Bases physiques et biologiques de la radiothérapie

Bases physiques

L3 : UE cancérologie

Pr I. Peretti
Service de Biophysique et Médecine Nucléaire
CHU Lariboisière
Université Paris 7

1. Les rayonnements utilisés en médecine

Puis effets des rayonnements, physiques puis biologiques

2 types de rayonnements médicaux « ionisants » concernés par la radioprotection :

dûs aux:

particules de masse nulle : photons

rayonnements électromagnétiques

particules matérielles

électrons, positons, protons, neutrons

Quand est-ce qu'on les utilise en médecine?

Diagnostic -souvent de l'imagerie

- ☐ Imagerie radiologique rayons X (photons X de masse nulle)
- ☐ Imagerie nucléaire particules matérielles
 - rayons gamma (scintigraphie conventionnelle)
 - émission de positons (TEP)

Tomographie à émission de positons

□ Radio-analyse utilisation d'isotopes radioactifs

Thérapie

☐ rayonnements ionisants : radiothérapie

☐ radiothérapie :

def= Application thérapeutique des rayonnements ionisants

(photons X ou gamma, électrons de haute énergie, neutrons rapides, protons, particules lourdes, ...)

Applications très variées

Elle regroupe :

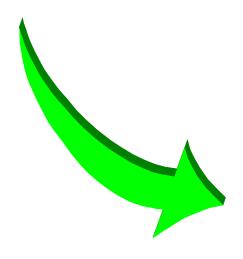
- la radiothérapie externe ou RTe, téléradiothérapie, radiothérapie transcutanée, où la source radiogène est à distance du patient (patient irradié par une source externe)
- et la curiethérapie
- = brachythérapie source radioactive scellée est mise au contact ou à l'intérieur du volume à irradier

Bien sur, pas les mêmes rayonnements utilisés selon le but



Les rayonnements transportent de l'énergie

Action du rayonnement ionisant sur les tissus :



Une partie ou la totalité de cette énergie est transférée aux atomes et molécules des tissus biologiques

C'est ce transfert d'énergie au niveau des tissus bio qui nous intéresse et qui aura un certain nombre d'effets

unités d'énergie

Joule mal adapté

(unité du système international)

électron-Volt (eV)

énergie E transportée et longueur d'onde λ d'un rayonnement de photons sont reliées :

Relation entre énergie et longueur d'onde $\lambda(\mathbf{nm}) = \frac{1240}{\mathbf{E}(\mathbf{eV})}$

rayonnements ionisants



rayonnements pouvant <u>ioniser</u> un atome (c'est-à-dire : arracher un électron de l'atome) => suffisamment énergétique pour ioniser

L'ionisation ne peut se produire que si l'apport d'énergie des rayonnements incidents est suffisant :

Les photons ionisants : énergie ≥ 13,6 eV

Arbitraire mais correspond à une réalité

2. Effet des rayonnements sur la matière

A – Cas où les rayonnements incidents sont des <u>photons</u>

L'intensité des rayonnements émis à partir d'une source,

varie suivant l'inverse du carré de la distance

Loi importante +++

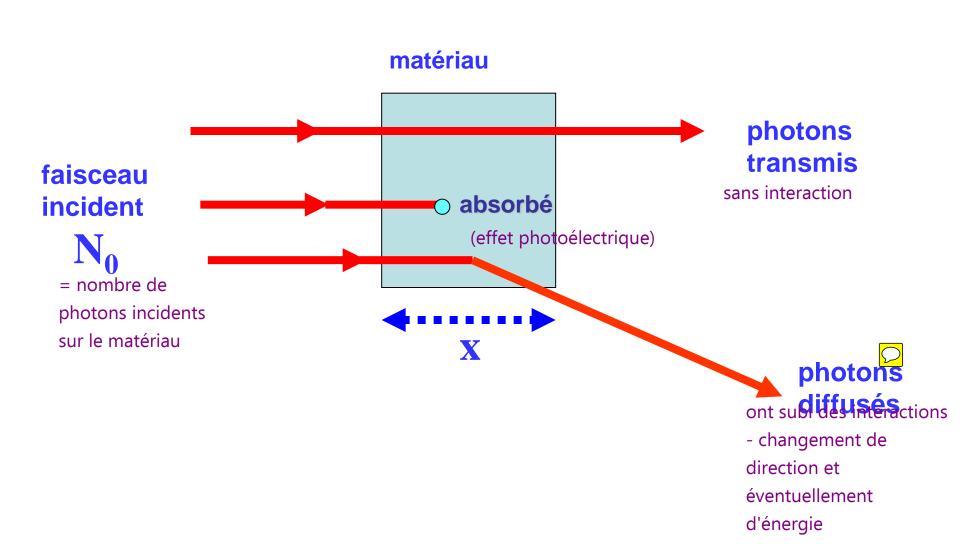
variation en $\frac{1}{\mathbf{d}^2}$

d = distance de l'objet à la source ponctuelle

Radioprotection : s'éloigner de la source primaire protège déjà (radiation diminuée rapidement avec la distance) ; s'éloigner des sources secondaires : source primaire peut irradier un objet qui devient source secondaire

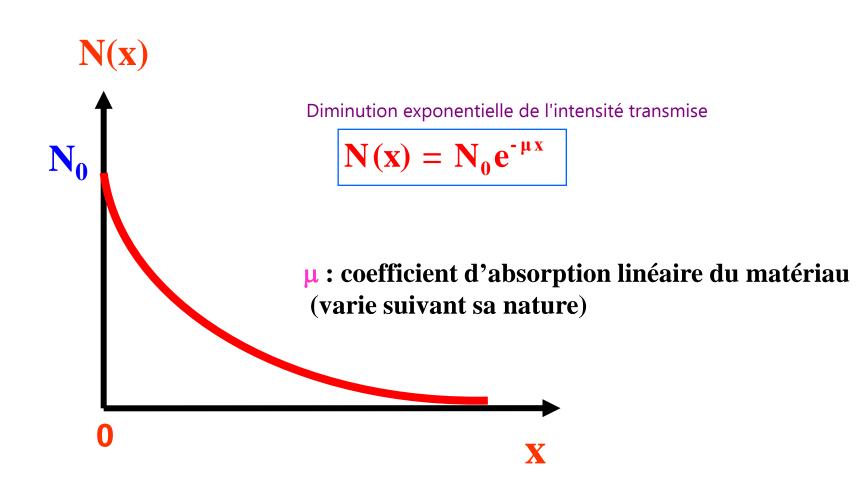
Atténuation du faisceau à la traversée d'un matériau

Un faisceau irradie un matériau - que se passe-t-il lors de cette traversée?



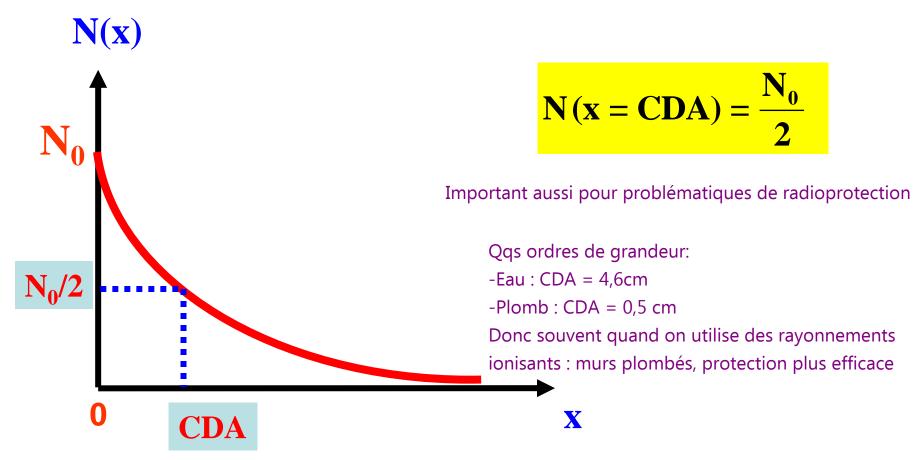
courbe de variation de N en fonction de l'épaisseur x traversée

N = nombre de photons transmis ?



La Couche de demi atténuation (CDA)

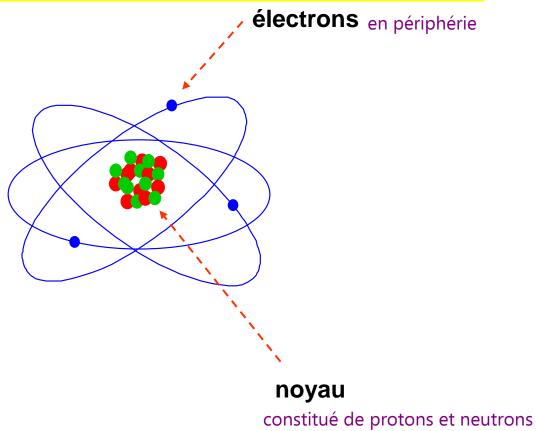
Caractérisation des différents matériaux



un écran d'épaisseur 10 CDA laisse passer environ 1 photon sur 1000

Que se passe t-il dans l'organisme à l'échelle atomique ?

atome : noyau + électrons périphériques



Les électrons de l'atome se répartissent sur des couches

à différentes distances du noyau

C'est une modélisation, simplification par rapport à la réalité

image!

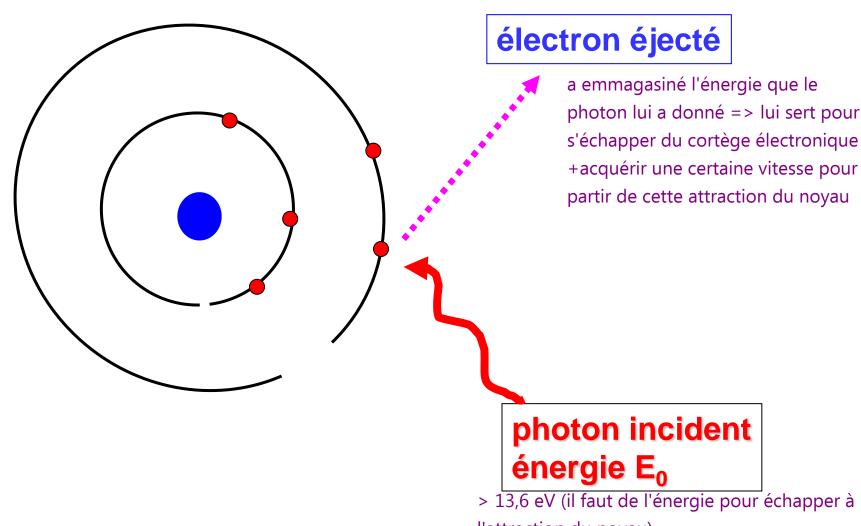
Différents effets au niveau élémentaire

premier mécanisme : L'effet photoélectrique

Interaction du photon incident avec un électron lié (qui appartient à un atome) =/= libre

□Interaction d'un photon avec un électron lié appartenant aux atomes de la cible

□ Phénomène d'absorption totale de l'énergie



transfert total de l'énergie du photon incident à un électron atomique de la cible qui est éjecté

effets secondaires

électron éjecté (photoélectron)

perte progressive de son énergie cinétique va subir ⇒ ionisations et excitations secondaires en cascade

énergie <u>absorbée</u> par le matériau cible

1ère opération : transfert de l'énergie à l'électron pour qu'il s'échappe il se déplace dans le matériau, rencontre d'autres atomes (i, e secondaires en cascade) => finit par perdre son énergie

atome ionisé

car e- éjecté

place vacante : lacune

dans le cortège électronique

effets secondaires : réarrangement du cortège électronique

pour reperdre l'excès d'énergie

⇒ photons de fluorescence

⇒ électrons Auger

Surplus d'énergie : quand e- vient combler la lacune surplus donné à e- périph qui sera aussi éjecté

probabilité de l'effet photoélectrique dépend de la nature des tissus traversés

Probabilité varie en Z³ et 1/E₀³

Z = numéro atomique du tissu 1/E0 :

=>augmente fortement avec le Z et diminue fortement avec l'énergie du photon incident

Donc effet photoélectrique est plus importante pour les tissus de numéro atomique Z léevé, et diminue fortement avec l'augmentation de l'énergie E0 des photons

Plus les photons sont énergétiques, moins l'effet photoélectrique a de chances de se produire

Effet photoélectrique est à l'origine du contraste dans l'image des tissus biologiques

Deux autres mécanismes d'interaction des photons au niveau atomique

avec les <u>électrons</u>:

effet Compton

avec les <u>noyaux</u> des atomes

matérialisation : création de paires électron-positon

Second mécanisme de base :

La diffusion Compton

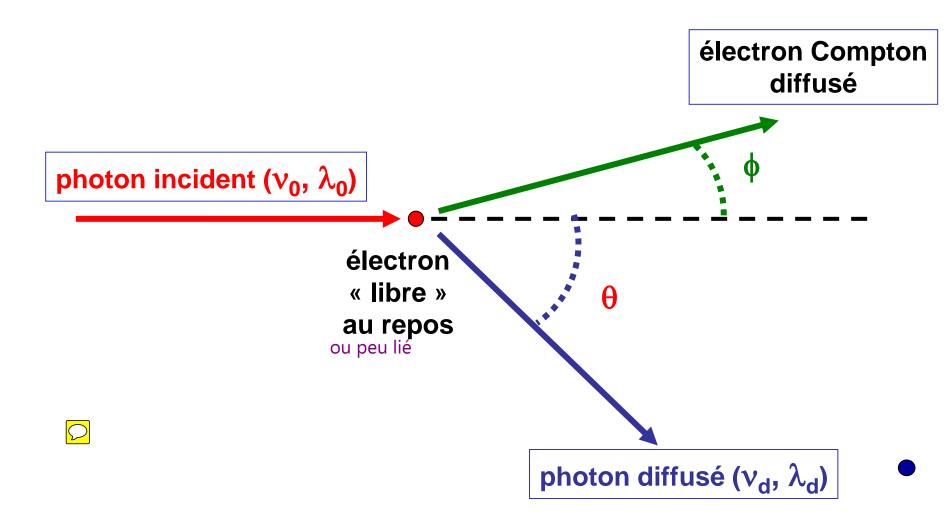
□ Interaction d'un photon avec un électron libre de la cible

□ Phénomène d'absorption et de diffusion de l'énergie incidente

effet Compton : choc « élastique » photon-électron photon incident d'énergie $E_0 = h v_0$

électron libre ou faiblement lié

= fréquence



répartition de l'énergie

avant le choc

photon incident $E_0 = h \nu_0$ h = contante de Planck = 6,62 x 10-36 ? électron au repos $m_e c^2$ = E

après le choc

énergie de l'électron Compton diffusé :

énergie cinétique = énergie absorbée E_a par le matériau + énergie de masse m_e c^2

énergie du photon Compton (ou de recul) diffusé
 énergie diffusée E_d = h ν_d
 non absorbé par le matériau



Troisième mécanisme de base : Matérialisation de paires

photon incident très énergétique d'énergie \mathbf{E}_0 passant au voisinage d'un noyau

matérialisation : création de paires (e-, e+)

électron / positon

condition : E₀ ≥ 1,022 MeV

(dans notre problématique, ne se produit pas)

B – Cas où les rayonnements incidents sont des particules chargées légères

particules chargées légères : électrons et positons

Interaction obligatoire des particules chargées avec le milieu : dépôt d'énergie totale ou partielle délivrée au milieu

certains photons pouvaient traverser matériaux sans interaction Ici, interaction obligatoire Effets possibles:

ionisation de l'atome cible

déjà vu, on passe plus rapidement

effets secondaires \Rightarrow ionisations en cascade

excitation de l'atome cible

effets secondaires
dissipation thermique = échauffement du milieu
ou photons X qui seront émis par le matériau irradié par les particules légères

production de rayons X

On utilise cette interaction pour produire des rayons X

seulement dans le cas de cible de numéro atomique Z élevé

anode du tube de rayons X constitué de matériau avec Z élevé

(anode du tube radiogène)

Pour caractériser ce transfert obligatoire d'énergie :

transfert linéique d'énergie (TLE)

quantité d'énergie transférée à la cible par unité de longueur de la trajectoire de la particule incidente

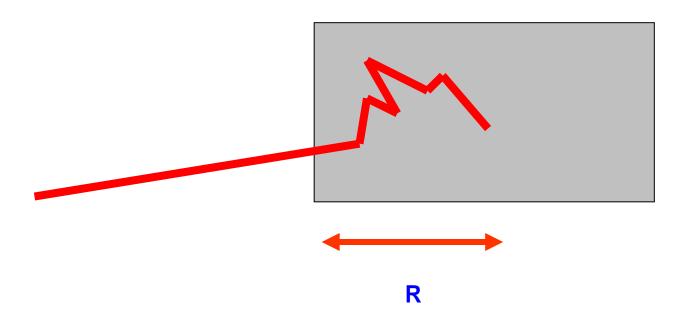
Parcours des particules chargées <u>légères</u> dans la matière : <u>non rectiligne</u>

A chaque interaction, elles vont changer de direction

Lignes brisées : zig-zag

Changement de direction à chaque collision ou interaction avec un noyau

profondeur R de pénétration < Longueur de la trajectoire



donc trajectoires limitées : conséquences :

les particules chargées peuvent être totalement arrêtées par des cibles d'épaisseur suffisante

Les particules chargées ne peuvent pas être détectées en dehors de la cible un matériau les arrête relativement facilement - mais peuvent être dangereuses par contact direct avec le milieu biologique (inhalation, ingestion)

${f R}$ fonction de l'énergie ${f E}_{{f c}}$ de la particule incidente :

E (keV)	R (µm)
100	142
1000	4300

C – Cas où les rayonnements incidents sont des <u>particules chargées lourdes</u>

particules chargées lourdes :

protons, deutons, particules alpha (noyau d'hélium)

(masse 2000x plus élevée que e-)

particules lourdes : parcours très court

trajectoires rectilignes

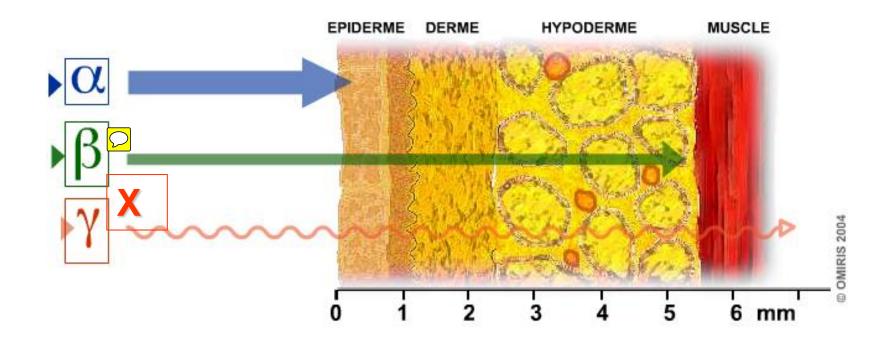
exemple : particules alpha du Radon 222 d'énergie 5,5 MeV:

parcours de 40 microns dans les tissus

Mais comme pénètrent assez peu : particules lourdes arrêtées par qqs cm d'air ou une feuille de papier - donc on peut s'en protéger assez facilement

comparaison du pouvoir de pénétration des différents rayonnements

Pouvoir de pénétration des rayonnements ionisatns



Les rayons gamma, ou X, ne peuvent jamais être totalement arrêtées Qqs mm de plomb ou cm de béton divisent par 2 la quantité de rayonnement

3. Grandeurs et unités en dosimétrie et en radioprotection

<u>définitions</u>

la dose absorbée D: peut être absorbée très rapidement, ou des irradiations continues à petites doses grandeur dosimétrique

correspond à :

énergie absorbée / masse de matière

Gray (Gy) = 1 joule / kilogramme

le débit de dose

important car effets ne sont pas les mêmes à meme dose mais débits différents

énergie absorbée / masse de matière et par unité de temps t

souvent en

milliGray (mGy) / minute

Dose Équivalente H - on tient compte du type de rayonnement

grandeur de radioprotection - pour quantifier effets des doses absorbées

caractérisation biologique de la dose en fonction du type de rayonnement

= dose absorbée x facteur W_R

Unité: Sievert (Sv)

facteur qui tient compte du type du rayonnement

Ce facteur est un nombre sans dimension, mais du moment qu'on parle de dose équivalente on s'exprime en Sv

facteur de pondération radiologique W_R

• RX,
$$\[mathbb{R}^+\]$$
 et $\[mathbb{O}^+\]$ W_R = 1
• neutrons thermiques $\[mathbb{W}_R = 3$
• neutrons énergétiques et p⁺ W_R = 10
• noyaux lourds $\[mathbb{W}_R = 20$

dose équivalente dans un tissu : fonction du type de tissu irradié

= dose absorbée x W_R x W_T

exemple : $W_T = 0.04$ pour la thyroïde

unité: Sievert (Sv)



dose efficace E:

somme des doses équivalentes reçues par tous les tissus (ou organes) exposés au rayonnement

unité : Sievert (Sv)

D efficace est le meilleur reflet du risque :

- Tient compte la radiotoxicité du rayonnement
- Tient en compte la radiosensibilité des tissus irradiés

dose engagée :

en cas d'irradiation interne (incorporation d'un radionucléide)

= dose absorbée jusqu'à la disparition du produit radioactif

unité: sievert (Sv)

intérêt et limites de la dose efficace

<u>intérêt</u>: bien adaptée aux besoins de la radioprotection correspond mieux aux effets biologiques

limites:

- □ sans valeur probabiliste aux faibles doses
- ☐ ne tient pas compte du débit de dose et du fractionnement éventuel
- □ ne tient pas compte de l'âge du patient

jeunes enfants beaucoup +sensibles