

# Dosimétrie X et $\gamma$

## I/ Origine des rayons x

Découverts par hasard par Wilhelm Röntgen en 1895, les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques ionisants qui trouvent leur origine dans les différentes couches du cortège électronique des atomes.

Röntgen place différents objets de différentes densités entre l'anode et l'écran fluorescent, et en déduit que le rayonnement traverse la matière d'autant plus facilement que celle-ci est peu dense et peu épaisse. Lorsqu'il place des objets métalliques entre le tube et une plaque photographique, il parvient à visualiser l'ombre de l'objet sur le négatif.

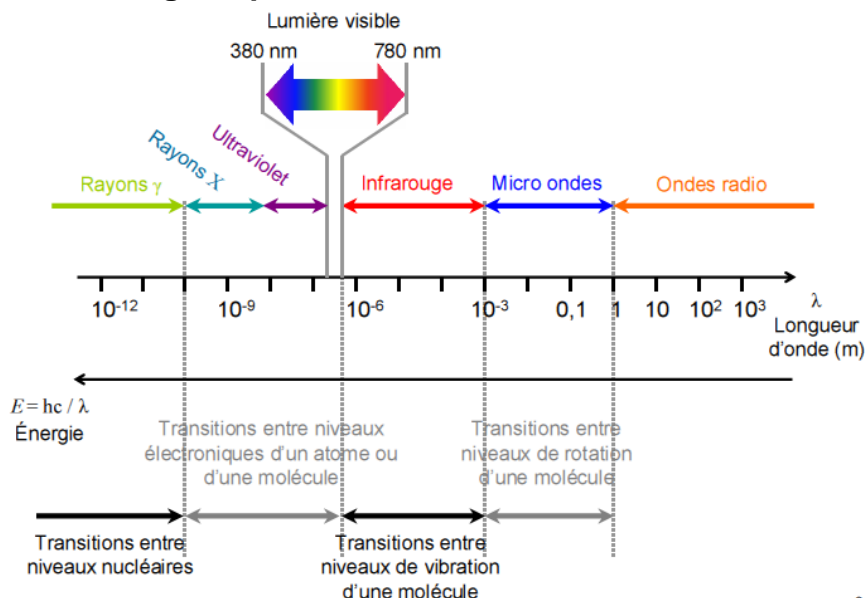
Röntgen en déduit que les rayons sont produits dans la direction des électrons du tube et que ce rayonnement est invisible et très pénétrant.

Comme il ne trouve pas de dénomination adéquate, Röntgen les nomme « Rayons X »

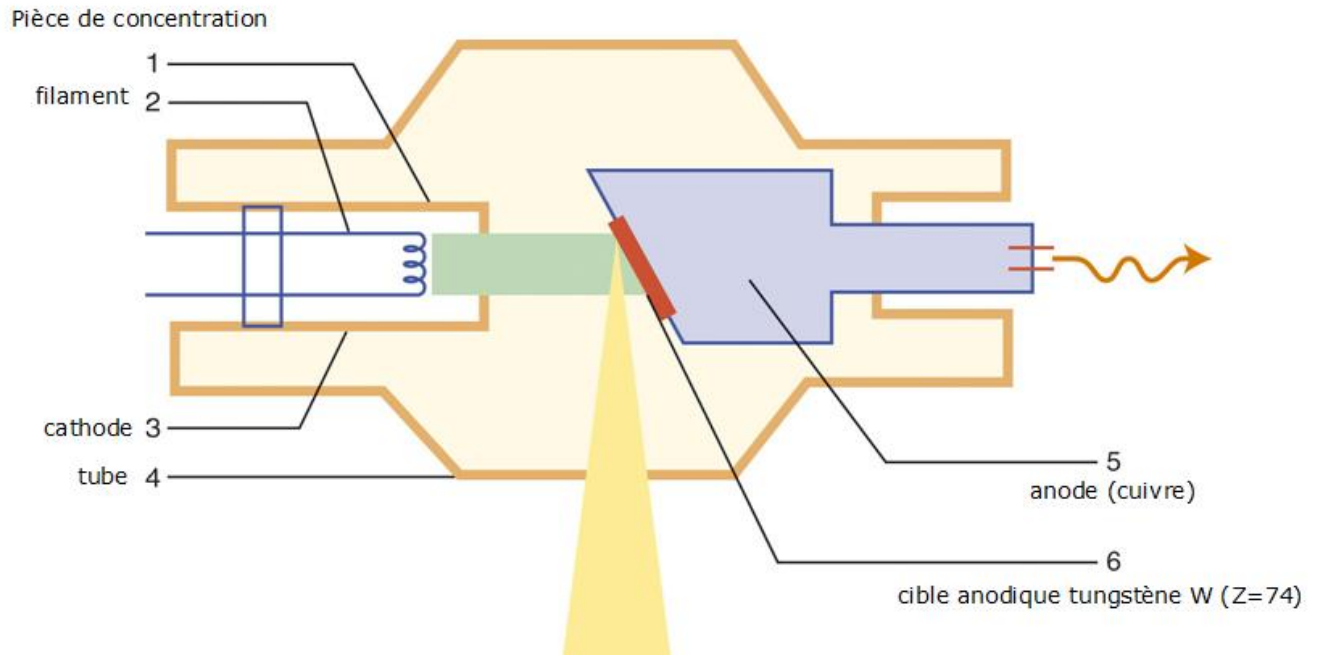


Le premier cliché est celui de la main d'Anna Bertha Röntgen (22 décembre 1895, pose de 20 min.) ; il s'agit de la première radiographie.

## I.1/ Spectre électromagnétique



Les rayons X sont produits lorsque des électrons accélérés à grande vitesse sont freinés dans un objet matériel (anode= anticathode).



Tube radiogène à anode fixe. La différence de potentiel créée entre la cathode (filament + pièce de concentration) et l'anode accélère les électrons produits par effet thermo-ionique en chauffant le filament. Le faisceau électronique ainsi produit (coloré en vert) est freiné dans une cible de tungstène (colorée en rouge) sertie dans un bloc de cuivre (coloré en gris), qui permet d'évacuer la chaleur par conduction.

### **Tube à rayons X (principe) :**

Les tubes radiogènes sont des convertisseurs d'énergie qui consomment de l'énergie électrique pour produire des radiations électromagnétiques de longueurs d'onde (et d'énergie) variées. Les plus énergétiques des rayonnements produits (rayons X) ne représentent que 1 % de l'énergie électrique consommée ; les 99 % restants sont des radiations de grande longueur, en quasi-totalité du rayonnement infrarouge, c'est-à-dire de la chaleur. Les rayons X sont produits par conversion d'énergie quand un faisceau d'électrons accélérés à grande vitesse dans un champ électrique est soudainement décéléré dans la cible inclinée, constituée de métal lourd (de numéro atomique Z élevé), d'un tube à rayons X.

Le tube à rayons X classique est constitué d'une enveloppe de verre Pyrex® à l'intérieur de laquelle est créé un vide le plus complet possible. Le tube contient deux électrodes (ce qui lui confère les propriétés d'une diode). Ces électrodes sont disposées de telle sorte que les électrons produits à la cathode (pôle négatif ou filament) peuvent être accélérés par une très haute différence de potentiel vers l'anode (électrode positive ou cible)

## I.2 Interactions des rayonnements avec la matière

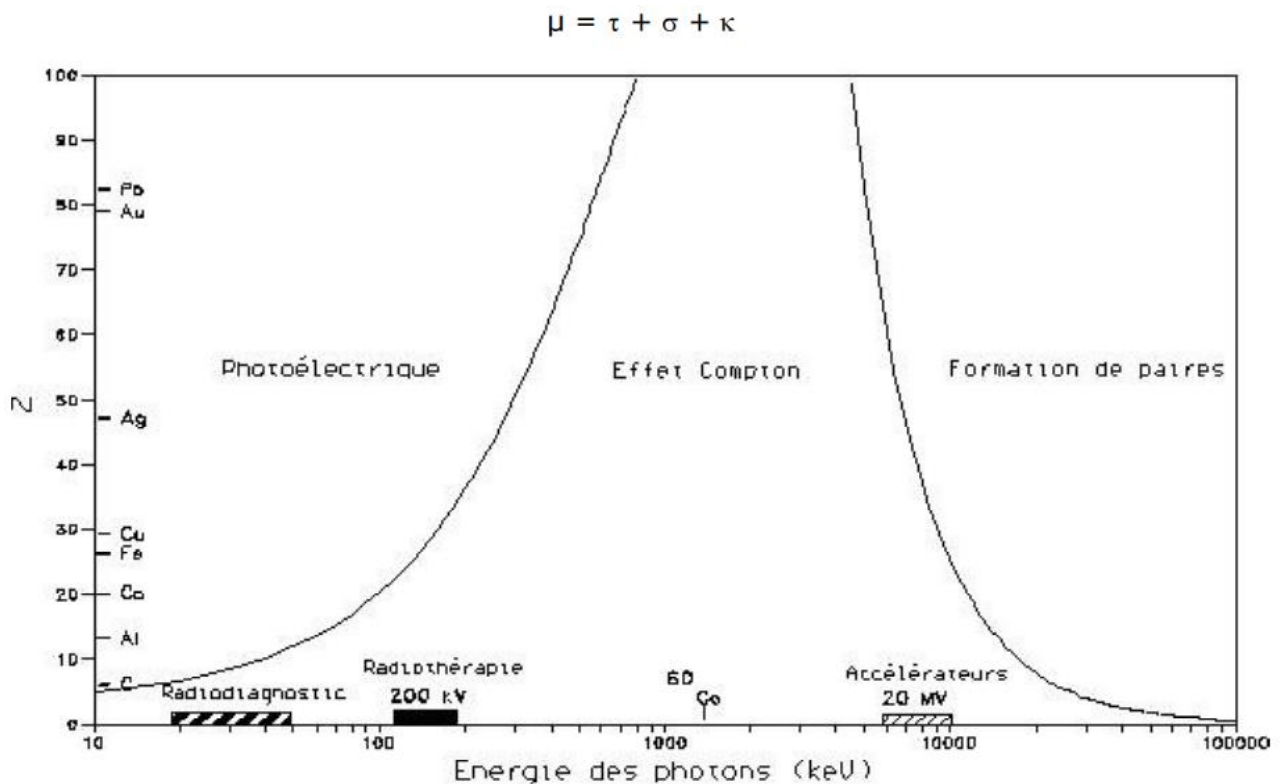
La loi d'atténuation d'un rayonnement électromagnétique est du type exponentiel dont la forme générale est :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

- $I_0$  = intensité du rayonnement incident
- $I$  = intensité du rayonnement à la sortie du blindage
- $\mu$  = coefficient d'atténuation
- $x$  = épaisseur d'absorbant

Le coefficient d'atténuation  $\mu$  se subdivise en coefficients partiels qui correspondent aux différents modes d'interaction des rayonnements ionisants dans la matière :

- effet photoélectrique  $\rightarrow \tau$
- effet Compton  $\rightarrow \sigma$
- création de paires  $\rightarrow \kappa$



**L'effet photoélectrique** : le photon entre en collision avec un électron des couches internes de l'atome. L'énergie  $E$  du photon incident est transférée à l'électron qui est éjecté de sa couche. Une partie de cette énergie est utilisée pour "extraire" l'électron interne (énergie de liaison  $W$ ) ; l'excédent d'énergie se retrouve sous forme d'énergie cinétique  $E_{cin}$  de l'électron

éjecté. Par conséquent,  $E = W + E_{\text{cin}}$ . L'effet photoélectrique ne peut avoir lieu que si l'énergie du photon incident est supérieure à l'énergie de liaison de l'électron.

L'énergie cinétique du photo-électron est finalement transférée au milieu lors d'ionisations ultérieures. Le retour de l'atome à l'état fondamental s'accompagne d'une émission d'énergie sous forme d'un photon de fluorescence ou d'un électron Auger

**L'effet Compton** : le photon entre en collision avec un électron libre ou faiblement lié auquel il cède une partie de son énergie. Un photon d'énergie plus faible est diffusé dans une direction différente de la direction initiale

## II/ Origine des rayons gamma

Rayon gamma est le nom donné au rayonnement électromagnétique produit par la désexcitation d'un noyau atomique résultant d'une désintégration. Ce processus d'émission est appelé radioactivité gamma.

Les rayons gamma sont plus pénétrants que les rayonnements alpha et les bêta, mais sont moins ionisants. Ils sont de même nature que les rayons X mais sont d'origine différente. Les rayons gamma sont produits par des transitions nucléaires tandis que les rayons X sont produits par des transitions électroniques provoquées en général par la collision d'un électron avec un atome, à haute vitesse.

## III/ Dosimétrie :

Il faut distinguer entre les faisceaux de photons et les particules chargées :

- **Faisceaux de photons** : obéissent à la loi d'atténuation
- **Particules chargées** : déposent la totalité de leur énergie en parcourant la matière

### 1/ faisceaux de photons (X ou gamma)

- Énergie **émise** par la source et **transportée** par le faisceau

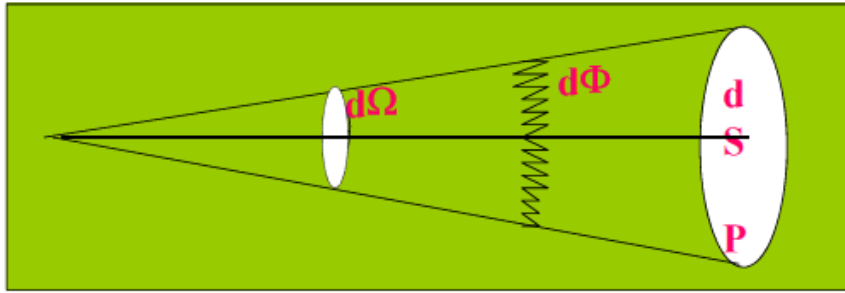


- Énergie reçue et **transférée** au milieu (par interactions) ou KERMA



- Énergie **absorbée** par le milieu = dose reçue (qui conditionne les effets biologiques)

## Caracteristiques d'un faisceau de photons(considéré dans le vide)



Considéré du point de vue de la source :

Tant que ce faisceau de photons evolue dans le vide : l'énergie transportée = l'énergie emise

Si l'on se place au niveau d'un point source on va definir :

- **L'intensité énergétique** émise dans une direction  $u$  : (flux d'énergie  $d\phi$  dans un angle solide  $d\Omega$  en watts par steradian).

$$I(\hat{u}) = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

- **Le flux énergétique** total émis par la source (watts)

$$\Phi = \int_x I(\hat{u}) d\Omega$$

- **L'énergie totale émise (en joules)**

et si on ne considere pas la source , mais un point dans l'espace, on va definir :

$$\Sigma = \int_0^U \Phi(t) dt$$

- **L'éclairement énergétique** en un point P : rapport du flux d'énergie  $d\phi$  qui traverse une surface élémentaire  $dS$ , à l'aire  $dS$  (en watts par  $m^2$ )

$$E(P) = \frac{d\Phi}{dS}$$

- **La fluence énergétique** au niveau  $u$  au point P (joules/ $m^2$ )

$$F(P) = \int_0^U E(P) dt$$

#### IV / KERMA et dose absorbée :

Loi d'atténuation :  $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$

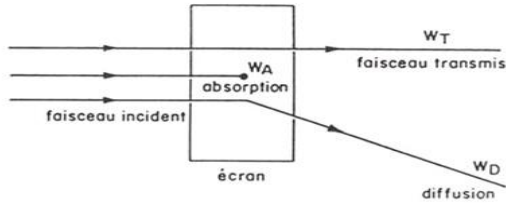


Figure 14-7 Atténuation d'un faisceau de photons

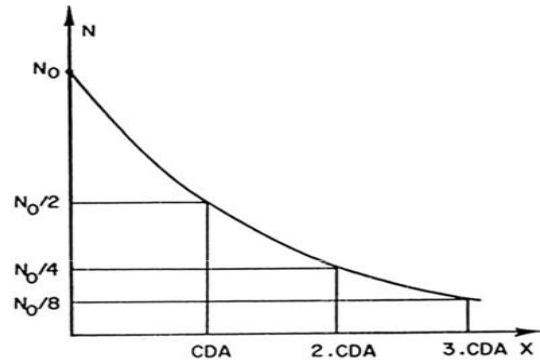


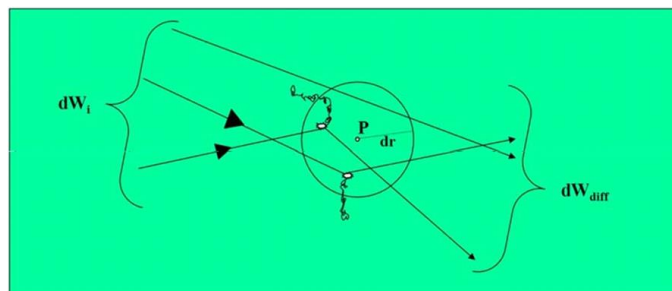
Figure 14-8 Variations du nombre de photons qui traversent un écran sans interaction en fonction de l'épaisseur  $x$  de l'écran  
Le nombre de photons transmis décroît de manière exponentielle mais ne s'annule pas.

En traversant une certaine épaisseur de la matière, le flux des photons diminue en fonction de l'épaisseur traversée avec un coefficient d'atténuation appelé  $\mu$  qui correspond à la probabilité d'interaction des photons dans le milieu considéré. Cette loi d'atténuation exponentielle décroissante aboutit au fait que chaque fois le faisceau parcourt la **CDA (coche de demi atténuation)** perd la moitié de nombre de photons de départ

#### KERMA (Kinetic Energy Released per unit Mass) énergie transférée

Le KERMA correspond aux transferts d'énergie qui se produisent au sein de la sphère centrée sur P, quel que soit le devenir des particules mises en mouvement lors de ces transferts

C'est l'énergie perdue par le faisceau et transférée à la matière.



représente une énergie par unité de masse

• KERMA  $K = \frac{dW_k}{dm}$  avec  $dW_k = dW_i - dW_{diff} = dE_{tr}$

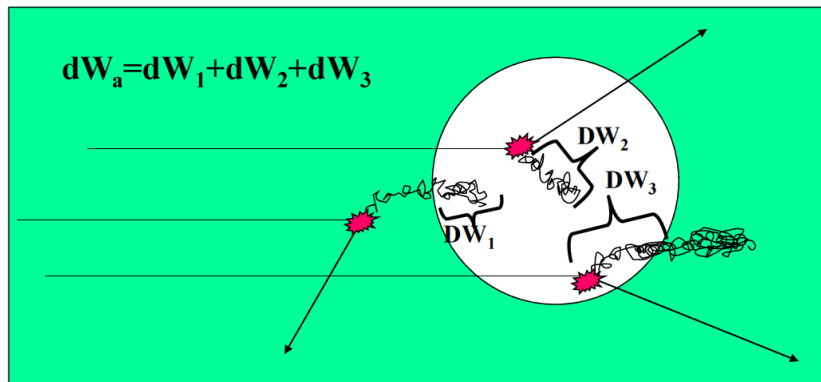
unité : joule par kilogramme ou gray (1 Gy = 1 J.kg<sup>-1</sup>)

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} = \frac{dE_i \cdot \mu_{tr} \cdot dx}{\rho \cdot dS \cdot dx} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} \times \frac{dE_i}{dS} = \left[ \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right] F$$

(F = fluence énergétique du faisceau)

## Dose absorbée

La dose absorbée correspond à l'énergie déposée dans la sphère élémentaire centrée sur P, quel que soit le lieu du transfert d'énergie initial.



La dose absorbée mesure donc la densité massique d'énergie déposée par irradiation.

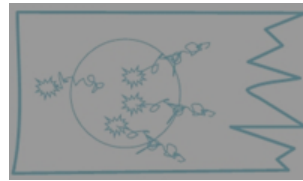
Elle se distingue du kerma qui est défini comme l'énergie transférée dans un élément de masse  $dm$ . En effet, lorsqu'une particule incidente interagit dans le milieu elle transfère une quantité d'énergie à une ou plusieurs particules secondaires (des électrons). Ces dernières vont alors parcourir une certaine distance dans le milieu en déposant leur énergie de façon continue (sous la forme d'une multitude d'interactions élastiques ou inélastiques). Ce parcours peut être plus grand que la dimension de l'élément de volume. Ainsi une partie seulement de l'énergie transférée (énergie donnée par la particule incidente) sera vraiment déposée dans  $dm$ . A l'entrée du milieu le kerma est généralement plus grand que la dose.

- Dose absorbée  $D = \frac{dW_a}{dm}$
- représente une **énergie par unité de masse** (++++) unité :  
**joule par kilogramme** ou **gray** (1 Gy = 1 J.kg<sup>-1</sup>)
- $D = \left[ \frac{\mu_a}{\rho} \right] F$

## Relation entre le Kerma et la dose absorbée

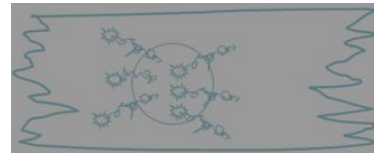
### Situation 01 :

Energie transferee > Energie absorbée



### Situation 02 :

Energie transferee = Energie absorbée  
**Equilibre electronique**



### Situation 03 :

Energie transferee < Energie absorbée



## KERMA et dose dans des milieux différents

*Dans un milieu A :*  $K_A = \left( \frac{\mu_{trA}}{\rho_A} \right) F$

*Dans un milieu B :*  $K_B = \left( \frac{\mu_{trB}}{\rho_B} \right) F$

$$\Rightarrow \frac{K_A}{K_B} = \frac{\left( \frac{\mu_{trA}}{\rho_A} \right)}{\left( \frac{\mu_{trB}}{\rho_B} \right)}$$

De la meme facon et lors de l'equilibre electronique

$$\Rightarrow \frac{D_A}{D_B} = \frac{\left( \frac{\mu_{aA}}{\rho_A} \right)}{\left( \frac{\mu_{aB}}{\rho_B} \right)}$$

On peut donc calculer le KERMA (ou la DOSE) dans un milieu donné, connaissant pour le même faisceau de photons le KERMA (ou la DOSE) dans un milieu de référence qui en pratique est l'air.

$$D = D_{air} \frac{\left( \frac{\mu_a}{\rho} \right)}{\left( \frac{\mu_{a(air)}}{\rho_{air}} \right)}$$



- Pour les tissus biologiques, ce rapport est voisin de 1 pour les photons entre 100 keV et 10MeV
- Pour les photons < 50keV
  - la dose est plus élevée dans l'os (Z=20 pour le calcium) que dans l'air
  - la dose dans la graisse est moins élevée que dans l'air

## Dose reçue (en Gy)

### Débit de dose

La rapidité avec laquelle une dose de rayonnement est administrée est cruciale pour expliquer les effets biologiques qui en résultent. Cette rapidité est exprimée par le débit de dose en Gy.s<sup>-1</sup> ou en Gy.h<sup>-1</sup>

$$\dot{d} = \frac{dD}{dt}$$

### Dose équivalente

C'est la dose pondérée par un facteur tenant compte du type de rayonnement (facteur de pondération lié au rayonnement)

« il vaut mieux recevoir sur la tête 1 kg de plumes que 1 kg de plomb... »

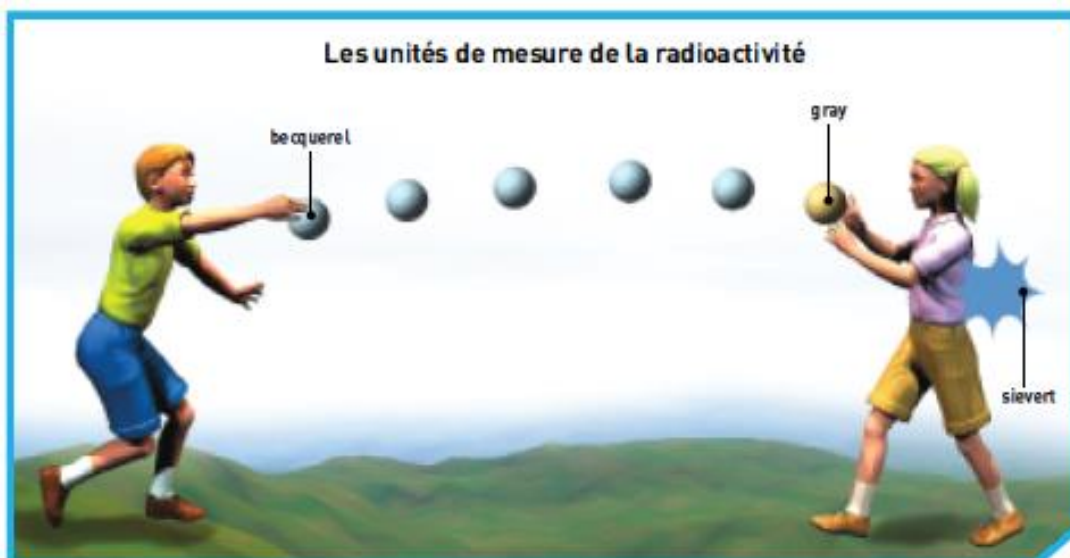
Il faut tenir compte du pouvoir d'ionisation du rayonnement, et pour cela on pondère la dose en Gy par un facteur de pondération lié au rayonnement, W<sub>r</sub>, qui relativise la gravité, pour une même dose, des dégâts dans les tissus vivants

### La dose équivalente est notée

$$H \text{ (Sv)} = D \text{ (Gy)} \cdot W_r$$

### Le sievert (Sv)

Les effets biologiques des rayonnements sur un organisme exposé (selon sa nature et les organes exposés) se mesurent en sievert et s'expriment également en "équivalent de dose". L'unité la plus courante est le millisievert, ou millième de sievert.



Cette image permet de symboliser la relation entre les trois unités de mesure de la radioactivité : un enfant lance des objets en direction d'un camarade. Le nombre d'objets envoyés peut se comparer au becquerel (nombre de désintégrations par seconde) ; le nombre d'objets reçu par le camarade, au gray (dose absorbée) ; les marques laissées sur son corps selon la nature des objets, lourds ou légers, au sievert (effet produit).

**Tableau - Principales grandeurs et unités utilisées en radioprotection.**

<b>Grandeur</b>	<b>Unités</b>	<b>Définitions</b>
Activité	Becquerel (Bq)	Nombre de désintégrations par seconde
Dose absorbée	1 gray (Gy) = 1 joule par kilo	Energie communiquée à la matière par unité de masse
Equivalent de dose (H)	Sievert (Sv)	Effet biologique sur les tissus irradiés
Débit de dose absorbée	Gray par seconde (Gy/s)	Energie reçue par la matière irradiée par unité de masse et unité de temps