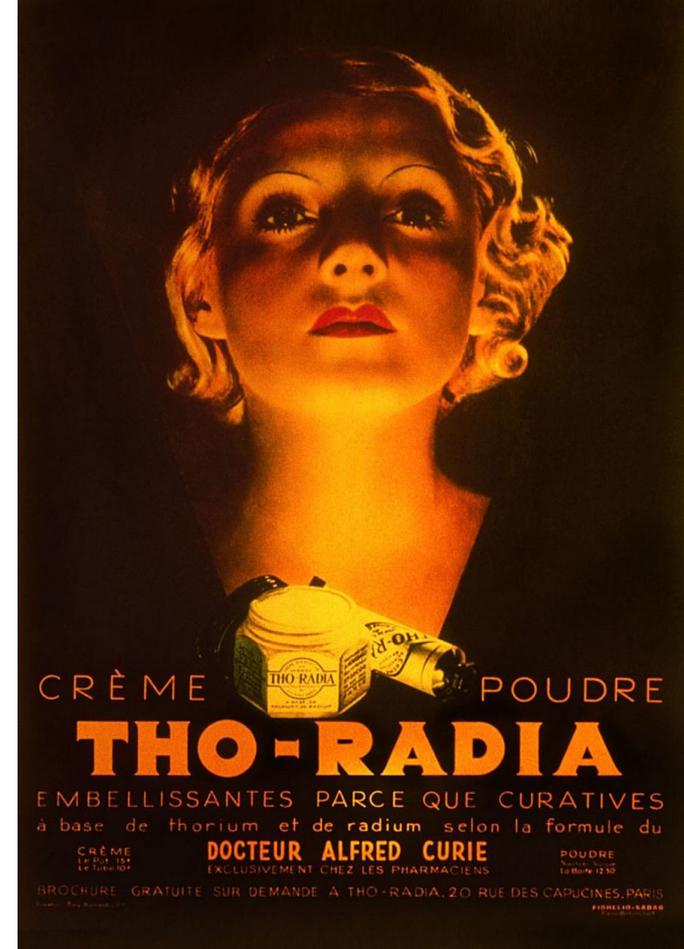
Radioprotection

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



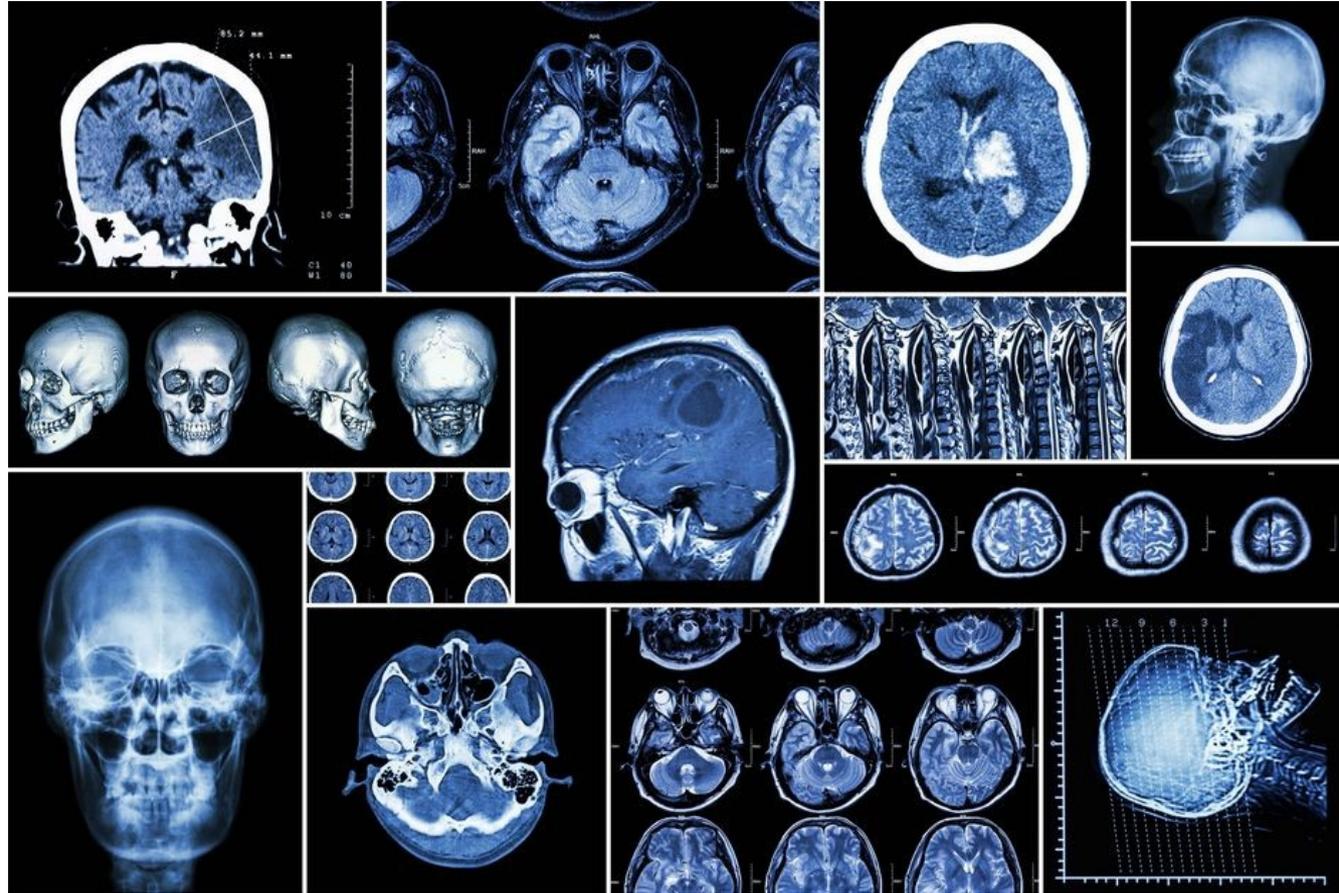
Nouveau pictogramme de risque
contre les rayonnements ionisants,
ISO 21482:2007

<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)

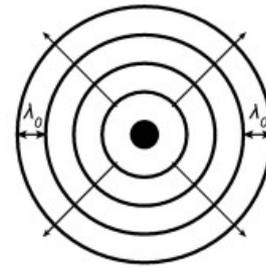
II. IMAGERIE



L'effet Doppler(-Fizeau)

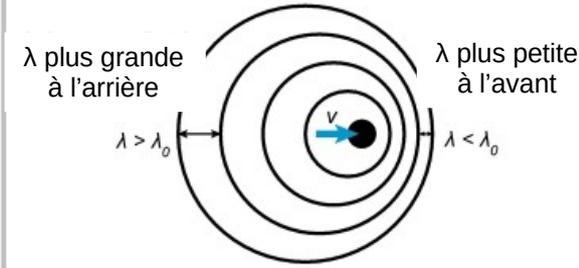
- Effet **cinématique** sur la **fréquence d'une onde** = **variation de la fréquence entre l'émission et la réception** (1842-1848)
- Exemple classique = perception de la hauteur du **son d'une sirène ou d'un moteur**. Le son est différent si :
 - le récepteur est immobile par rapport à l'émetteur (pas 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 : $v = 0$



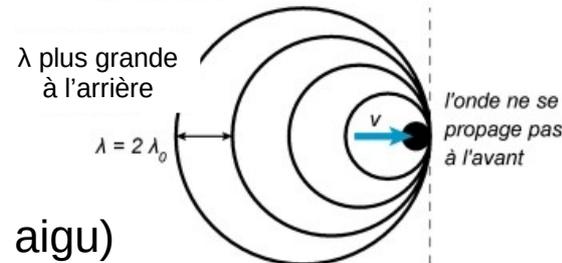
les ondes se propagent par cercles concentriques autour de la source
 λ_0 est identique en tout point

cas n°2 : $0 < v < c$



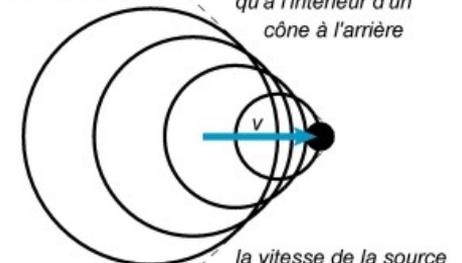
la source se déplace

cas n°3 : $v = c$

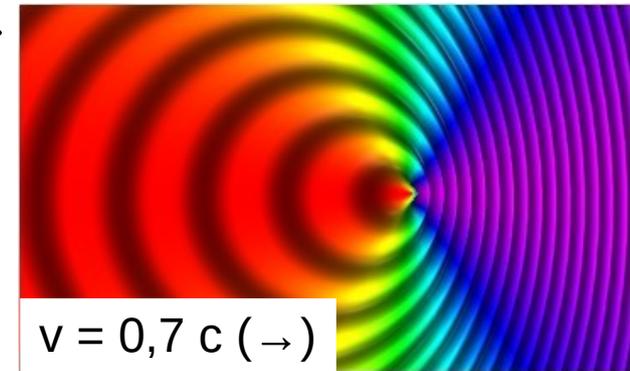


la vitesse de la source et la célérité de l'onde sont égales

cas n°4 : $v > c$



la vitesse de la source est plus forte que la célérité de l'onde



$v = 0,7 c$ (→)

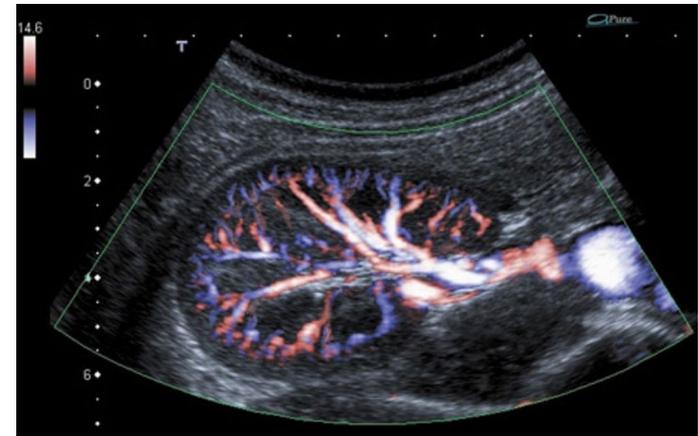
Échographie



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/>

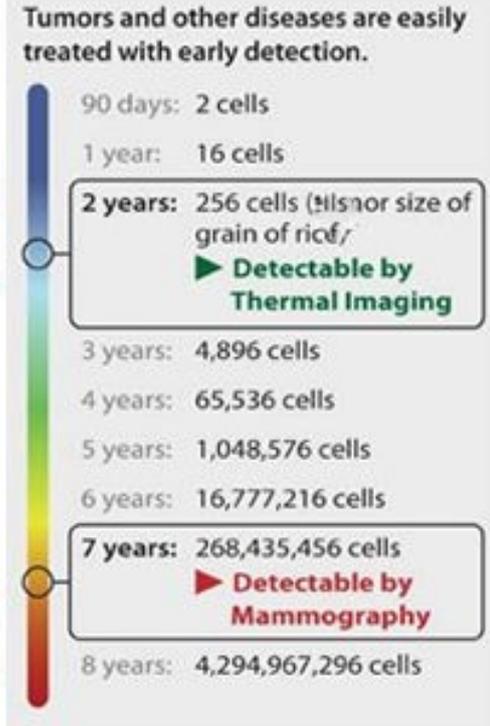
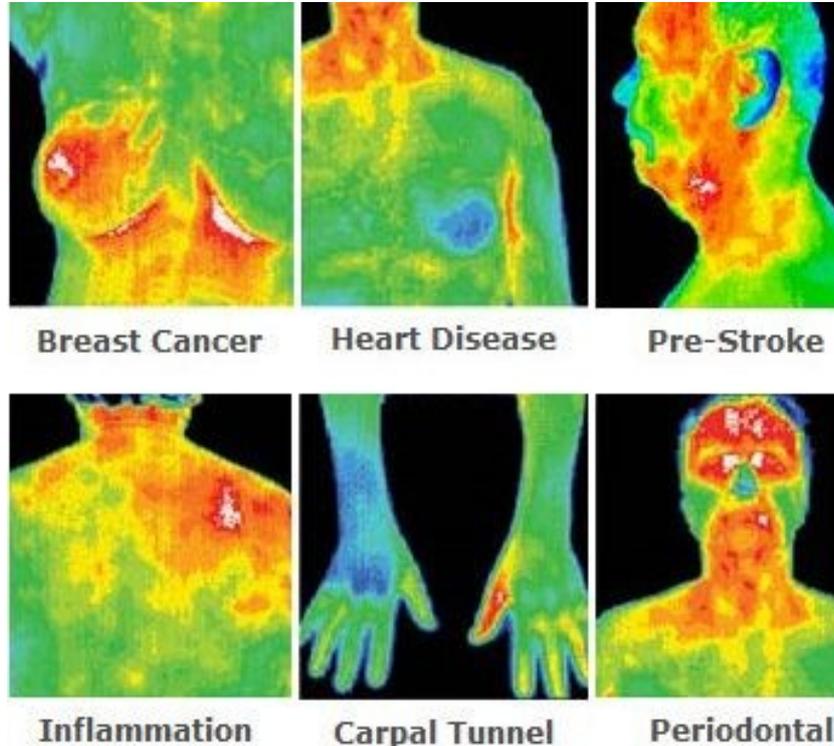
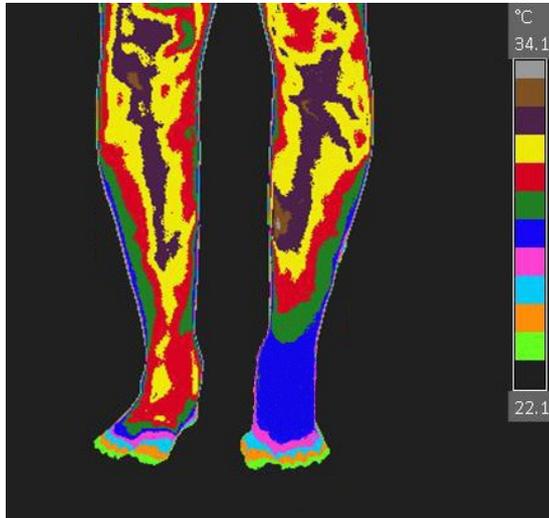


Punie par Héra d'avoir aidé Zeus à la tromper en bavardant pour l'occuper, elle fut condamnée à seulement pouvoir répéter les derniers mots qu'elle avait entendus. Tombée amoureuse de Narcisse mais rejetée car incapable de communiquer avec lui, elle mourut de chagrin.

Thermographie

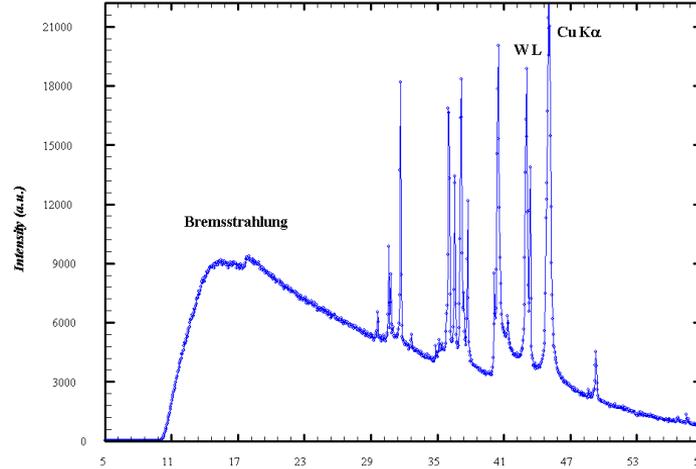
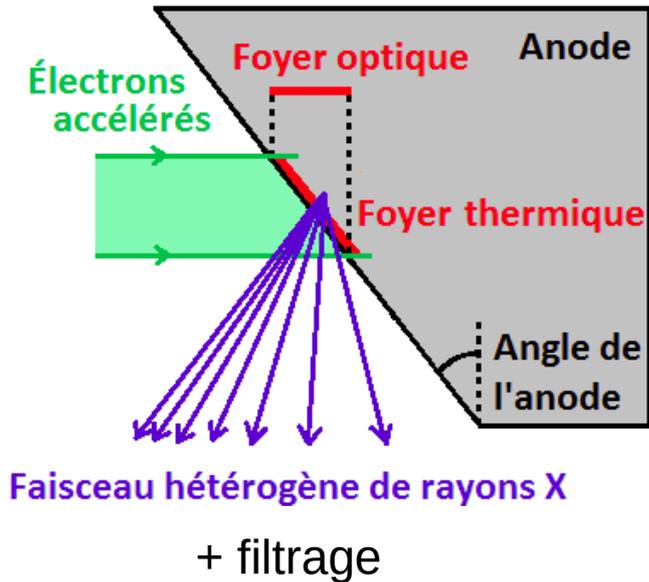
Mesure de la température au niveau de la peau par étude des ondes infrarouges émises

- Résultat d'un « test au froid »



La radiographie

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

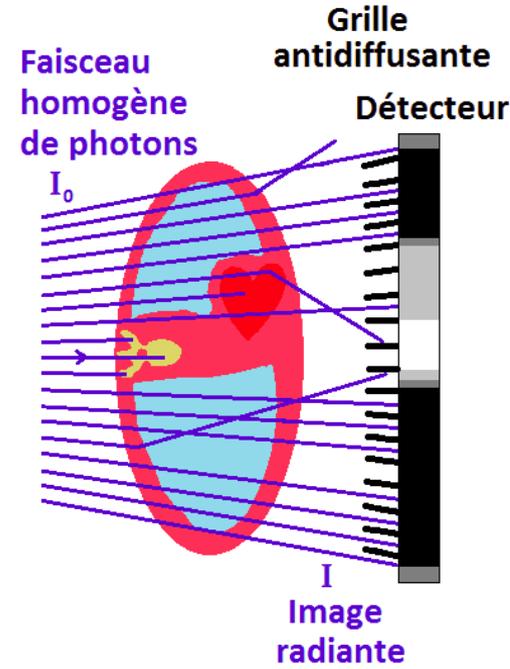


Spectre produit avec un tube à rayons X. Le **fond continu** correspond au **Bremsstrahlung** et les raies proviennent des **transitions électroniques** de l'anode.

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** :

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

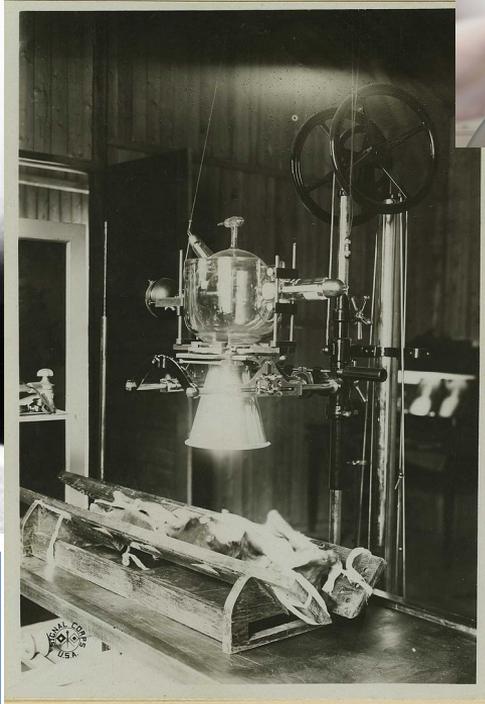
- Détection des rayons X transmis par un **film photographique**
 - La transmission dépend de l'énergie du faisceau



La radiographie Appareillage & images



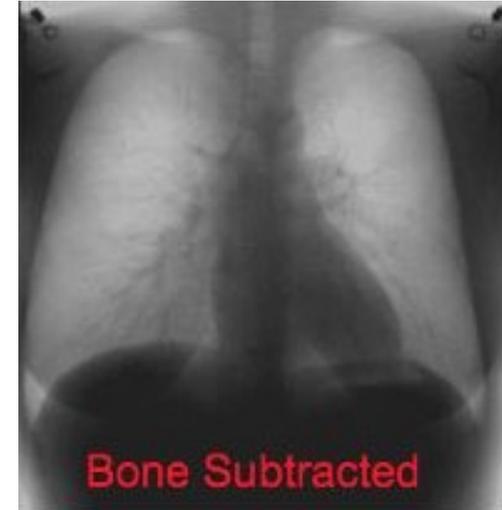
Première radiographie de l'histoire (1895) : main d'Anna Bertha Röntgen, femme de Wilhelm Röntgen



Radiographie vétérinaire (1918)



Radiographie numérisée dans un cabinet dentaire

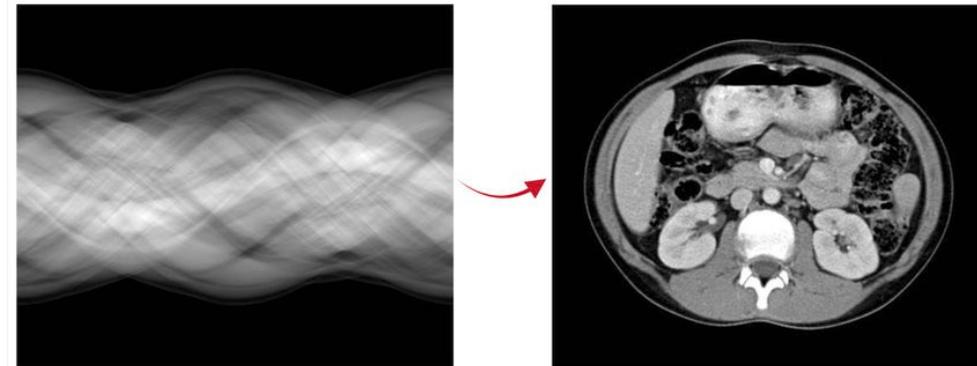
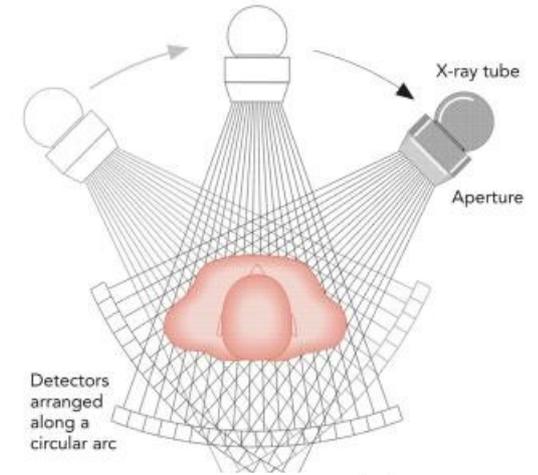


Radiographies avec « soustraction » des tissus / os (combinaisons linéaire de deux images à différents niveaux d'énergie, qui rendent les tissus mous / os invisibles).

La tomographie

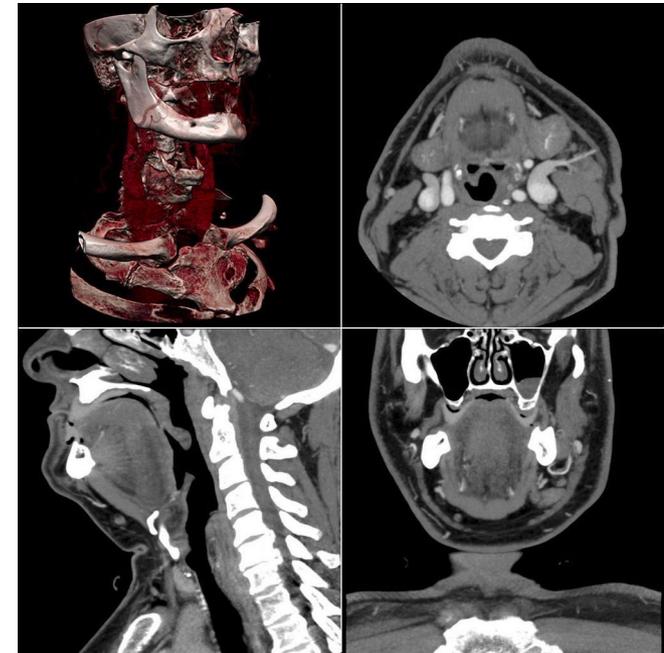
Technique d'imagerie permettant de reconstruire le **volume d'un objet à partir de mesures extérieures**

- 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



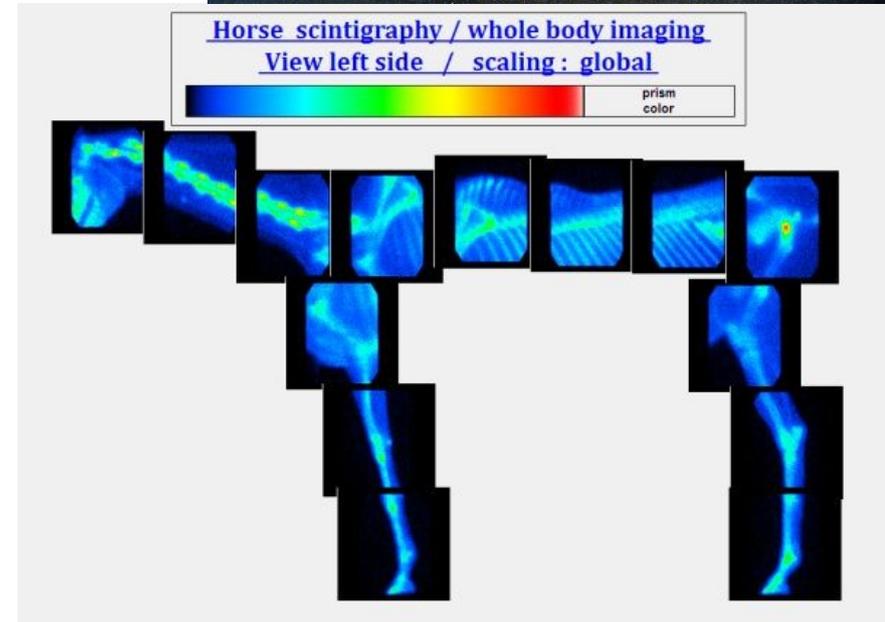
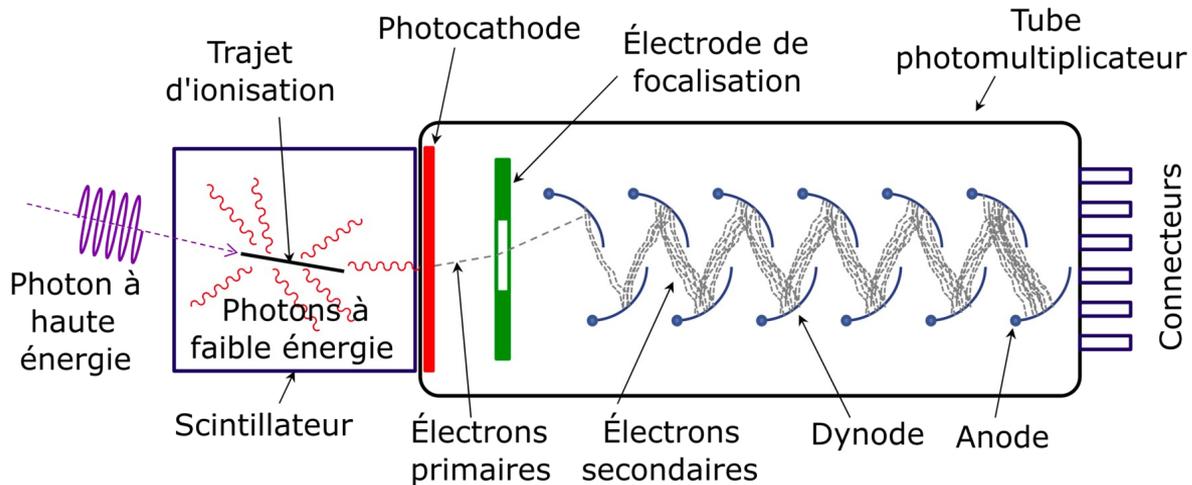
Le scanner

- 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 γ par des « **caméra à scintillation** » (**gamma-caméras**) puis traitement logiciel

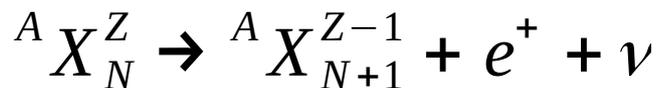


La tomographie par émission de positons

- Ou « PET scan » : image en 3D de l'activité métabolique d'un organe
- **Scintigraphie** : injection d'un **traceur radioactif** (^{18}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 β^+** :

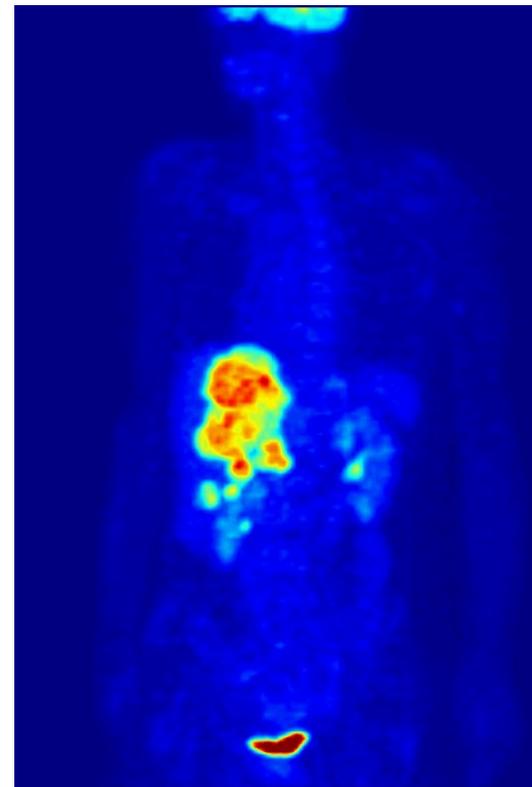
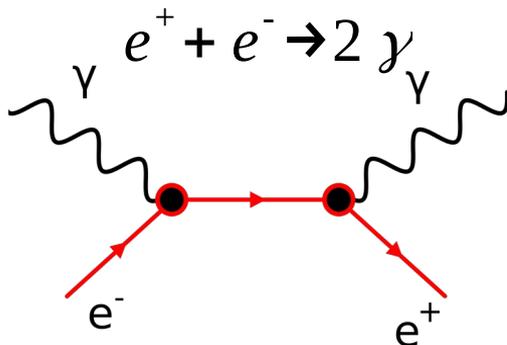
proton \rightarrow neutron + positon



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

\rightarrow émission de 2 photons

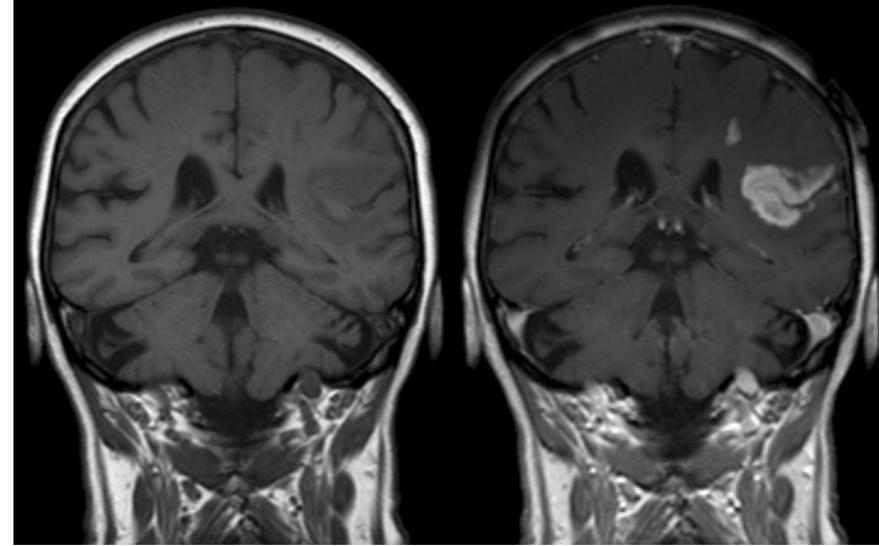
- $E = mc^2 = 511\text{ keV}$
- Émis à $\sim 180^\circ$ l'un de l'autre
- Détection de la coïncidence



Tomographie d'Émission MonoPhotonique : le traceur émet lui-même des photons γ

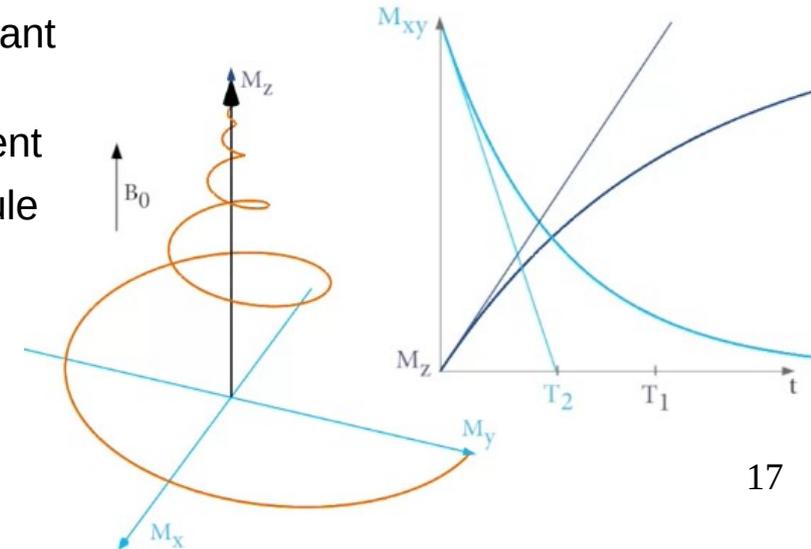
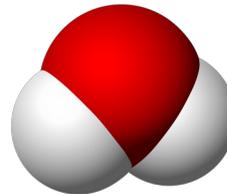
L'IRM

- 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



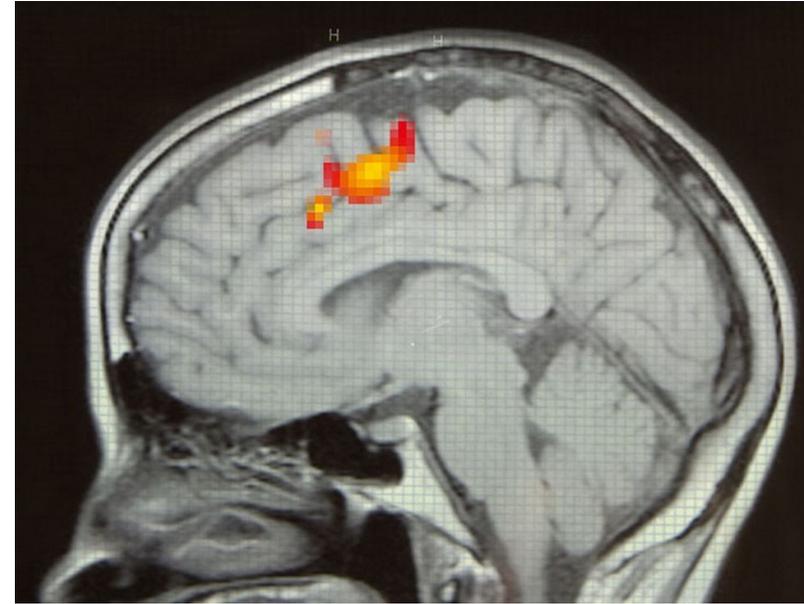
Un **produit de contraste** permet de réduire les temps de relaxation magnétique T1 et T2 et d'améliorer la résolution

- 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

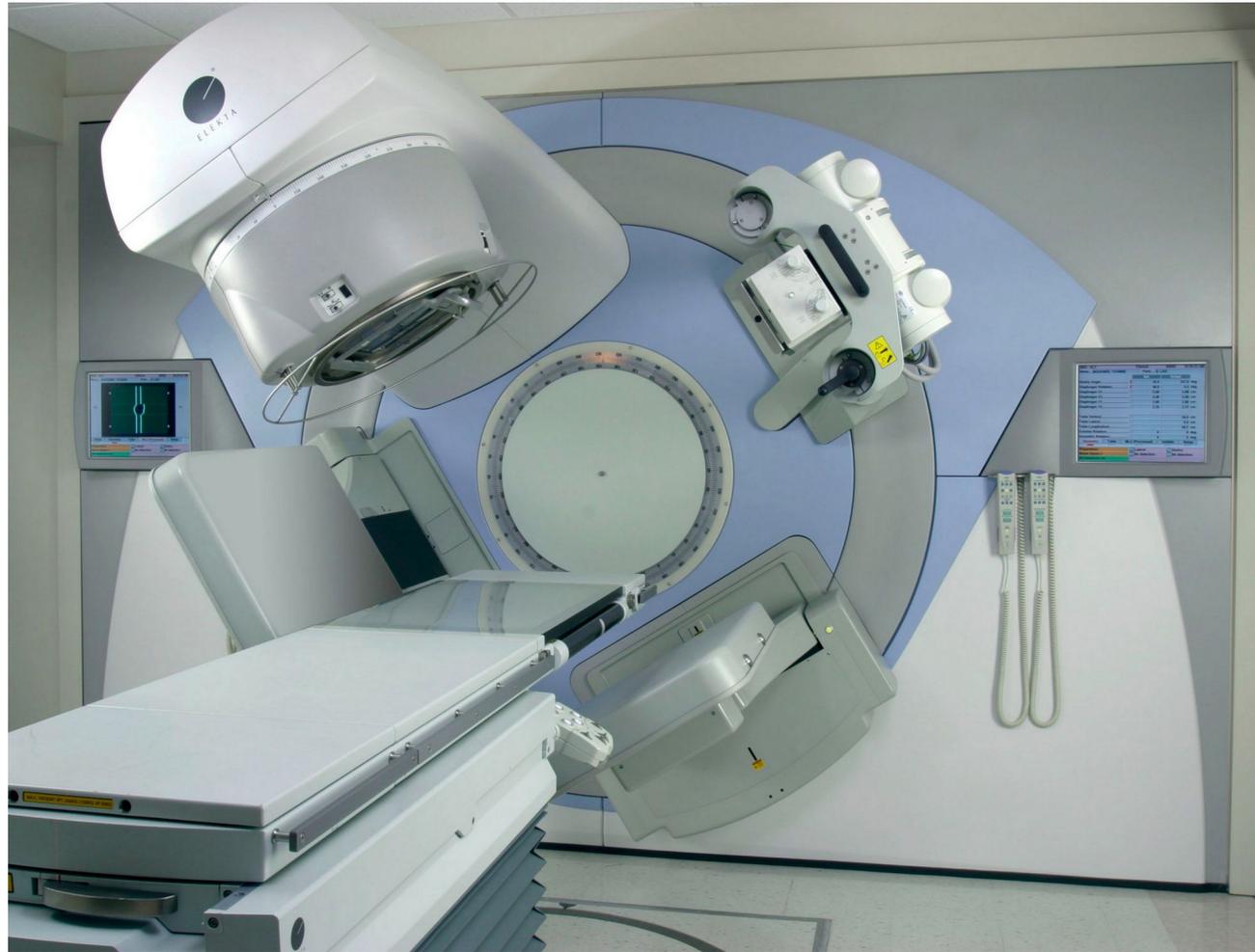


L'IRMf

- 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



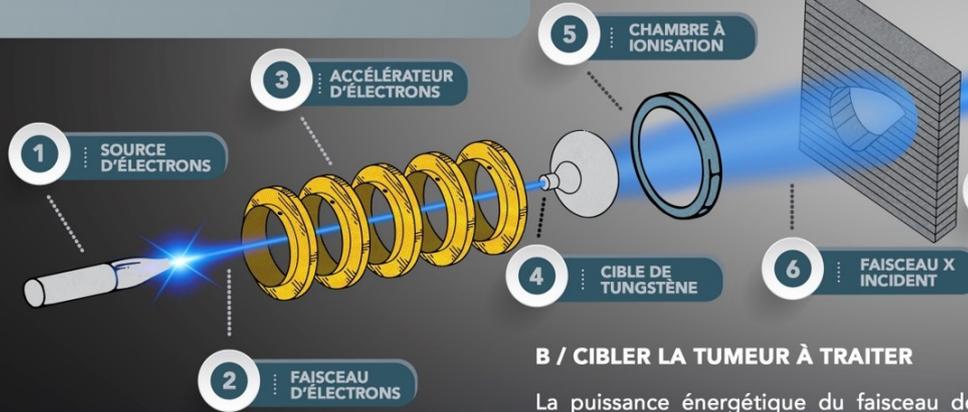
Appareil de radiothérapie (~ 2 M€)

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.

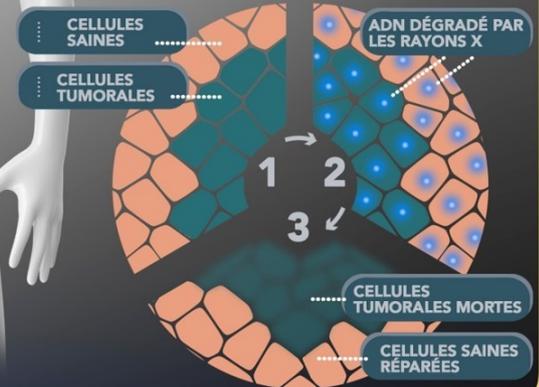


B / CIBLER LA TUMEUR À TRAITER

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 »

ARTWEB Not for clinical use **AQUILAB** by CMEYA

Open directory Open files

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

Sample 1
60 HU
65.76 Gy

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

Position: y = -42.0 mm

Sample 1
62 HU
3.13 Gy

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

Sample 1
-663 HU
26.95 Gy

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

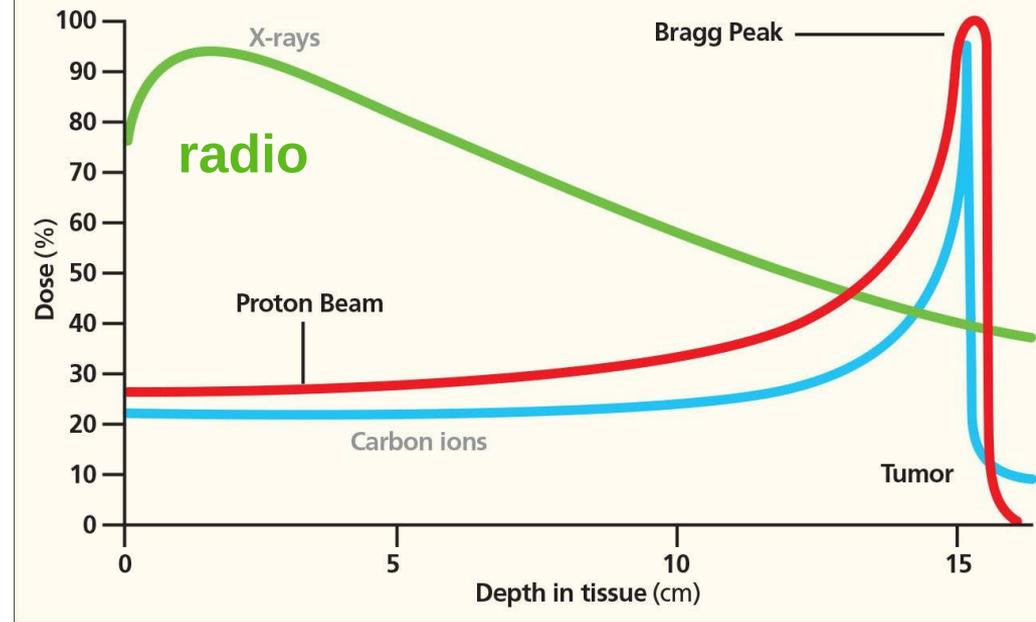
CT | HFS | AQUILAB | (2016-03-16) L.U.T.: Positive

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

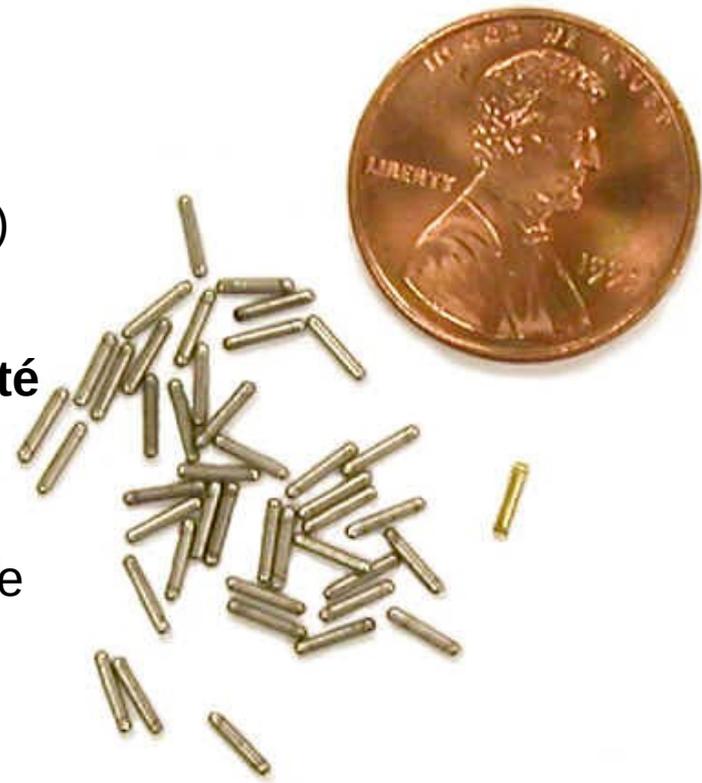
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{n z^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1-\beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$



- 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