

# Chapitre III : Dosimétrie

*Cours Radiobiologie Radioprotection*



Dr. Lezzar

# Table des matières



<b>Introduction</b>	3
<b>I - Grandeurs physique</b>	4
1. Grandeurs particulières .....	4
2. Grandeur énergétique .....	4
<b>II - La dose transférée (Le KERMA)</b>	6
<b>III - Dose absorbée, dose intégrale</b>	8
<b>IV - L'équilibre électronique (relation KERMA et dose absorbée)</b>	10
<b>V - Efficacité biologique relatif (EBR)</b>	11
<b>VI - Exposition-Mesure du KERMA</b>	12
<b>VII - Débit de dose, débit d'exposition</b>	13
<b>VIII - Débit de d'exposition et exposition en fonction de la distance , temps et source</b>	14
<b>IX - Transfert d'énergie dans le cas des particules chargées</b>	15
1. Source externe .....	15
2. Source interne .....	15
<b>X - Dose équivalente</b>	17

# Introduction

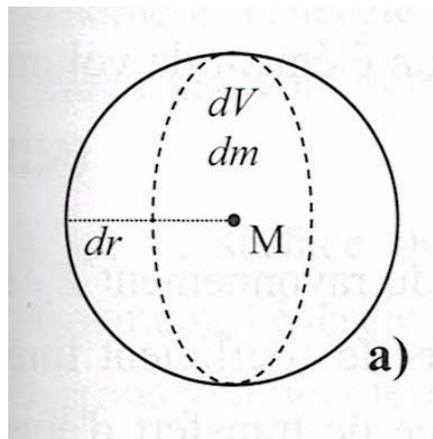
Les effets biologiques des rayonnements (radiobiologie) sont le résultat de l'absorption de l'énergie par les tissus irradiés suite aux différentes interactions que nous avons vues. Pour mieux comprendre ces effets et en prévenir une éventuelle nocivité (radioprotection), il est nécessaire de les quantifier (dosimétrie).

Le but de la dosimétrie est d'étudier la quantité de rayonnement absorbée par la matière dans le but d'évaluer son effet sur les tissus sains et les tissus malades en radiothérapie, l'effet des rayons X utilisés en radio-diagnostic.

Jusqu'à présent nous avons vu l'interaction d'une seule particule avec la matière, c'est-à-dire d'un point de vue microscopique. En dosimétrie nous allons nous placer d'un point de vue macroscopique, c'est-à-dire considérer un ensemble de particules entrant en interaction avec la matière. Il faut donc considérer l'énergie émise par la source et transportée par le faisceau, l'énergie transférée au milieu et enfin l'énergie absorbée par le milieu.

Considérons un photon X ou  $\gamma$  traversant la matière. Lors d'une interaction, un électron va être expulsé avec une certaine énergie cinétique qu'il va ensuite céder par collision (excitation, ionisation secondaire) avec les atomes de la matière.

Cette énergie va donc être absorbée par la matière. Pour illustrer les transferts d'énergie à la matière, considérons un élément de volume sphérique de rayon  $dr$  centré sur un point M. Cet élément décrit alors une surface  $ds$ , un volume  $dV$  et une masse  $dm$ .





🔑 *Définition : Flux énergétique*

---

C'est l'énergie totale du faisceau par unité de temps

$$\varphi_R (\text{J/s} = \text{W} \text{ ou } \text{MeV/s}) = E_R/t = E^*(N/t) = E^*\varphi_P = E^*A_0 \text{ ou } A_0 \text{ est l'activité initiale}$$

🔑 *Définition : Fluence énergétique*

---

C'est l'énergie totale par unité de surface

$$F_R (\text{J/m}) = E_R/S = E^*(N/S) = E^*F_P$$

🔑 *Définition : Débit de fluence énergétique*

---

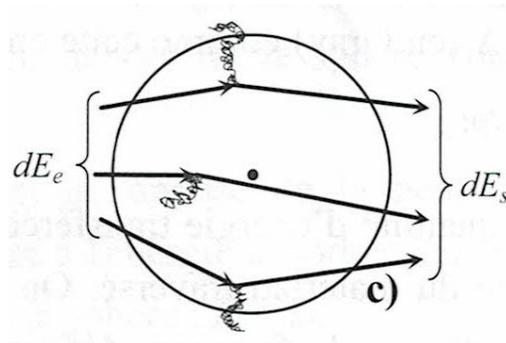
C'est l'énergie totale par unité de temps et de surface

$$\Psi = E_R/(S*t) = \varphi_R/S = F_R/t = E^*N/(S*t) = E^*\Phi$$

# La dose transférée (Le KERMA)

## II

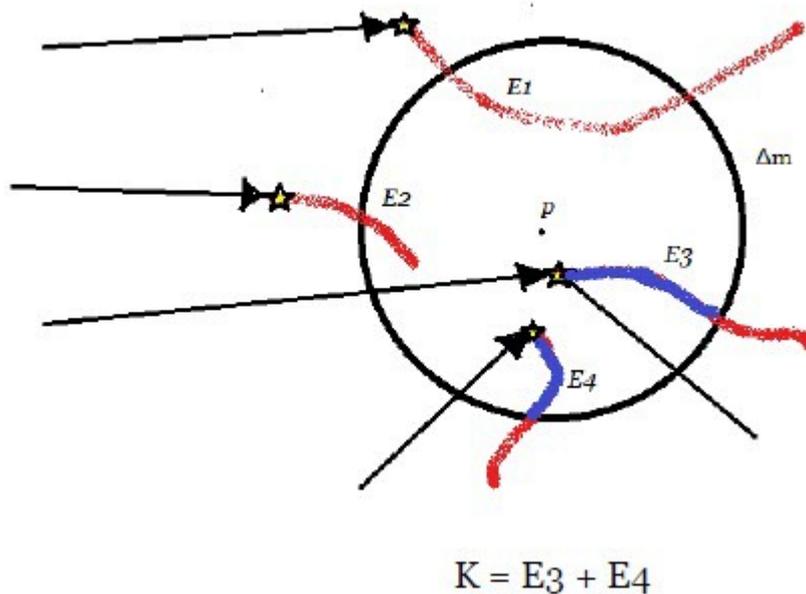
Le KERMA (énergie cinétique déposée par unité de masse) correspondant aux transferts d'énergie se produisant dans la sphère centrée sur M, quel que soit le devenir de la particule mise en mouvement lors des collisions



Au cours de l'irradiation, des photons entrent dans la sphère avec une énergie  $E_e$  et d'autres en sortent, après avoir eu ou non des interactions, avec une énergie  $E_s$ .

L'énergie transférée dans la sphère est alors  $E_k = E_e - E_s$ .

On définit le KERMA en Gray comme cette énergie transférée dans un élément de volume de masse  $m$  :  $K = E_k / m$



 **Remarque**

La quantité d'énergie transférée dépend de l'énergie du rayonnement  $E_R$  et de la nature du matériau traversé. On peut, par analogie avec le coefficient linéique d'atténuation  $\mu$  du faisceau, définir un coefficient linéique de transfert d'énergie noté  $\mu_{tr}$  tel que :

$$K = F_R * (\mu_{tr} / \rho) \text{ avec } F_R = E_R / S \text{ c'est la fluence énergétique du faisceau.}$$

 **Complément**

Pour deux milieu différents irradiés par le même rayonnement, on aura alors :  $K_2 / K_1 = (\mu_2 / \rho_2) / (\mu_1 / \rho_1)$

 **Attention**

Le KERMA n'est pas une quantité mesurable mais est calculé par rapport à un milieu de référence l'air.

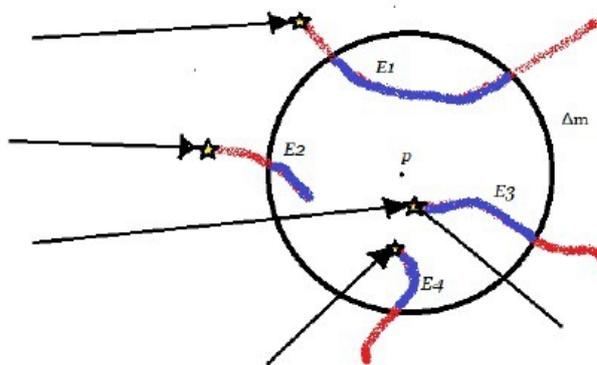
# Dose absorbée, dose intégrale

## III

Soit  $dE_a$  l'énergie cédée par les électrons qui ont interagit avec les atomes de la matière dans la sphère élémentaire, et ce, quel que soit l'origine du transfert d'énergie initial ( dans ou en dehors de la sphère)

La dose absorbée  $D$  présente le rapport de l'énergie cédée dans cet élément de volume de masse  $m$  :

$$D (j/kg) = E_a/m = F_R * (\mu_a/\rho) \text{ avec } j/kg = \text{Gray (Gy)}$$

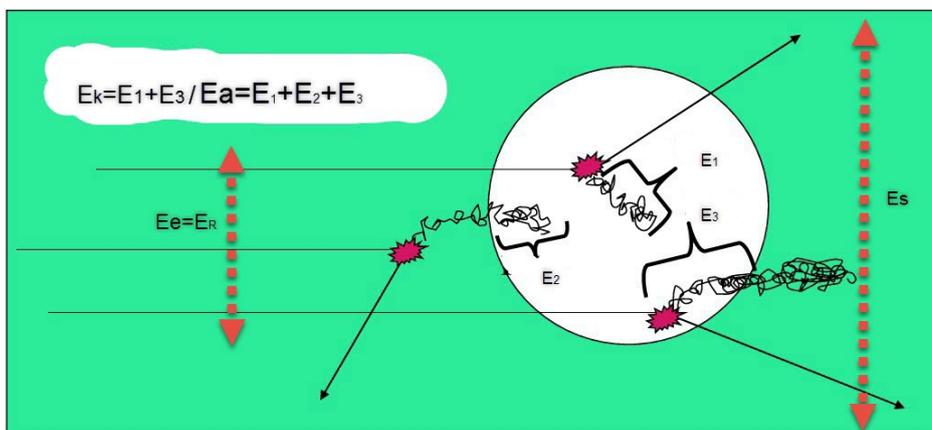


$$D = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

La dose intégrale (DI) est définie comme l'énergie totale absorbé par la cible. En supposant que la dose a été absorbé de manière uniforme dans le volume totale  $V$  , on a :  $DI = D * V$

### Complément

La dose absorbée mesure donc la densité massique d'énergie déposée par irradiation (Grandeur mesurable). Elle se distingue du KERMA qui est défini comme l'énergie transférée dans un élément de masse

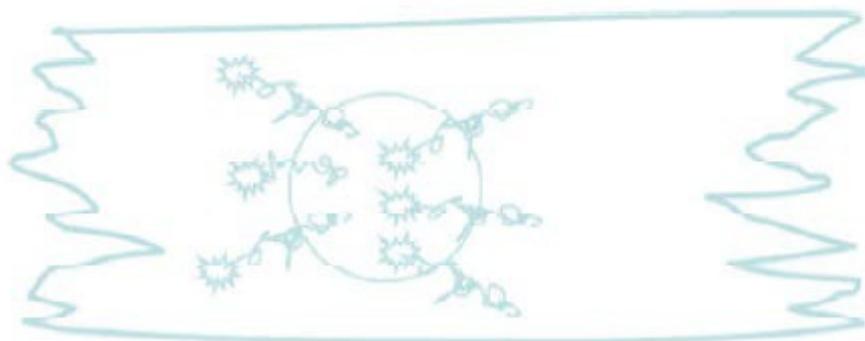




# L'équilibre électronique (relation KERMA et dose absorbée)

## IV

Dans un milieu homogène, pour une fluence de rayonnement uniforme, et lorsque l'élément de volume se situe loin des faces d'entrée et de sortie du rayonnement du faisceau de photons est faible, et lorsque la masse du matériau est supérieure à la masse de l'élément de volume, on atteint un régime particulier appelé équilibre électronique : il y a compensation entre l'énergie transférée dans la sphère et absorbé en dehors, et l'énergie transférées dehors et absorbé dedans, c'est à dire que les électron secondaire sortants sont compensés par des électrons secondaire entrants. On a alors égalité stricte entre KERMA et dose absorbée. Ceci permet donc d'écrire :  $D = K$  et  $\mu_{tr} = \mu_a$



### Remarque

- A la surface du matériau se trouvant à l'endroit de pénétration du rayonnement, l'énergie transférée est supérieur à l'énergie absorbée car la plupart des électrons vont terminer leur parcours en dehors de la sphère considérée ( $K > D$ ).
- A la surface du matériau se trouvant à l'opposé de la pénétration du rayonnement, l'énergie transférée est inférieur à l'énergie absorbée car davantage d'électrons viennent terminer leur course dans la sphère ( $K < D$ ).

# Efficacité biologique relatif (EBR)



Comme nous le verrons après dans l'effet biologique des rayonnement sur l'organisme dépendent étroitement de sa nature, de la dose et du débit. Pour un effet biologique donné, on peut qualifier l'efficacité de différents types de rayonnement par rapport à un rayonnement de référence d'effet connu.

A une dose  $D_0$  du rayonnement de référence correspond un effet quantifier. Pour obtenir le même effet avec un autre rayonnement noté R, il faudra une dose  $D_R$ . On définit alors l'efficacité biologique relative comme le rapport de la dose de référence sur la dose du rayonnement R :  $EBR = D_0/D_R$

## Remarque

---

EBR dépend de l'effet étudié et n'aura donc pas la même valeur pour deux rayonnement similaires suivant le but ou la gravité d'une irradiation

# Exposition-Mesure du KERMA

VI

## Fondamental : Exposition

L'énergie déposée dans le milieu par unité de masse correspond en réalité à un nombre d'ionisation créées. On appelle exposition  $X$  ce nombre d'ionisations créées dans la matière par unité de masse. Elle s'exprime en Coulomb par kilogramme (C/kg). Elle s'exprimait auparavant en Röntgen (R, quantité d'électricité égal à une unité électrostatique dans 1 cm<sup>3</sup> d'air) qui équivaut à : 1 Röntgen =  $1.6 \cdot 10^{12}$  paires d'ion créées =  $2.56 \cdot 10^{-4}$  C/kg.

## Méthode : Mesure du KERMA

Or, la création d'une paire d'ions requiert environ 34 eV dans l'air (soit  $5.44 \cdot 10^{-18}$  J), donc une exposition de 1 Röntgen correspond à un KERMA de :  $1.6 \cdot 10^{12} \cdot 5.44 \cdot 10^{-18} \cdot 10^3 = 8.75 \cdot 10^{-3}$  Gray.

Il existe une relation entre l'exposition et le KERMA :  $K(\text{Gy}) = X(\text{R}) \cdot f$ , ou  $f = 8.75 \cdot 10^{-3}$  Gy/R

(1 Gy = 1 J/kg)

## Remarque

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.  $D / D_{\text{air}} = K / K_{\text{air}} = (\mu / \rho) / (\mu / \rho)_{\text{air}}$ .

$K = K_{\text{ref}} \cdot (\mu / \rho) / (\mu / \rho)_{\text{ref}}$  ou  $K = X_{\text{ref}} \cdot f \cdot (\mu / \rho) / (\mu / \rho)_{\text{ref}}$

## Complément

En pratique le milieu de référence est l'air, et on sait que pour des photons ayant une énergie entre 100 keV et 10 MeV (effet compton prédominant), on a :  $(\mu / \rho)_{\text{tissu}} / (\mu / \rho)_{\text{air}} \approx 1.1$

## Exemple

Pour les photons ayant une énergie de 50 keV l'effet photoélectrique est prédominant et  $\mu / \rho$  est proportionnel à  $Z^3$ . La dose est alors très élevée dans l'os ( $Z=20$  pour le calcium) que dans l'air ( $Z=14.5$ ) et moins élevée dans la graisse ( $Z=12$  pour le carbone et  $Z=1$  pour l'hydrogène) que dans l'air.

# Débit de dose, débit d'exposition

VII

La rapidité avec laquelle une dose de rayonnement est administrée est cruciale pour expliquer les effets biologiques qui en résultent.

 *Définition : Débit de dose*

---

Le débit de dose absorbée  $J_a$  est la proportion de dose absorbée par unité de temps et donc exprimé en Gy/s ou Gy/h :  $J_a = D / t$

 *Définition : débit d'exposition*

---

Le débit d'exposition  $J_e$  est la proportion d'exposition par unité de temps, exprimé en R/s ou R/h :  $J_e = X / t$

# Débit de d'exposition et exposition en fonction de la distance , temps et source

VIII

## Remarque

Cette notion est utilisée pour caractériser les irradiations résultantes d'une source ponctuelle qui émet des rayonnements de manière divergente, donc pour laquelle J diminue avec la distance. Cela s'applique généralement bien à une source radioactive, émettrice de rayon  $\gamma$ , pour laquelle il faut considérer le débit d'exposition à une distance étalon. Par définition, le débit d'exposition nominal  $J_0$  est le débit d'exposition à 1 mètre de la source avec un écran interposé. Donc à une distance d et , on aura :  $J = J_0 * (d_0/d)^2 * (1/2^n) * (1/2^{n'})$ .

n le nombre de CDA, n' le nombre de périodes. avec  $d_0=1m$

ou en peut exprimé l'exposition X en fonction de la distance :  $X = X_0 * (d_0/d)^2 * (1/2^n) * (1/2^{n'})$ .

# Transfert d'énergie dans le cas des particules chargées

IX

A la différence des photons les particules chargées sont totalement arrêtées dans la matière au bout d'un trajet excédant pas quelques mm dans les tissu. Leur énergie est donc entièrement absorbée dans un volume réduit qu'il est primordial de le connaître en radiothérapie notamment.

dans le cas des émissions  $\beta^-$ , il existe une formule empirique qui permet de déterminer le débit de dose absorbée :

$J_a = 21.31 E_\beta^* C(t)$ . ou  $E_\beta$  est l'énergie moyenne des particules  $\beta^-$  en (eV) et  $C(t)$  la concentration en radionucléide à un temps  $t$ .

Par ailleurs, on distingue deux types d'irradiation par des particules chargées : l'irradiation par une source externe (faisceaux de particule généré par des accélérateurs), et l'irradiation par une source interne (particules émises par un isotope radioactif injecté dans l'organisme), qui sont très différentes.

## 1. Source externe

En radiothérapie, l'utilisation de faisceaux d'électron est aujourd'hui courante. la dose absorbée dépend de l'énergie des particules et varie rapidement en fonction de la profondeur : ces technique sont donc employées pour traiter des tumeurs superficielles (de la peau ou situées au maximum quelques cm sous la peau) et présente l'avantage d'épargner les tissu sains plus profond étant donné le parcours limité des particules.

## 2. Source interne

Dans certains cas, la source de rayonnement est introduite dans l'organisme. La dose délivrée dépend de plusieurs paramètres, autant physiques que biologiques :

- Nature du radionucléide (type d'émetteur, spectre d'émission).
- Répartition dans l'organisme et voie d'élimination.
- Concentration précise dans les tissu concernés, ce qui est difficile car la distribution est généralement très hétérogène.
- Période effective  $T_e$  compte de la période  $T$  au sens physique ainsi que de la période biologique  $T_B$  (temps mis par le tissu concerné pour éliminer la moitié du radionucléide), liée eu métabolisme :  $1/T_e = 1/T + 1/T_B$

Le débit de dose n'est pas donc constant mais décroissant :

$$J(t) = J_0 * \exp(-\lambda t).$$

Enfin, lorsque le radionucléide utilisé est également émetteur  $\gamma$ , faut considérer l'irradiation qui y est associée.

# Dose équivalente



Tous les tissus ne sont pas sensibles de façon identique à un rayonnement donné, en effet, bien que l'énergie absorbée dans la matière soit une grandeur physique indépendante de la nature du rayonnement, les conséquences biologiques peuvent être différentes car elles dépendent à la fois de l'énergie du rayonnement mais aussi de la densité des ionisations.

« il vaut mieux recevoir sur la tête 1 kg de plumes que 1 kg de plomb... », donc c'est une grandeur rationnelle.

## Définition

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

## Attention

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,  $W_R$ , qui relativise la gravité, pour une même dose, des dégâts dans les tissus vivants.

La dose équivalente est notée

$$H(Sv) = D(Gy) * W_R$$

$W$  est un nombre sans dimension tenant compte du rayonnement

$D$  est la dose absorbée par le tissu.

$W_R = 1$  : RX /  $R\gamma$  /  $e$  ( $\beta^-$   $\beta^+$ ) : toutes énergies

–  $W_R = 5$  : protons ; neutrons < 10 keV

–  $W_R = 10$  : neutrons : 10-100 keV

–  $W_R = 20$  :  $\alpha$  , ou neutrons : 100KeV à 2 MeV

## Remarque

Les effets biologiques des rayonnements sur un organisme exposé se mesurent en sievert et s'expriment également en "équivalent de dose".

## Complément

Pour l'ensemble de l'organisme, on parlera de Dose efficace  $E$  :  $E = \Sigma(W*D)$