

Biophysique des rayonnements



Dr. C. SEKKAK

Département de Médecine, Université de Constantine 3

03-12-2014

Introduction

✚ L'effet des rayonnements sur la matière vivante est souvent perçu comme un effet nuisible conduisant à la **radiopathologie**.

✚ L'étude scientifique de **l'interaction matière – rayonnement** donne une possibilité de comprendre correctement de nombreux et complexes faits expérimentaux, c'est la **radiobiologie**.

✚ Les scientifiques ou médecins spécialisés retirent de ces études un ensemble de connaissances orienté vers la **radioprotection**. La pathologie induite par les applications médicales a imposé la mise en place de **normes de radioprotection** dès 1928

✚ Tout rayonnement présente des **effets biologiques, utiles ou nuisibles** à la vie


radiothérapie

Traitements des cancers
par des rayonnements

Risques!!!!

les **risques** éventuels d'un **traitement** par rayonnements
sont **très difficiles** à mettre en évidence



Seulement **la connaissance raisonnée** des phénomènes doit
aider le médecin et le patient à **accepter ou à refuser ce risque.**

- ▶ **Auparavant**, les **préoccupations aller vers le rayonnement ionisant** ou encore la radioactivité, lesquels évoquaient la guerre nucléaire.
- ▶ **Depuis quelques années**, on commence à se soucier des **effets du rayonnement non-ionisant** et notamment la surexposition aux rayons UV, aux dommages que les lasers peuvent causer aux yeux et des éventuels effets cancérigènes que peuvent avoir les radiofréquences et les micro-ondes.

Plan

Partie 1: PHYSIQUE GENERALE DES RAYONNEMENTS

- . **Classification des rayonnements**
- . **Rayonnement X**
- . **Rayonnement radioactif**
- . **Interaction rayonnements matière avec la matière**
- . **Détection et mesure d'un rayonnement**

Partie 2 : EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS ET APPLICATIONS EN MEDECINE

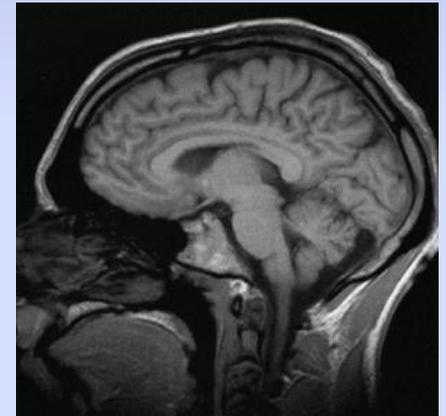
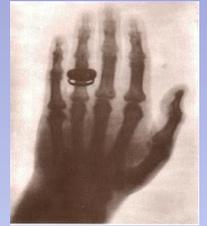
- . **Rayonnements ionisants**
- . **Rayonnements non ionisants**

Utilisation des rayonnements en médecine

- Traitement du cancer au moyen de **rayonnements ionisants**
- Imagerie diagnostique au moyen des **rayons X**
- Imagerie par **ultrasons**
- Imagerie par **résonance magnétique nucléaire**
- Imagerie diagnostique au moyen de **radio-isotopes**
- (médecine nucléaire)
- Etude des risques que présentent les rayonnements
moyens de protection contre les rayonnements
(**radioprotection**).



Dosimétrie = respecter une certaine dose



Partie 1:

Physique générale des rayonnements

Classification des rayonnements

Selon la nature du rayonnement:



Rayonnements **électromagnétiques**/Rayonnements **particulaires**

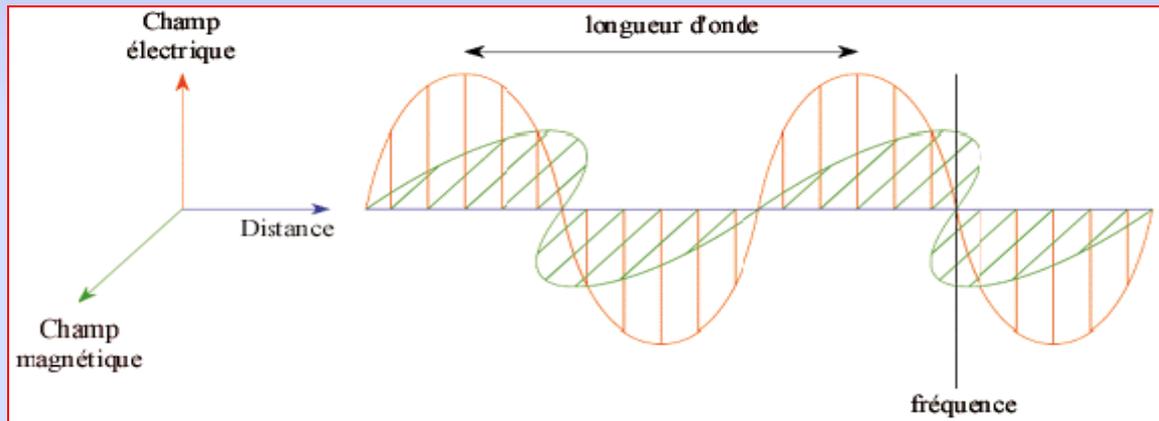
Selon les effets du rayonnement sur la matière:



Rayonnements **ionisants**/Rayonnements **non-ionisants**

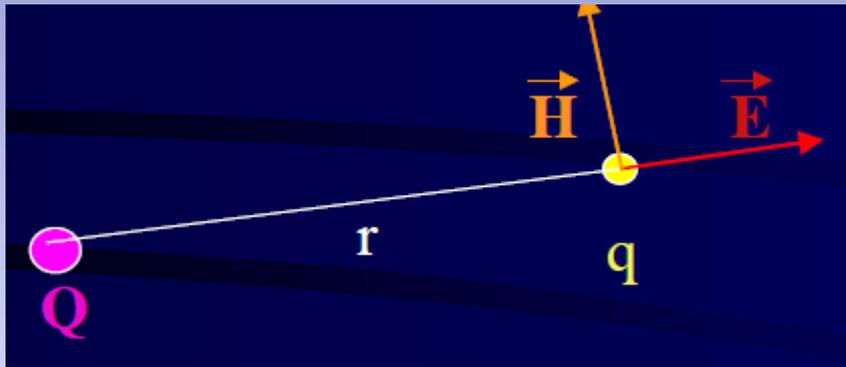
1. Rayonnements électromagnétiques

Les radiations électromagnétiques sont émises par les **vibrations des électrons atomiques** composant celle-ci avec l'association d'un champ électrique sinusoïdal E et d'un champ magnétique B de même période, qui lui est en tout point perpendiculaire



(REM selon Maxwell)

Origine du rayonnement électromagnétique



$$\vec{F} = \frac{1}{k} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \vec{u} = q \cdot \vec{E}$$
$$\vec{E} = \frac{Q}{kr^2} \vec{u}$$

Oscillation de la charge Q \Rightarrow Variation de \vec{E}

Déplacement de la charge Q \Rightarrow Production d'un courant I

Création d'un champ magnétique H(Biot-Savart)

\vec{E} perpendiculaire à \vec{H}

Caractéristique du rayonnement électromagnétique

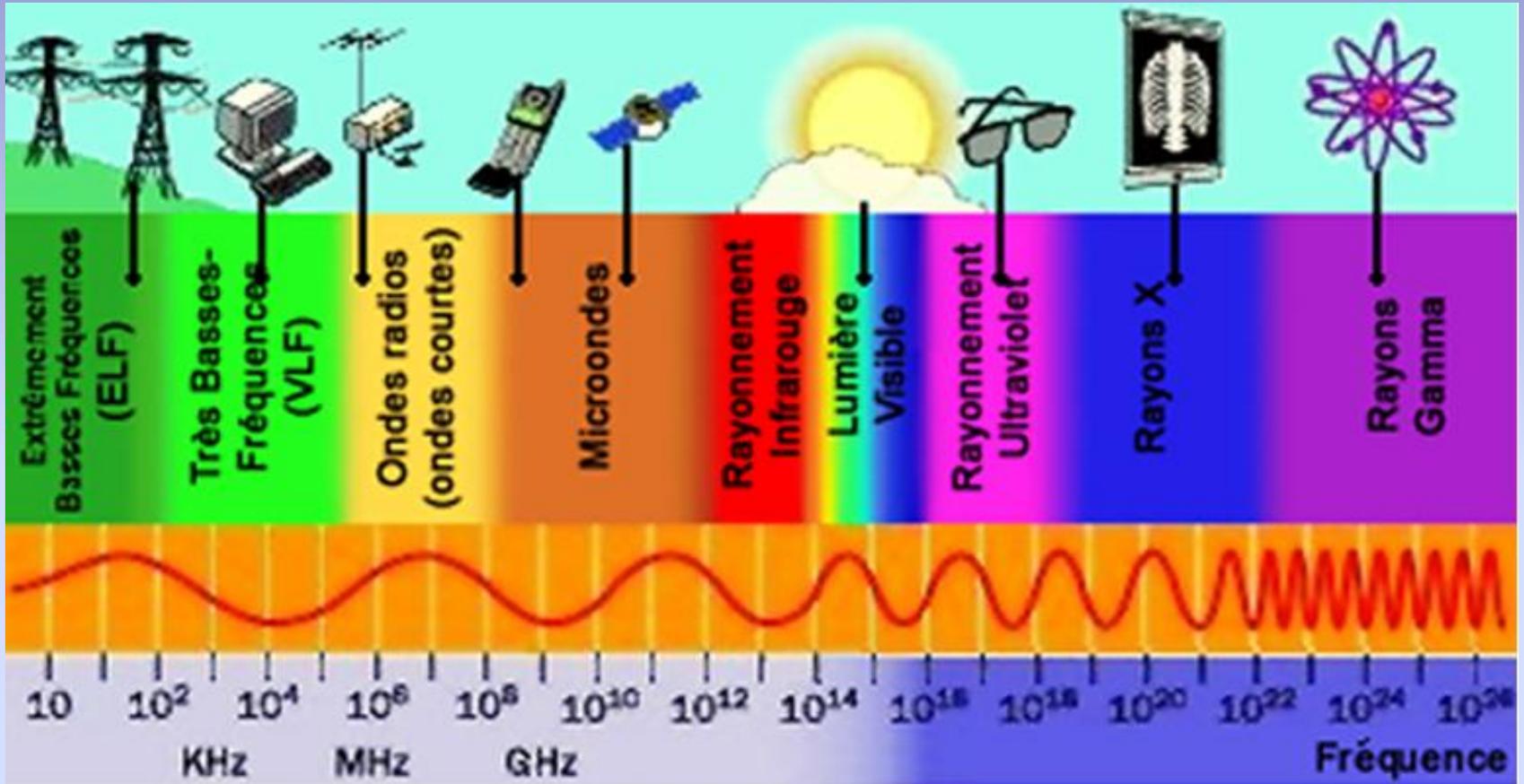
Vitesse de propagation dans le vide constante

$$C = 2.98 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Rayonnement monochromatique défini par:

- Sa fréquence : $\nu = 1/T$
- Longueur d'onde dans le vide : $\lambda = cT = c/\nu$
- Nombre d'onde par unité de longueur : $\sigma = 1/\lambda$
- Sa pulsation : $\omega = 2\pi/T$

Spectre électromagnétique



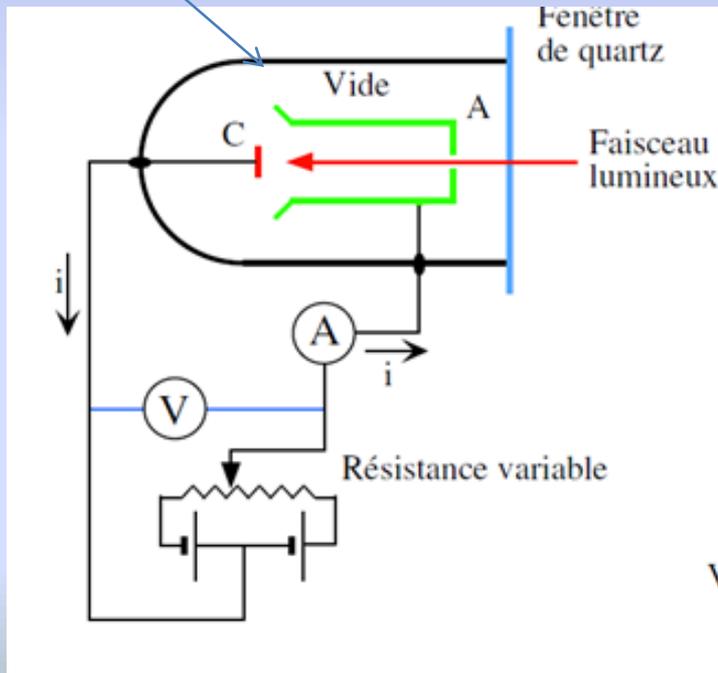
Classification des REM s selon la **fréquence**

Aspect corpusculaire du rayonnement électromagnétique

Effet photoélectrique

Hertz et Lenard
(Entre 1899 et 1902)

photocathode



Emission d'électrons d'un matériau soumis à l'irradiation de la lumière

Par la fenêtre de quartz pénètre une lumière ultraviolette monochromatique

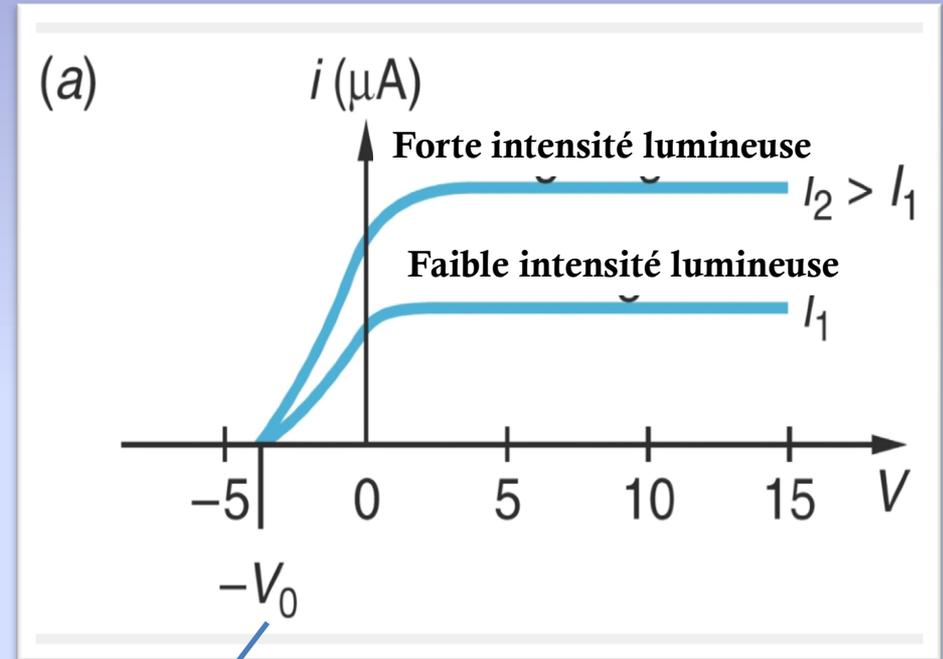
La lumière est incidente sur la cathode et libère des électrons (photoélectrons)

Avec une différence de potentiel V entre anode et cathode positive, nous pouvons collecter les électrons sur l'anode, ce qui donne lieu à un **courant détectable**.

Constatations expérimentales

✓ Si $V > 0$ pour une valeur suffisamment élevée de V , tous les photoélectrons émis atteignent l'anode, et le courant I atteint une valeur maximale. Si on augmente davantage V le courant demeure constant. Cependant, la valeur maximale du courant est proportionnelle à l'intensité lumineuse.

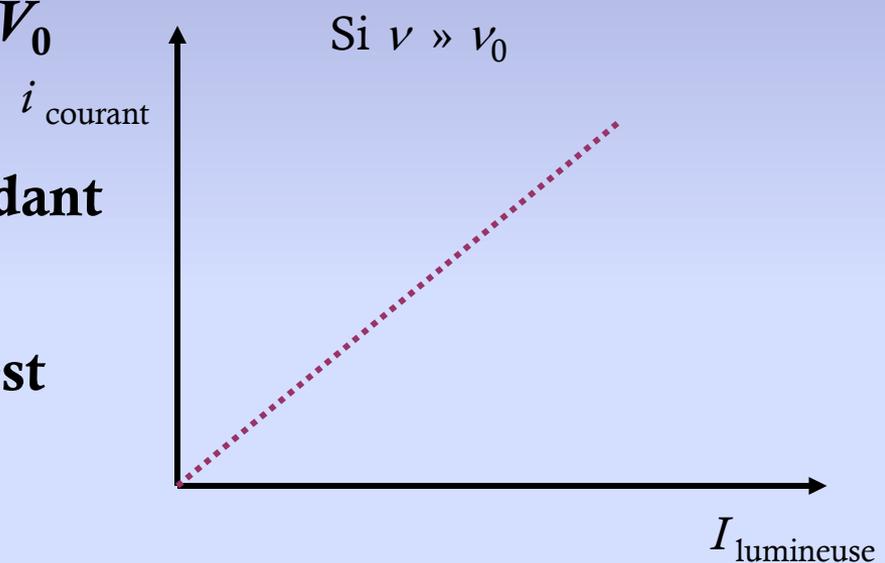
✓ Si $V < 0$ Seulement les e^- avec une énergie cinétique initiale $K_e = \frac{1}{2} mv^2 > |eV|$ atteignent l'anode. Si $|V| > |V_0|$ aucun électron n'atteint l'anode. Le **potentiel d'arrêt V_0** est indépendant de l'intensité lumineuse.



Potentiel
d'arrêt

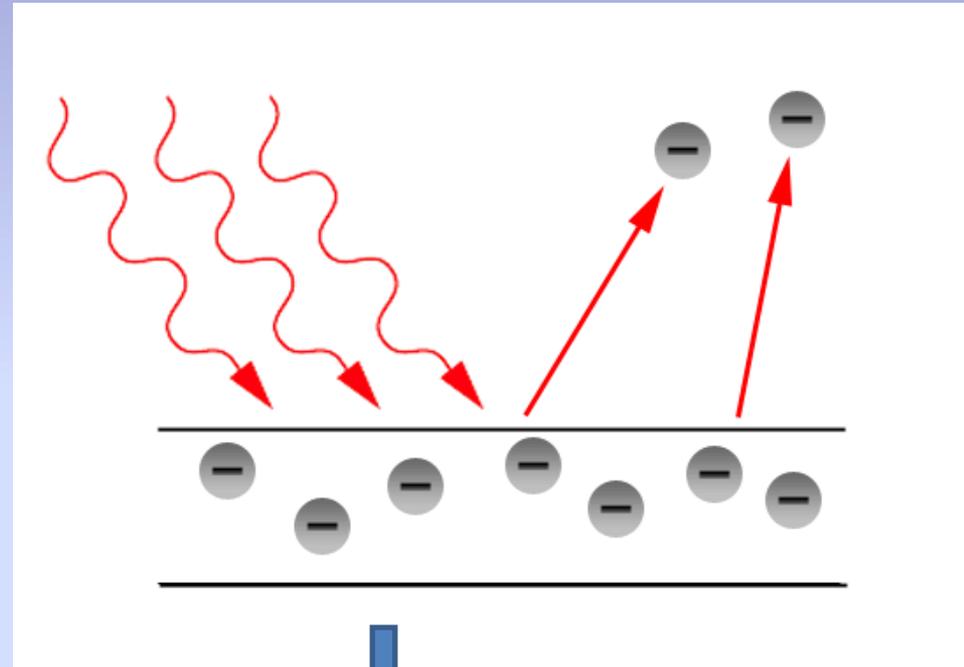
Ce que l'on doit expliquer

1. Émission de photoélectrons si $\nu \gg \nu_0$ (**fréquence seuil**);
2. Présence d'un **potentiel d'arrêt** V_0 si $|V| > |V_0|$;
3. Le potentiel d'arrêt est indépendant de l'intensité lumineuse;
4. L'émission des photoélectrons est instantanée;
5. Le courant photoélectrique est proportionnel à l'intensité lumineuse de la source.



Explication par la théorie ondulatoire

- Sous l'influence de l'onde électromagnétique, l'électron (dans le métal) se met à vibrer à la même fréquence que l'onde et lorsqu'il possède assez d'énergie pour passer la barrière de potentiel (ϕ), qui le retient, il s'échappe.



phénomène se produit $\forall \lambda$

Explication inexacte

1. Incapable d'expliquer la fréquence seuil:

- Avec le temps, l'électron pourrait toujours acquérir suffisamment d'énergie pour s'échapper.

2. Incapable d'expliquer pourquoi le potentiel d'arrêt V_0 est indépendant de l'intensité lumineuse:

- Puisque I est proportionnel au carré de l'amplitude (A^2), pour une même fréquence, si I augmente alors l'énergie devrait augmenter.

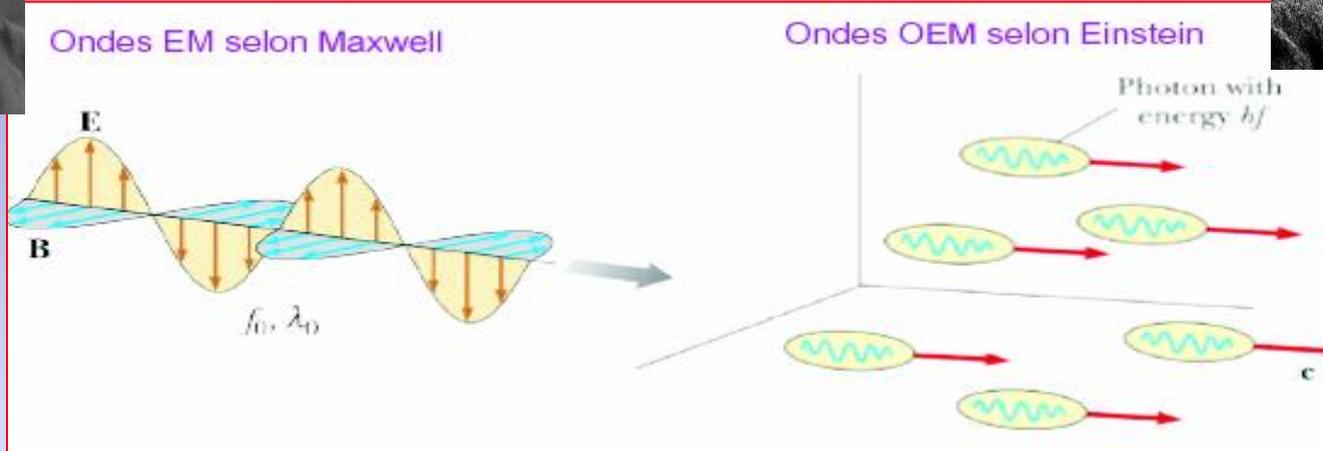
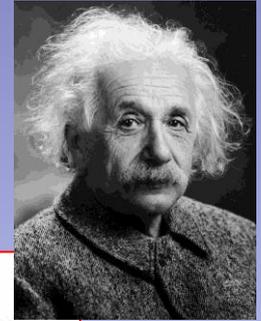
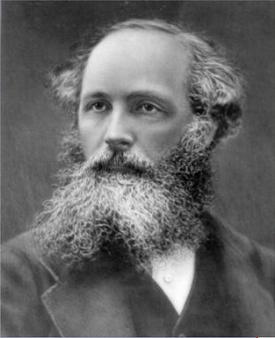
3. Incapable d'expliquer l'émission instantanée:

- Le retard d'émission calculé est beaucoup plus grand que celui mesuré expérimentalement.

Conclusion

“La théorie ondulatoire de la lumière ne réussit pas à expliquer l'émission photoélectrique”.

Explication quantique (Einstein 1905)



A. Einstein: Prix Nobel en 1915

Lumière est formée de **paquets** de **photons**,
L'énergie est concentrée dans ces photons,
L'énergie est échangée immédiatement,
L'énergie est égale à **$E = h \nu$** .

Les **collisions** entre les quanta de lumière (**photon**) et les **électrons** du métal sont de **type mécanique** où l'énergie et la quantité de mouvement se transmettent et se conservent.



1. À **basse fréquence** ($\nu < \nu_0$), les photons incidents **n'ont pas suffisamment d'énergie** à communiquer aux électrons pour les faire passer la barrière de potentiel ϕ qui les retient dans le métal (explication de la **fréquence seuil** ν_0)

2. Il s'agit d'une collision parfaitement élastique

$$h\nu = \phi + \frac{1}{2}mv^2$$



Équation photoélectrique

Puisque :

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV_0$$

Alors :

$$h\nu = W_e + eV_0$$



$$W_E = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

Fréquence de seuil

dépend du métal utilisé

longueur d'onde seuil

on observe l'effet photoélectrique si $\nu > \nu_0$; $\lambda < \lambda_0$.

Exemple

Si la longueur d'onde maximale pour observer l'effet photoélectrique est de 564 nm dans le cas du potassium (K), calculez:

a) Le travail d'extraction ϕ

b) Si la longueur d'onde de la lumière utilisée est de 400 nm, déterminez l'énergie cinétique maximale des photoélectrons. Ainsi le potentiel d'arrêt (pour le potassium)

a) Le travail d'extraction ϕ :
$$\phi = \frac{1242 \text{ eV nm}}{564 \text{ nm}} = 2,20 \text{ eV}$$

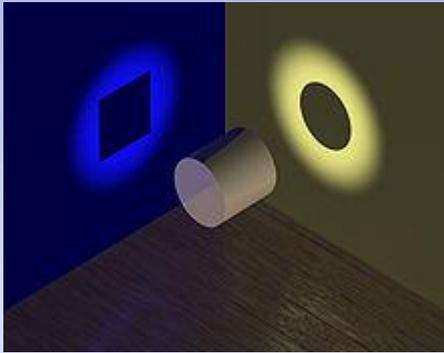
b) L'énergie cinétique maximale

$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = e V_0 = h \nu - \phi = 0,90 \text{ eV}$$

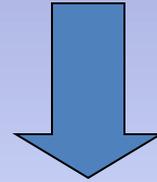
La tension d'arrêt est de 0,90 Volt, si la longueur d'onde de la lumière utilisée est $\lambda = 400 \text{ nm}$.

Dualité onde-corpuscule

Photon se comporte à la fois comme une onde et un corpuscule



Métaphore du cylindre : objet ayant à la fois les propriétés d'un cercle et d'un rectangle



De Broglie suggère de généraliser cette dualité à la matière

Photon:
$$p = \frac{E}{c} = \frac{\left(\frac{hc}{\lambda}\right)}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Matière:
$$p = mv = \frac{h}{\lambda}$$

Dualité onde-corpuscule de la matière

De Broglie (1923) suggère de généraliser cette dualité à la matière (particules matérielles)



« Toute particule en mouvement, quelle que soit sa nature doit être toujours considérée comme associée à une onde: le mouvement de la particule se déduit des lois de propagation de l'onde associée ».

Ordre de grandeur des longueurs d'ondes associés à des particules




$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Particule	Energie	Longueur-d'onde de de Broglie	Utilisation possible
Electron	1 eV	12 Å°	Diffraction par un cristal
Neutron	20 meV	1.5 Å°	Diffraction par un cristal
proton	10 ⁶ eV	30 Fermi (10 ⁻¹⁵ m)	Structure du noyau
Atome He	20 meV	0.8 Å°	Diffraction par un cristal
Molécule C60	0.15 eV	2.5 pm (10 ⁻¹² m)	Diffraction par un réseau 50 nm ouverture et 100 nm d'espacement

- Observation des propriétés ondulatoires de la matière par **diffraction** ou par **interférence**:



Mise en évidence expérimentale

Faisceau d'é

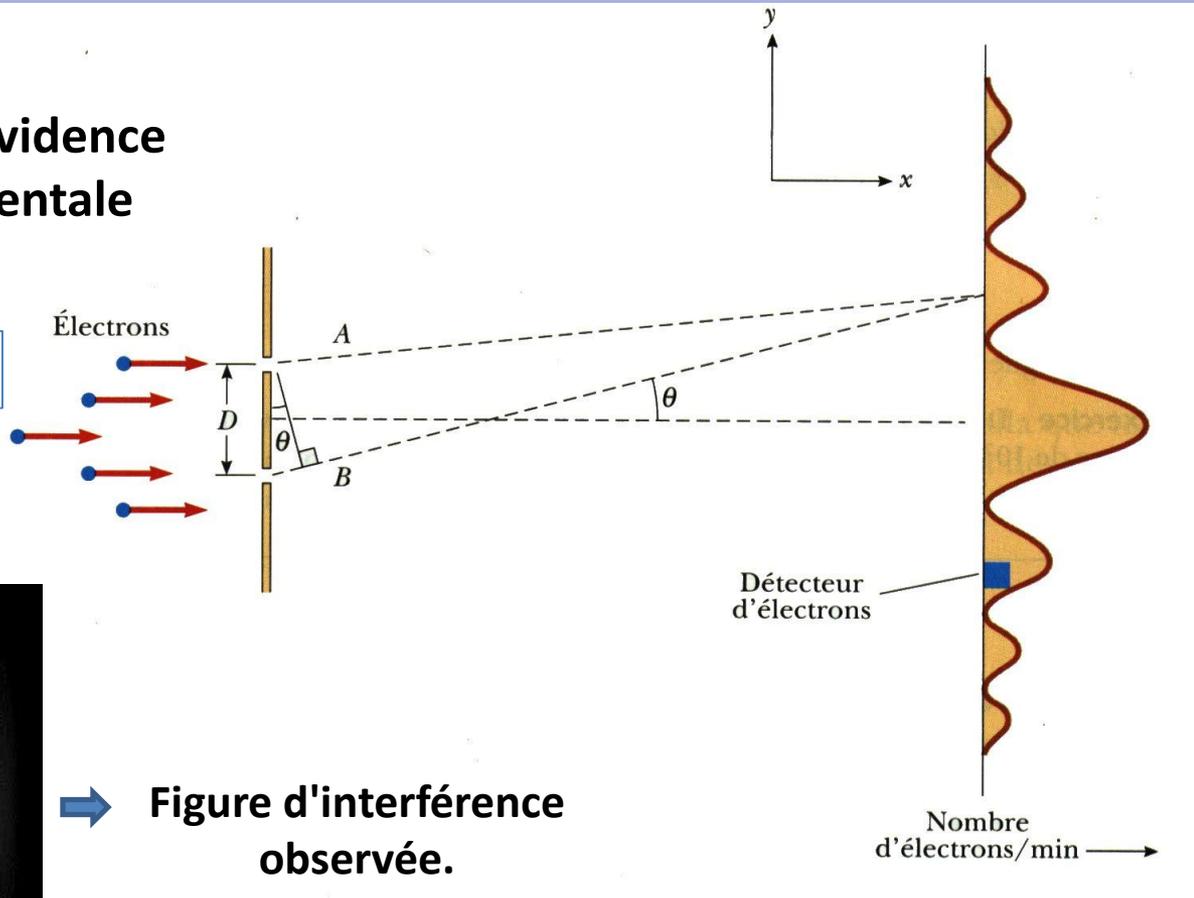
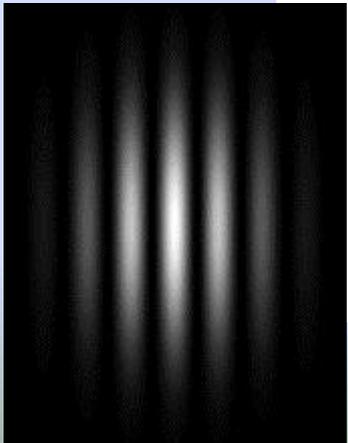
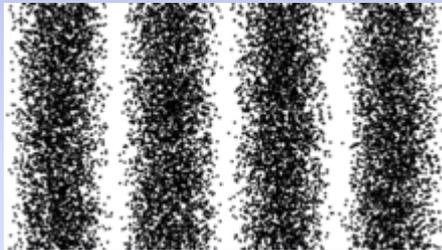


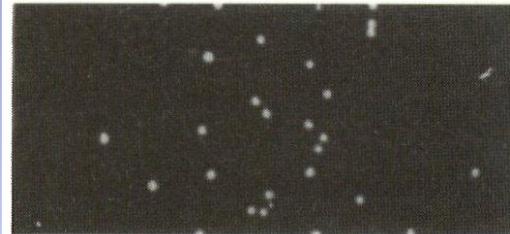
Figure d'interférence observée.



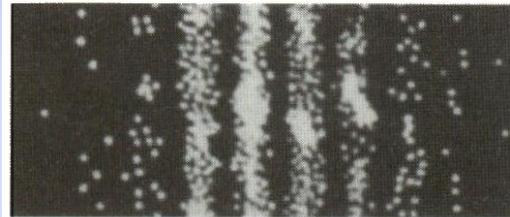
- **Observations**



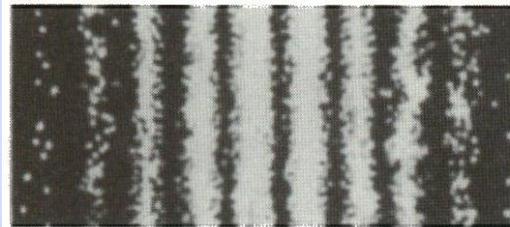
**Les impacts des
particules rendent visible
l'interférence des ondes**



(a) 28 électrons



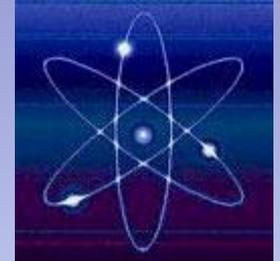
(b) 1 000 électrons



(c) 10 000 électrons

2. Rayonnements particuliers

Rayonnements formés de particules dotées d'une **masse au repos non nulle**



Ces particules forment un faisceau de particules caractérisées par:

✓ une charge

✓ une masse au repos m_0

✓ une vitesse v

✓ une masse cinétique:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - (v^2 / c^2)}$$

Correction de la masse selon la relativité d'Einstein

✓ une impulsion (ou quantité de mouvement):

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

✓ une énergie totale : $E = mc^2$

- **Énergie cinétique**

La théorie de la **relativité** (Einstein 1905) permet de prévoir un comportement différent des particules en fonction de leur vitesse



la **masse** de la particule tendant vers **l'infini** lorsque la **vitesse** tend vers la **célérité** de la lumière

En fonction de l'énergie

→ Particule **classique**

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} m v^2$$

→ Particule **relativiste**

$$E_{\text{cin}} = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right]$$

La mécanique classique est une approximation de la mécanique relativiste pour des vitesses faibles par rapport à la célérité de la lumière

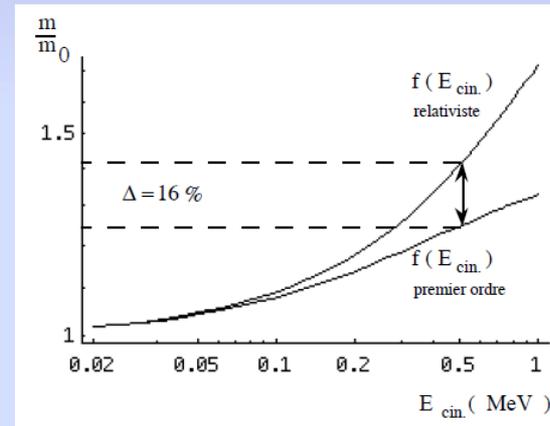
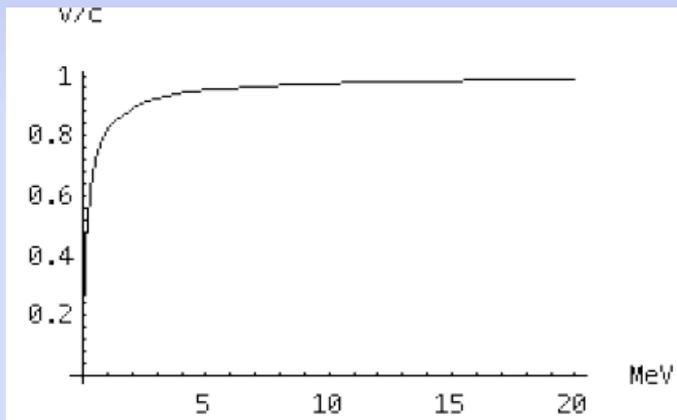
Le domaine d'énergie électronique exploité en médecine

$$E_{\text{cin}} \in [0.02, 20] \text{ MeV}$$

électrons accélérés produisant les rayons X
mous

les accélérateurs d'électrons employés en
radiothérapie cancéreuse

Considérer l'é comme **relativiste** ou **non relativiste** ?



On néglige des
erreurs de
l'ordre de 10 à
20 %

électrons d'énergie **< 0,5 MeV**
sont non relativistes



Le but est de faire comprendre la difficulté théorique
de la dosimétrie (**doses avec précisions**)

Classement des rayonnements particulaires

Selon la masse

Selon la charge

1. **Particules chargées légères (électrons)** : électrons, rayonnements β^- et β^+ , électrons de conversion interne, électrons Auger ... Toutes ces particules ne diffèrent que de par leur mode de production et sont de nature fondamentalement identique
2. **particules chargées lourdes** : protons, particules α , ions lourds, résidus de fission nucléaire... Le comportement dans la matière de ces entités est soumis aux mêmes lois que les particules chargées légères, cependant l'effet de la masse intervient

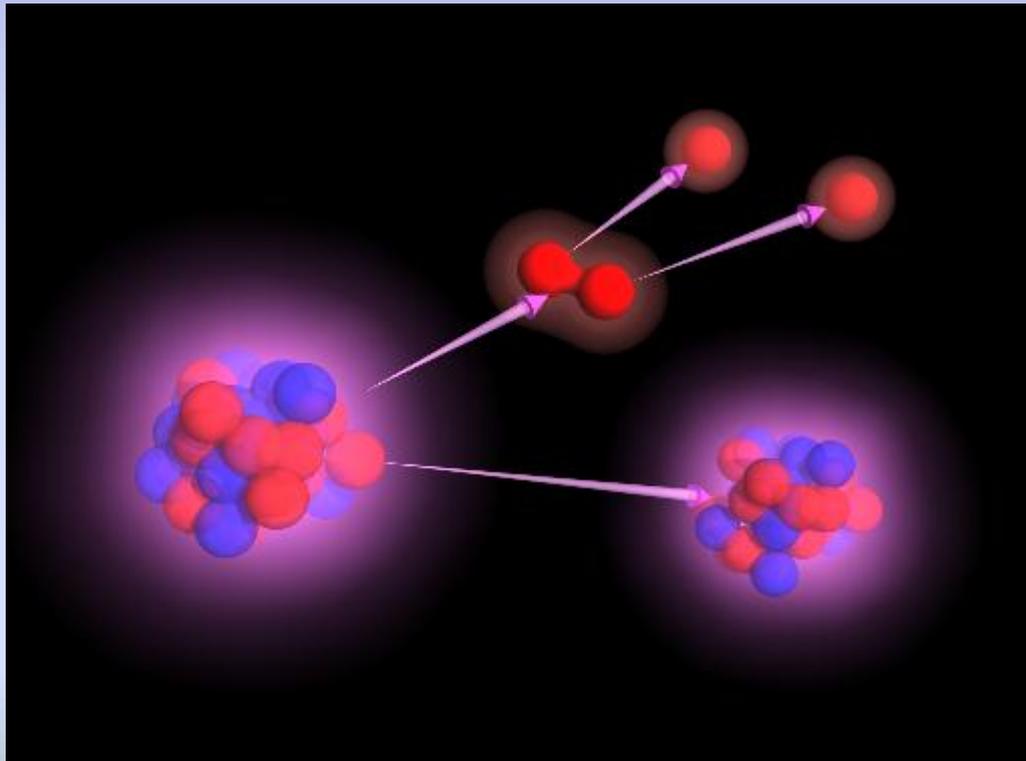
1. **chargés (électrons et positons)**, qui agissent avec les électrons de la matière cible
2. **neutres (neutrons)**, qui agissent sur les noyaux de la matière cible

Ces particules peuvent être produites lors de désintégrations radioactives ou au **moyen d'accélérateurs**.

3. La radioactivité



La radioactivité n'a pas été inventée par l'homme. C'est un **phénomène naturel** qui existe depuis l'origine de l'Univers et qui imprègne notre environnement quotidien



Historique

- **1896**: Henri Becquerel met en évidence la radioactivité :
Il constate qu'une plaque photographique, mise en contact avec les sels d'uranium était impressionnée sans avoir été exposée à la lumière.
Il en conclut que l'uranium émet son propre rayonnement.

- **En 1898** Marie Curie confirme ce phénomène en l'appelant « **Radioactivité** » Avec son mari Pierre Curie, elle s'est ensuite consacrée à trouver d'autres matériaux radioactifs: le  polonium, le radium.

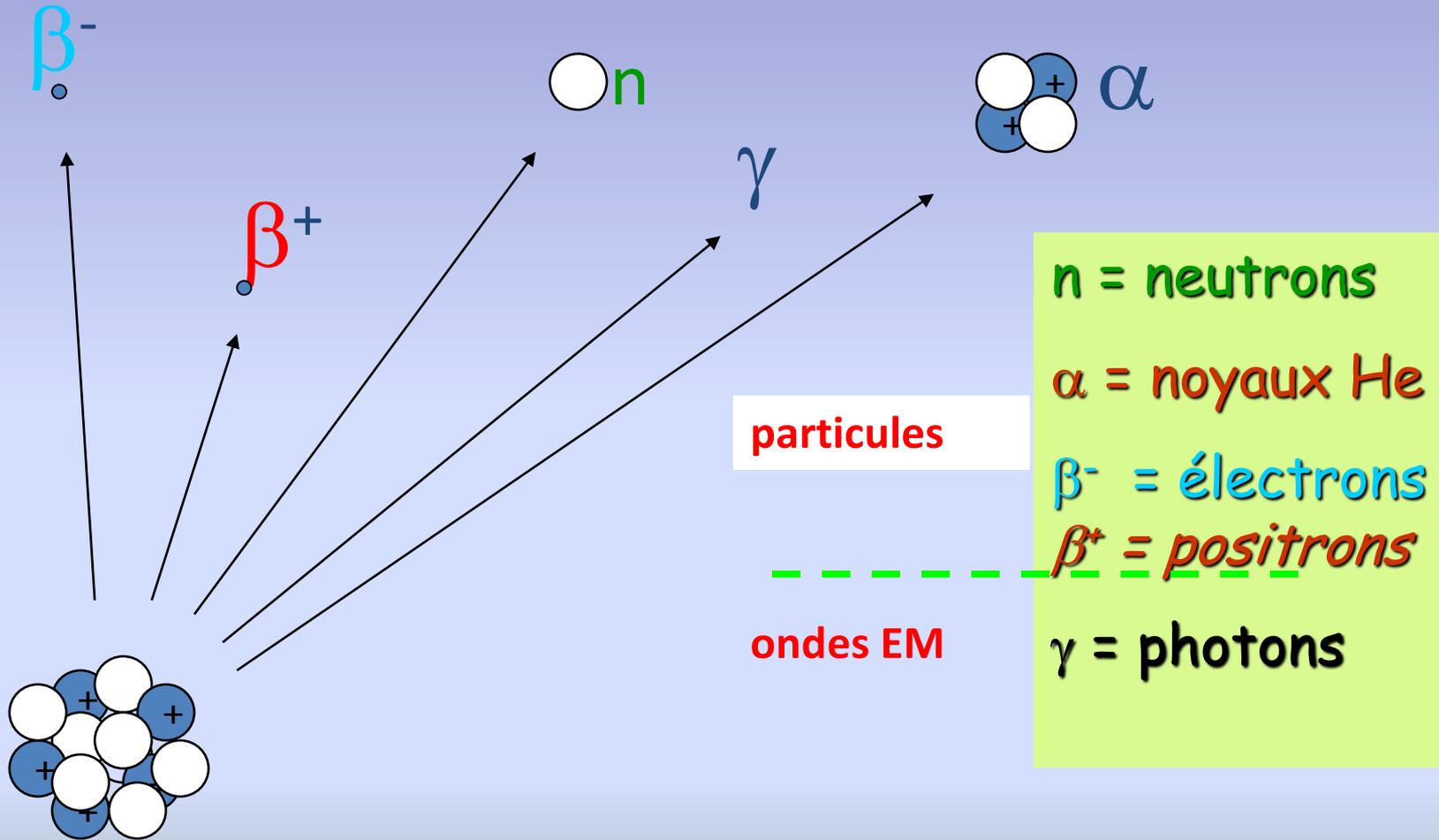
- **1903**: les trois chercheurs reçoivent le Prix Nobel de physique pour leurs recherches sur les radiations.

- **1935**: Irène Curie avec son mari Frédéric Joliot, reçoivent le Prix Nobel de chimie pour la découverte de **la radioactivité artificielle**.



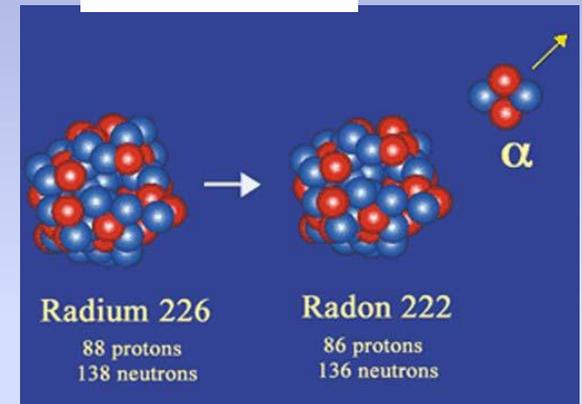
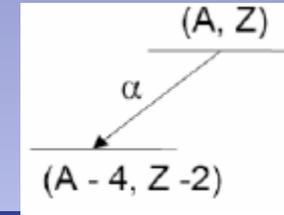
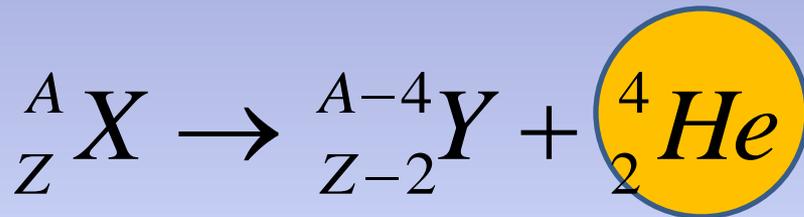
Mr & Mme Curie

Les rayonnements émis



Émission α

Équation générale de la désintégration α



La plupart des désintégrations α
se produisent avec des nuclides
 $A > 200$

Noyaux trop lourds
dans la zone C

Ils possèdent une **grande énergie** (MeV)

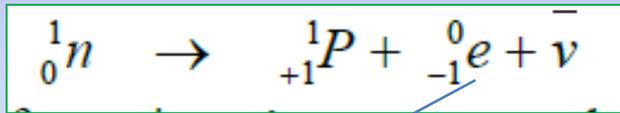
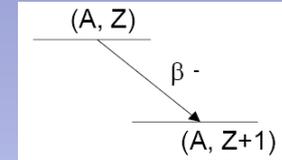
$$Q = (m_X - m_Y - m_{\text{He}})c^2$$

Énergie libérée au cours de
la désintégration

Émission β^- - pure ou négaton

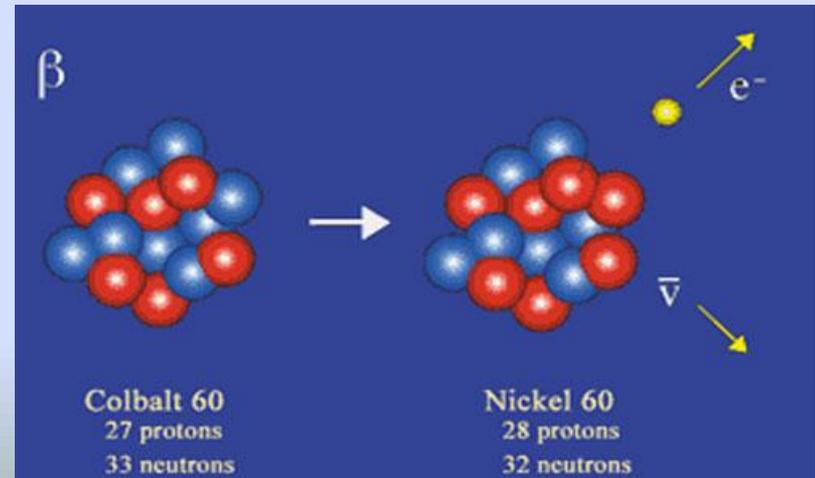
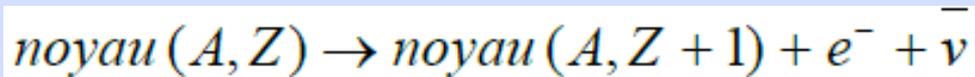


Concerne les noyaux situés dans la zone **A** du diagramme N-Z, qui ont un **excès de neutrons**.



Rayonnement (β^-)

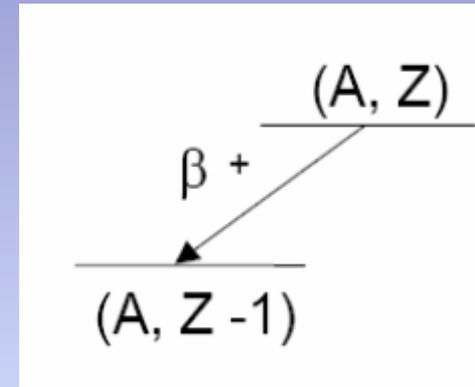
Antineutrino (particule neutre de masse très faible)



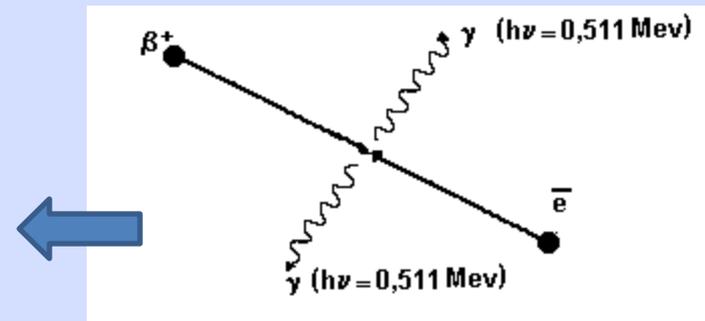
Émission β^+ ou positon (positron)



Concerne les noyaux situés dans la zone B, qui ont un excès de protons

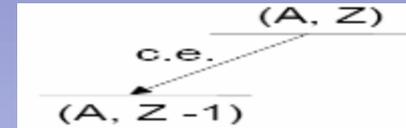


β^+ , s'annihile en fin de son parcours avec un électron.



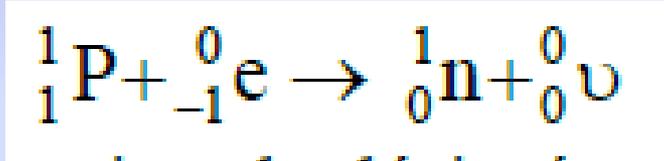
Capture électronique

Dans la **zone B**, il y a compétition entre l'émission β^+ et la **capture électronique**. La dernière prédomine pour les éléments lourds.

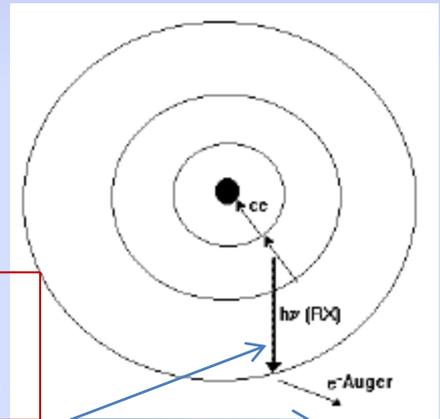
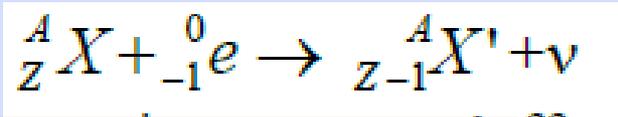


CE \leftrightarrow Capture d'un électron par le noyau

P se transforme alors en un n



Equation de la désintégration :



Transformation ne peut s'effectuer que si

CE s'accompagne du réarrangement életron

$$Q_{CE} = ([M(A, Z) + m_0({}^0_1\text{e})]c^2 - M(A, Z-1)c^2) > E_{\text{Liaison de l'é capturé}}$$

Emission γ

➤ Cause : **Noyau*** instable
(après une désintégration: α , β^+ ; β^- ...)



Déexcitation

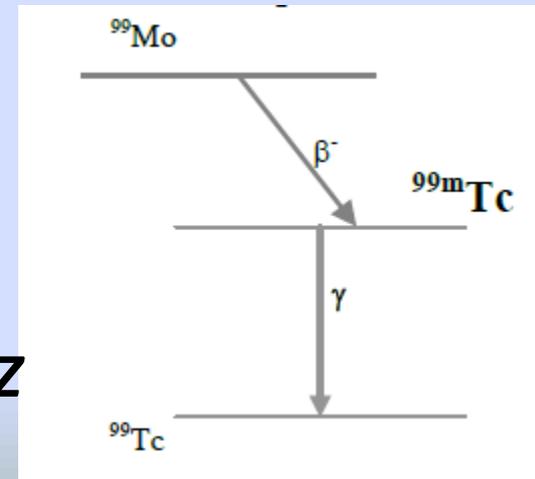
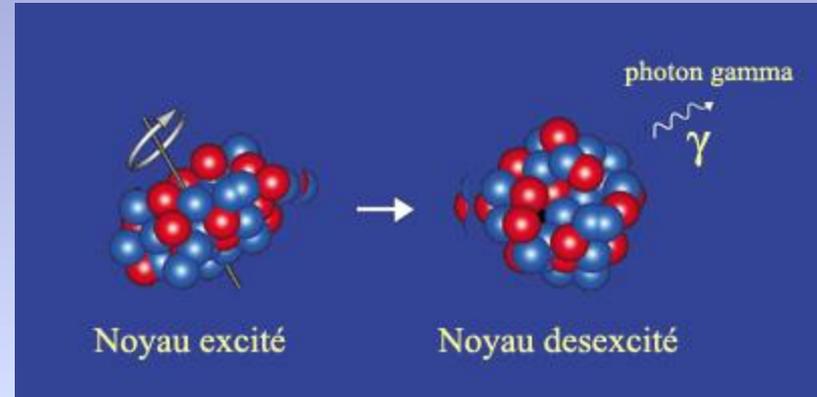
(avec libération de l'énergie)



*Emission d'un ou plusieurs ondes
électromagnétiques γ*



Sans changement de numéro atomique Z



Les lois de la radioactivité

Loi de décroissance radioactive: (1902)

- Radioactivité : phénomène aléatoire, impossible de prévoir à quel moment un noyau radioactif va se transformer.
- Mais on peut déterminer la probabilité qu'a ce noyau, de se transformer par l'unité de temps:
 λ : **constante radioactive** ou probabilité de désintégration:
caractéristique du radionucléide, ne dépend :
 - ni des conditions physiques ou chimiques,
 - ni de l'âge de l'atome

Expression du nombre d'atomes N en fonction du temps

$N(t)$: présents à l'instant t

dN : se désintègrent entre t et $t + dt$

$$\left. \begin{array}{l} N(t) : \text{présents à l'instant } t \\ dN : \text{se désintègrent entre } t \text{ et } t + dt \end{array} \right\} \begin{array}{l} dN = - \lambda N(t) dt ; \text{ d'où} \\ \boxed{dN / dt + \lambda N = 0} \end{array}$$

$$\int dN / N = - \int \lambda dt + cte$$

$$\ln N = - \lambda t + cte ; \text{ à } t = 0 : N = N(0) = cte$$

$$\ln N = - \lambda t + \ln N(0) \quad \text{et} \quad \ln N / N(0) = - \lambda t$$

$$N / N(0) = e^{-\lambda t} \longrightarrow \boxed{N(t) = N(0) e^{-\lambda t}}$$

Le nombre d'atomes décroît exponentiellement avec le temps.

L'activité A

- $N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$: variation N en f(t);
- Or ce qu'on mesure c'est *l'activité*: A d'une source*
- On mesure cette activité par le nombre de désintégrations qui s'y produit par seconde.
- $A(t) = \left| dN/dt \right| = \lambda N(t)$;
- $A(t) = \lambda N(0) e^{-\lambda t}$ soit $A(0) \longrightarrow t = 0$

$$A(t) = A(0) e^{-\lambda t}$$

Unités d'activité

- Unité d'activité actuelle et légale : **BECQUEREL : Bq**
- **1 Bq = 1 désintégration / seconde** (→ MBq utilisé)
- Unité ancienne et classique : **CURIE : Ci**
- **1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq**: → C'est l'activité de 1g de $^{226}_{88}\text{Ra}$
- **1 m Ci = $3,7 \cdot 10^7$ Bq = 37 MBq**

Décroissance radioactive

Période radioactive T

- **Décroissance radioactive**: Diminution avec le temps de l'activité d'une source radioactive par disparition progressive des noyaux instables.
- **Période d'une source**: Temps T au bout duquel l'activité de cette source sera **divisée par 2** (nombre d'atomes a diminué **de moitié**)+++.

$$N(T) = N(0) e^{-\lambda t} = N(0) / 2 \rightarrow e^{-\lambda t} = \frac{1}{2} \leftrightarrow e^{+\lambda t} = 2$$

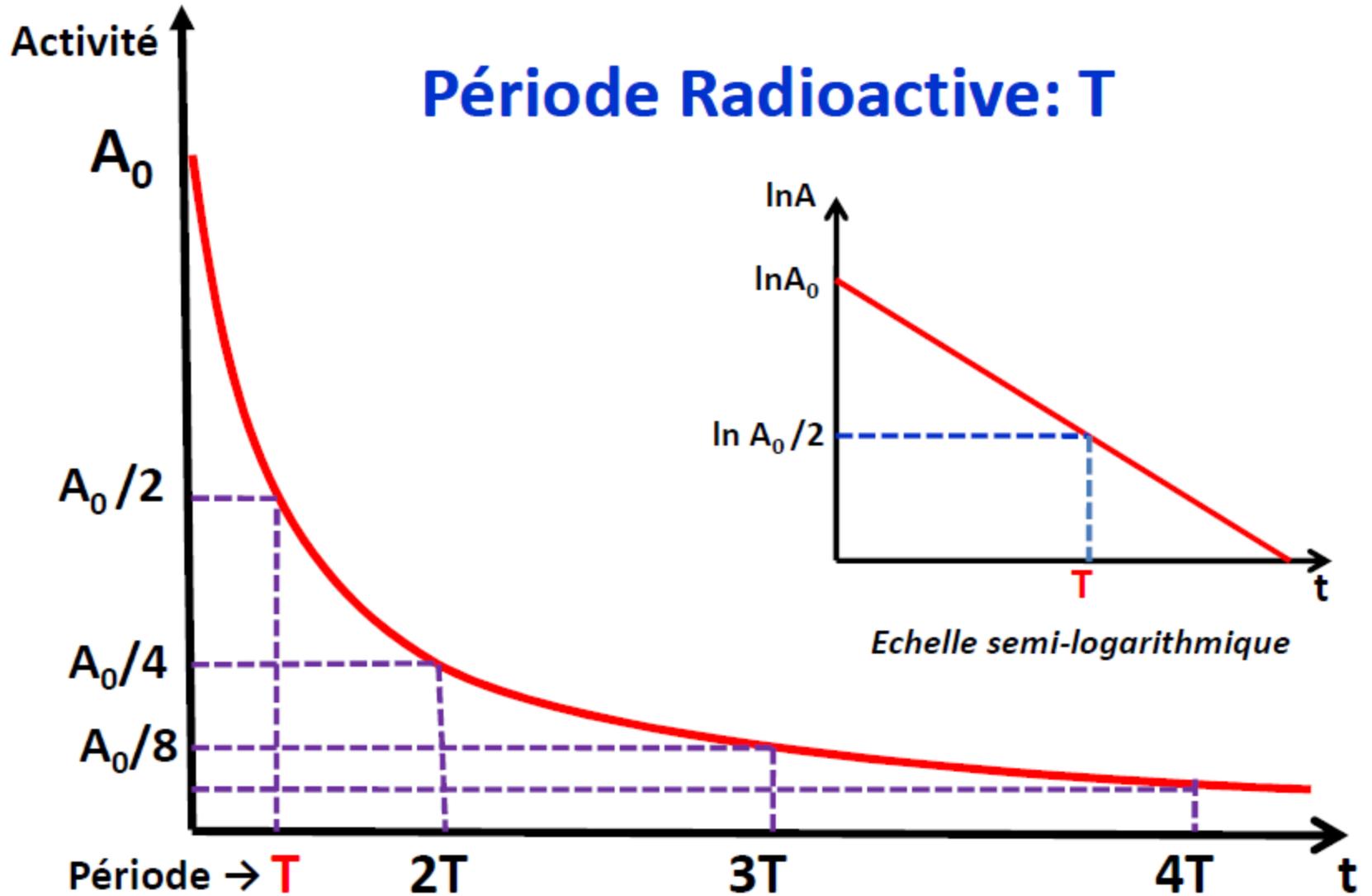
$$\rightarrow \lambda T = \ln 2 = 0,693; \quad T = 0,693 / \lambda$$

- **Unité de T** : seconde, minute, jour, mois, année..
- **T** : caractéristique d'un radio-isotope; variable d'un élément à l'autre.

$${}^12_5\text{B} : T = 0,02 \text{ sec};$$

$${}^{238}_{92}\text{U} : T = 4,5 \text{ milliards années}$$

Période Radioactive: T



Variation du nombre d'atomes en fonction du temps (échelle linéaire)*

Période biologique et période effective

- ✓ Lorsqu'on incorpore un radionucléide dans l'organisme, l'élimination de l'activité s'effectue par la combinaison de la **décroissance radioactive** du radionucléide et de **l'élimination biologique**

Une période effective (T_e) \rightarrow
$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_B}$$
 Biologique

Exemple

Pour traiter une hyperthyroïdie, une activité de 400 MBq d'iode-131 est administrée par voie orale à un patient. On considère ici que seule la thyroïde fixe de façon significative ce radioélément émetteur (β^- , γ).

On donne :

Période de ^{131}I : $T = 8$ jours

Période d'élimination biologique de ^{131}I : $T_B = 4$ jours

- Au bout duquel temps l'activité résiduelle est divisée par 2 ?

✓ L'activité résiduelle au niveau de la thyroïde est divisé par 2 au bout d'un temps $t = T_e$

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{ph}} + \frac{1}{T_{bio}}$$

T_{ph} = période du radioélément

T_{bio} = période d'élimination biologique

$$T_{ph} = 8 \text{ jours}$$

$$T_{bio} = 4 \text{ jours}$$

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{8} + \frac{1}{4} = \frac{3}{8}$$

$$T_e = \frac{8}{3} \text{ jours}$$

4. Les rayons X

Et l'homme devient transparent



Historique



➔ **1895**: Découverte des rayons X par Prof. Wilhelm C. Roentgen

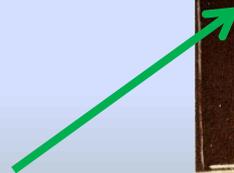


➔ **1901**: Roentgen reçoit le Prix Nobel Pour la découverte des rayons X

1897 : Création du premier Laboratoire hospitalier de radiologie , à Paris.



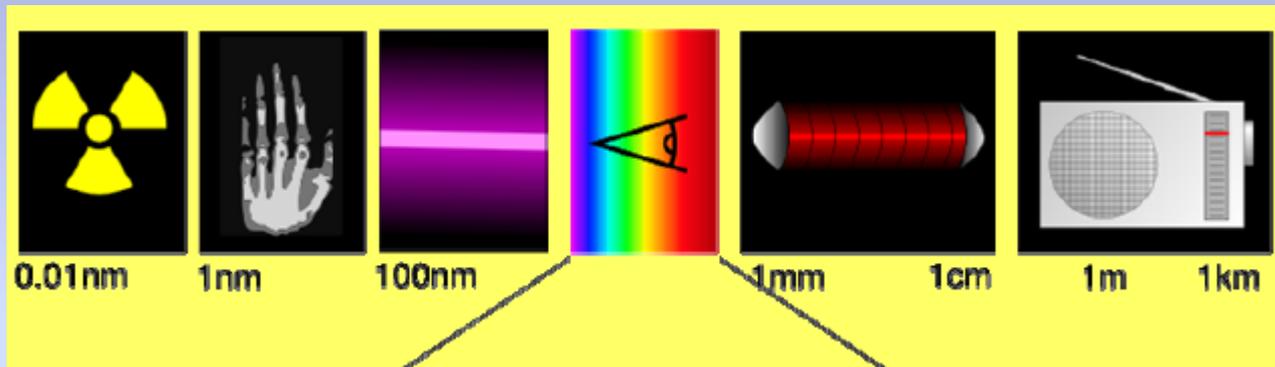
Tube générateur de rayons X



Nature des rayonnements X

✓ Les rayons X sont des **rayonnements électromagnétiques** de très courte longueur d'onde (**0,03 nm à 10 nm**)

← **Limites pas bien précises!!!**



✓ Les rayons X sont des photons **produits par l'interaction des électrons avec la matière.**

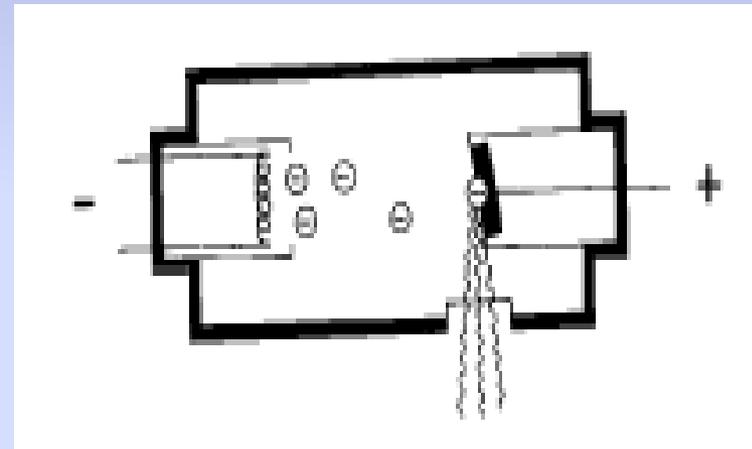
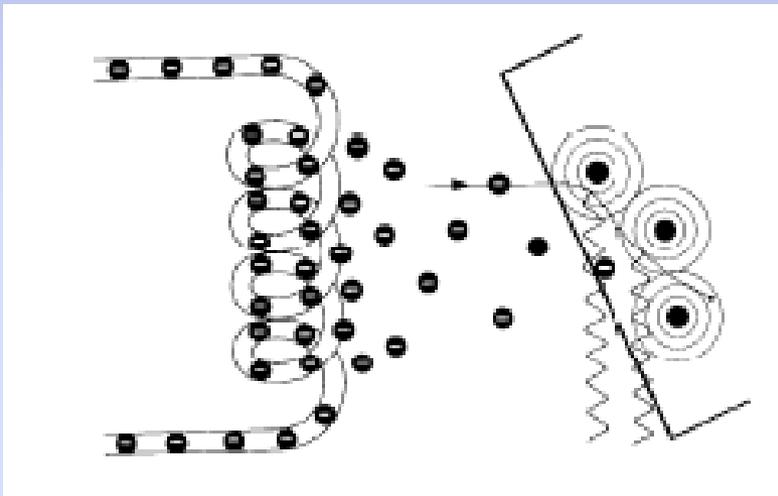
✓ Ils sont émis par le **bombardement** de la surface d'un solide par des rayons cathodiques qui sont des **faisceaux d'électrons** accélérés par des **tensions variant entre 10^3 et 10^6 V**

Production des Rayons X



Nous avons besoin :

- Une source d'électrons
- Un haut voltage pour accélérer les électrons
- Une cible pour absorber les électrons et produire les RX



Production

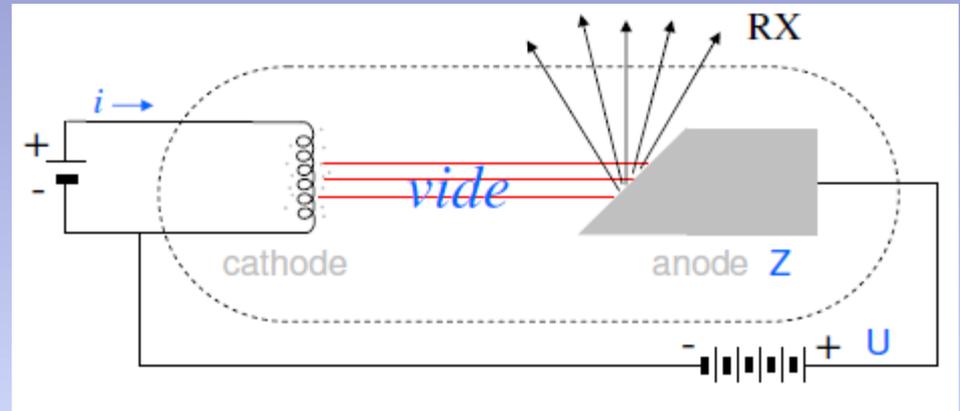
Les tubes à rayons X utilisent le bombardement électronique.

Les éléments radioactifs utilisent le rayonnement gamma émis par les noyaux de ces éléments.

Tube de Coolidge (1940) (Application médicale)



Tube à vide contenant un filament chauffé par une base tension (BT) et une anode (masse métallique) portée à une forte tension positive (haute tension HT) par rapport au filament



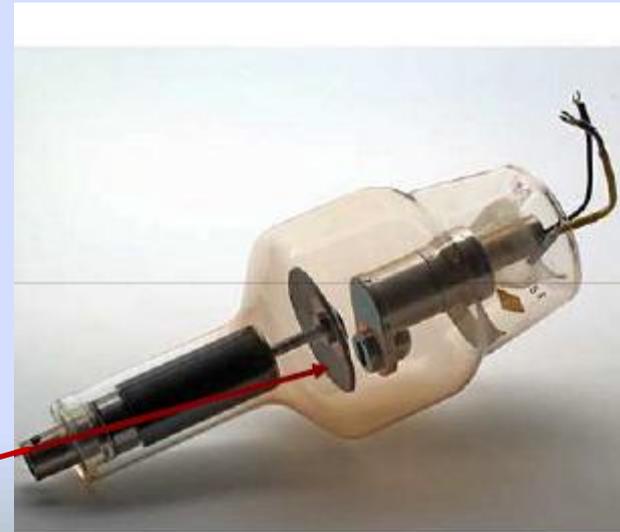
1. Production d'électrons par un filament conducteur chauffé à rouge (effet thermoïonique)
2. Attraction des électrons vers une cible métallique portée à une très forte tension positive (anode = anticathode) par rapport au filament (cathode)
3. Décélération brutale des électrons lors de leur arrivée sur l'anode. L'énergie cinétique se transforme en **chaleur** (beaucoup) et **rayons X** (un peu)

Quelques tubes à rayons X



Anode

Anode tournante pour mieux évacuer la chaleur



Que peut on régler sur un tube à rayons X ?

1. La **tension** (U) entre l'anode et la cathode *de façon directe en modifiant la tension d'alimentation*
2. L'**intensité** (i) qui traverse le tube entre anode et cathode *de façon indirecte en modifiant le chauffage du filament (plus la température du filament est élevée, plus l'intensité qui traverse le tube est élevée)*

Domaine de médecine

Tubes de radiodiagnostic



30 – 150 kV

Tubes de radiothérapie



Qlqs kV

Calcul de l'énergie X maximum

✓ L'électron est arrêté brutalement, en un seul impact. **Toute son énergie cinétique se transforme en un photon X**

✓ Chaque électron a une charge $e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Sous l'action du champ électrique U , cet électron acquiert une énergie cinétique

$$E_c = e \cdot U$$



$$\text{Energie maximum : } E_{\text{max}} = eU$$

✓ Energie du photon

$$E = h\nu$$

(Avec h constante de Planck 6.62×10^{-34} et ν fréquence en Hz)

✓ Calcul de la longueur d'onde minimum

$$\lambda_0 = c / \nu \quad \longrightarrow \quad eU = h\nu = hc / \lambda \quad \lambda_0 = hc / eU$$

$$\lambda_0 = \frac{1.24}{U}$$

(λ_0 en nm et U en kV)

Longueur d'onde minimale

Exemple

Un *tube à rayons X* à anticathode de cuivre fonctionnant sous une tension U de 50 kV.

1. Calculer l'énergie cinétique maximale ?
2. Calculer la longueur d'onde minimale?

Energie maximum : $E_{\max} = eU$

$$\lambda_0 = \frac{1.24}{U}$$

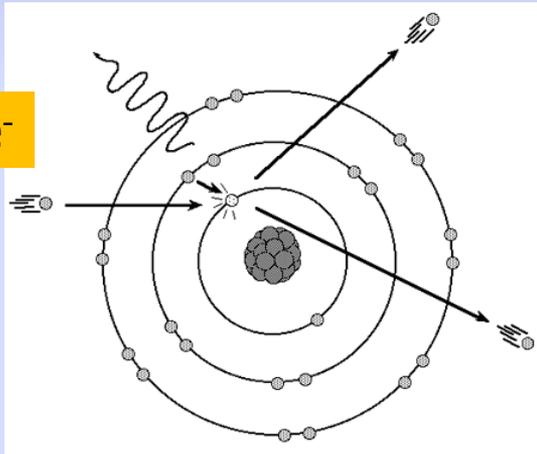
Mécanismes à l'origine des RX:

Lors de la production ou l'émission des RX Deux mécanismes simultanés vont se produire



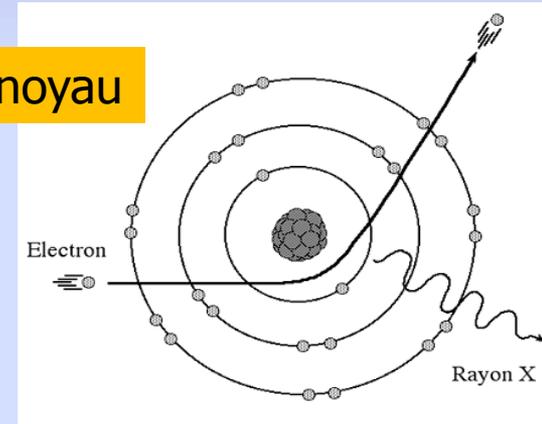
Collision (électrons des atomes de l'anode) Freinage (noyaux des atomes de l'anode)

Interaction $e^- - e^-$



Spectre caractéristiques de RAIES
(sauts quantiques)

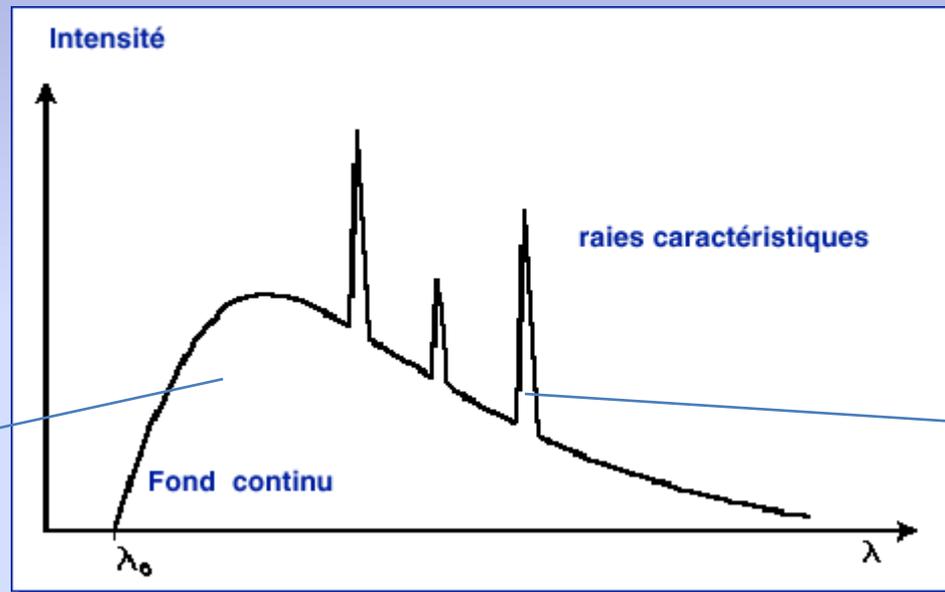
Interaction $e^- - \text{noyau}$



Spectre CONTINU

Spectre des Rayons X

L'émission des RX est la conséquence des interactions qui se produisent entre les électrons rapides et les particules du métal (anode^{***}) dans lequel ils pénètrent



Spectre continu

Spectre caractéristique

******* Anode en Tungstène Numéro atomique élevé (74) offrant **une fort probabilité d'interaction avec les électrons** Incidents et le cortège électronique cible et résistant à la chaleur dégagée lors du rayonnement

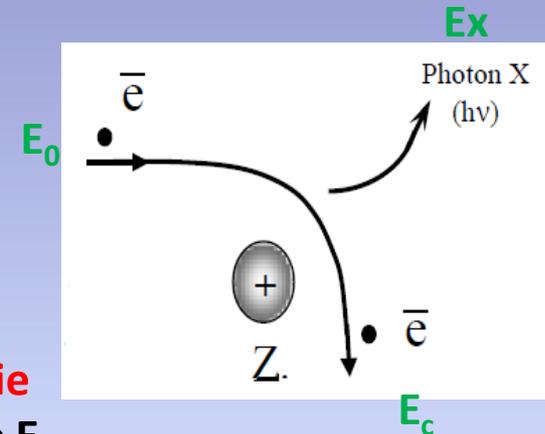
Rayonnement X de freinage

✓ L'électron incident arrive sur la cible, avec une énergie cinétique E_0

✓ Il s'approche du noyau d'un atome, qui le dévie du fait de sa charge positive qui l'attire.

L'électron est donc ralenti → L'électron perd de l'énergie et aura une énergie finale E_c

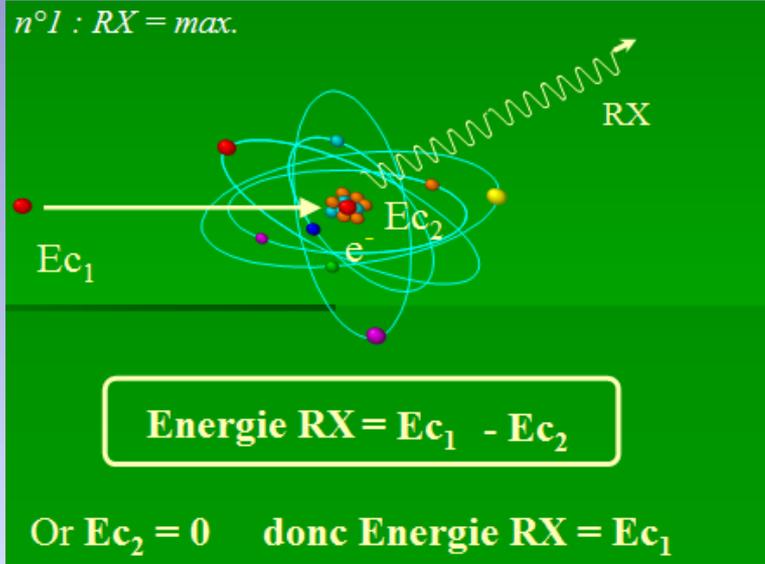
L'énergie des photons X émis est : $E_x = E_0 - E_c = h\nu$



✓ L'énergie de freinage est dégagée sous forme d'un photon X ou de chaleur si l'énergie est faible.

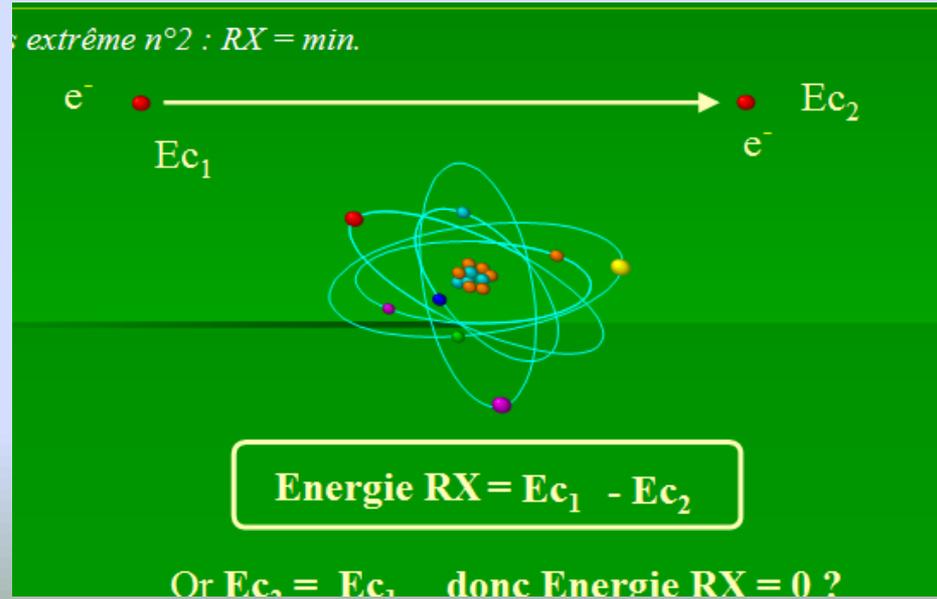
✓ L'électron continue sa course sur une autre trajectoire ayant été dévié par le freinage, jusqu'à l'atome suivant où il produira un autre photon X

Cas extrêmes



← L'électron subit un **freinage complet** $h\nu = E_0 = e.U$

L'électron passe sans aucune perte d'énergie : **aucun photon X émis.**



Spectre continu théorique



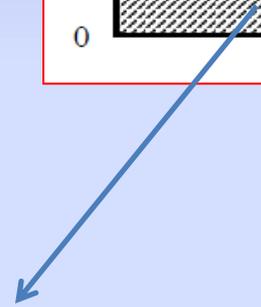
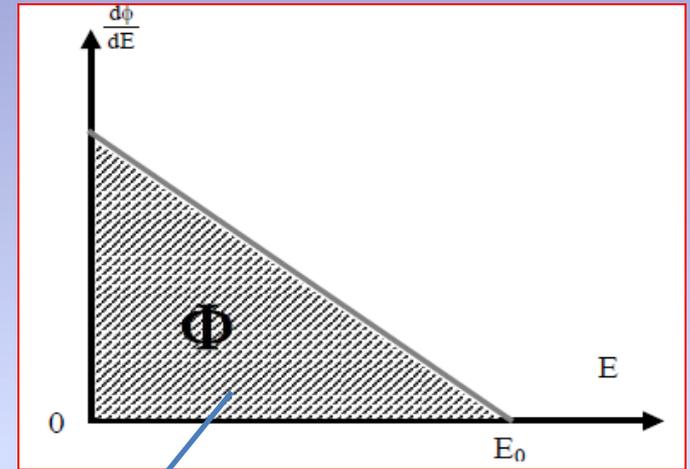
Le spectre théorique d'énergie du rayonnement de freinage est un spectre continu défini par la fonction :



$$\frac{d\Phi}{dE} = f(E)$$

Avec : $\Phi = K.I.Z.U^2$

Z : numéro atomique du matériau de l'anode
I : intensité du courant dans le tube RX (courant anodique)
K : constante

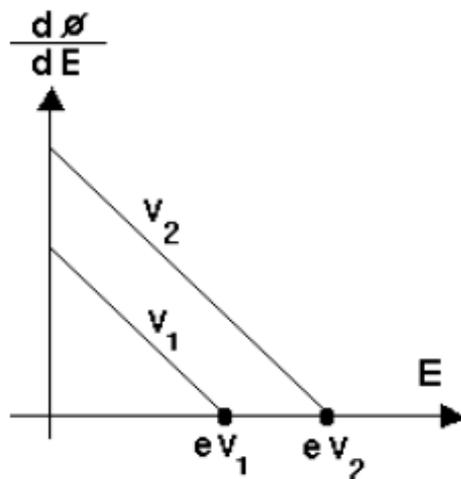


Le flux total Φ , représenté par la surface sous le spectre

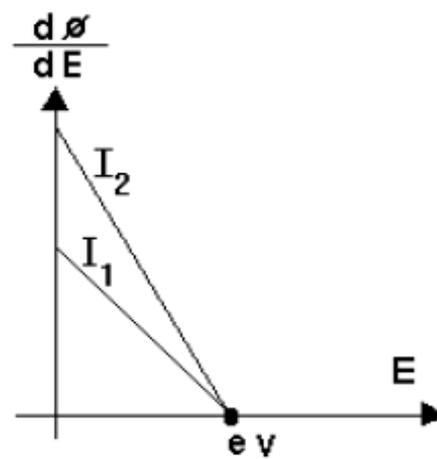
Variation du flux Φ en fonction de U, I et Z



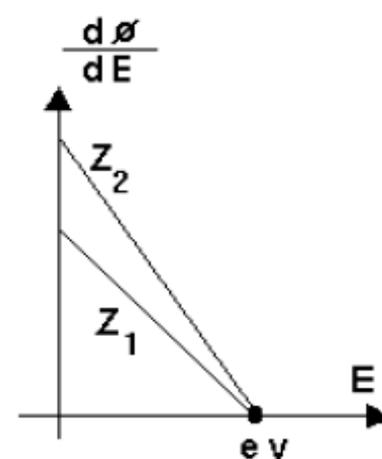
1. L'énergie cinétique des électrons émis (U)
2. Le flux des électrons incidents ou du courant anodique I
3. La nature de la cible, c'est à dire son numéro atomique Z.



Z et I sont fixés
V varie ($V_2 > V_1$)



Z et V sont fixés
I varie ($I_2 > I_1$)

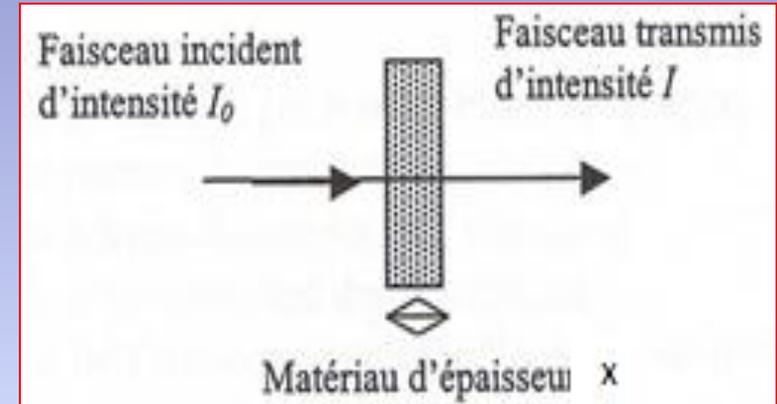


V et I sont fixés
Z varie ($Z_2 > Z_1$)

Atténuation des rayons X

$$I = I_0 \cdot e^{-kx}$$

avec k coefficient d'atténuation linéaire
qui dépend :
de l'atome de la cible (Z)
de sa densité ρ de l'énergie des photons

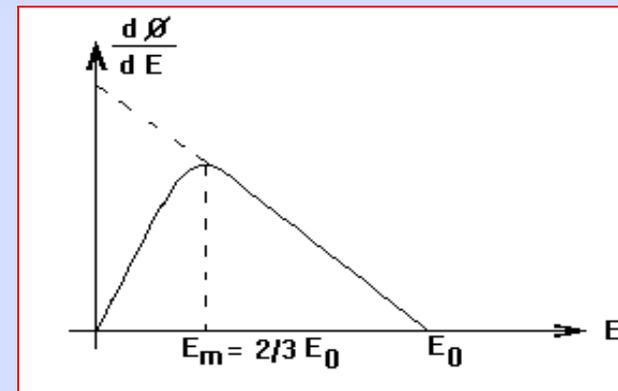


Atténuation des photons X

- La cible elle-même
(phénomène d'auto-absorption)



- La paroi du tube RX et son enveloppe



Spectre continu réel

Rendement d'émission X de freinage

$$\rho = \frac{\Phi}{P} = \frac{K.I.Z.U^2}{I.U} = K.Z.U$$

Φ : flux émis par le tube.
P : Puissance électrique dépensée.
Z : numéro atomique

Exemple: Un tube à anode en Tungstène ($Z = 74$), fonctionnant sous une tension de 100 kV, a un rendement très faible : $\rho \approx 1\%$. Le reste de l'énergie est dissipé sous forme de chaleur

Augmenter le rendement d'un tube RX

soit choisir une anticathode de numéro atomique **Z élevé**,
Le Tungstène ($Z = 74$), dont le point de fusion est voisin de 3.000°C se révèle être le meilleur élément

soit **augmenter la tension U**, mais ceci déplace les spectres du côté des fortes énergies rendant le rayonnement X plus pénétrant et diminuant ainsi la qualité des images radiologiques.

L'absorption des rayons X est proportionnelle au nombre d'électron (Z).

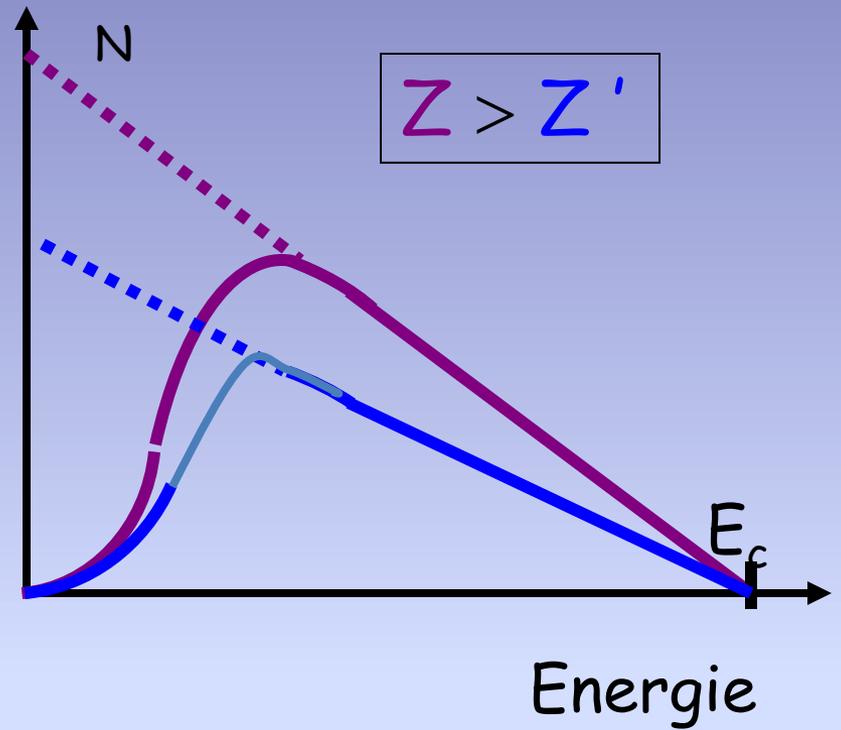


Application radiographie



✓ les éléments sont lourds (Z) sont plus absorbés Ex Os (Ca, P), Pb

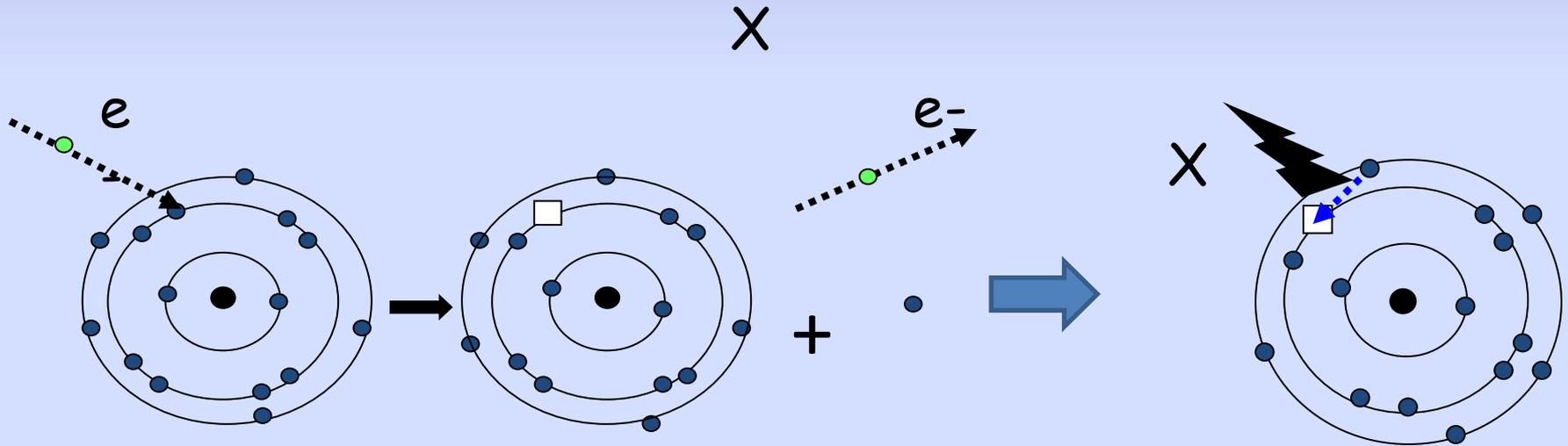
✓ Les tissus (C,O,N) sont transparents



Spectre caractéristique de raies

❖ Les **collisions** des électrons **incidents** avec les **électrons de l'anode** aboutissent à des **ionisations**. L'atome qui a perdu un électron d'une couche profonde possède un excès d'énergie, le retour à l'état fondamental se fait alors par émission d'un ou plusieurs photons X

❖ Durant ce réarrangement un photon X d'énergie caractéristique de la transition est émis. Souvent le réarrangement se fait avec plusieurs électrons, plusieurs raies** X sont donc émises.

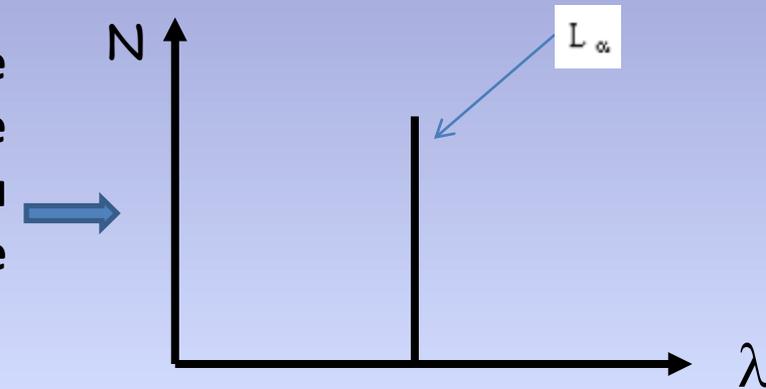


**1 Raie = réarrangement du cortège

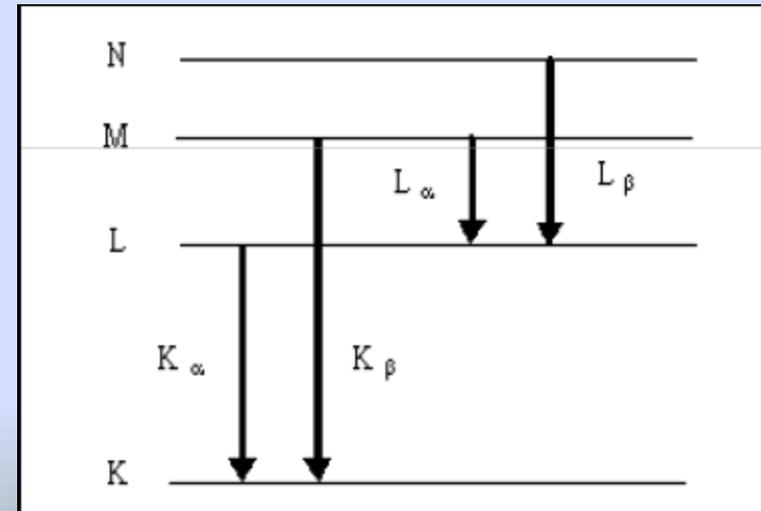
- ❖ Un électron de la couche M va descendre occuper la case vide de la couche L. Emission d'un photon X emportant la différence d'énergie entre les 2 niveaux

$$E(X) = E_M - E_L$$

- ❖ L'énergie du photon X est quantifiée. Le spectre correspondant à cette situation particulière comporte une **raie caractéristique** de la nature du matériau dans lequel a eu lieu l'interaction de l'électron initial et dépend de E_M et E_L

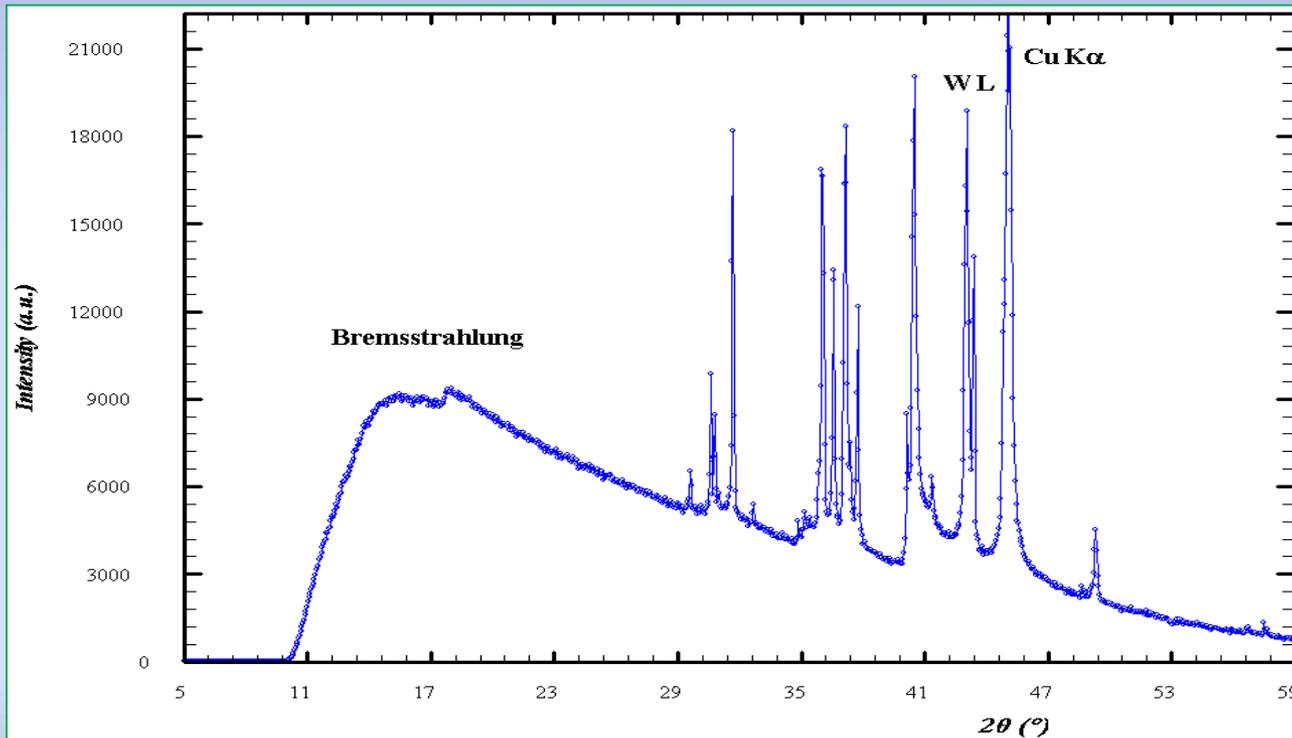


Les raies émises ont une appellation lettre latine / lettre grecque
 Lettre latine : couche d'arrivée de l'électron (K L M N...)
 Lettre grecque : numérotation relative de la couche de provenance de l'électron
 α couche immédiatement supérieure
 β 2 couches au dessus
 γ 3 couches au dessus



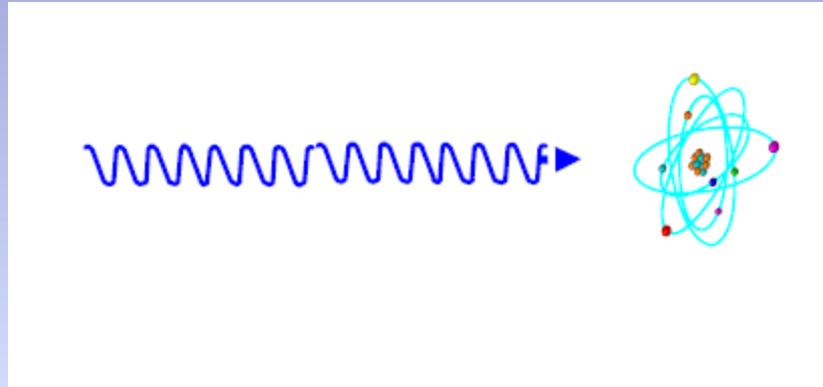
Spectre global des RX

Le spectre **global** résulte de la **superposition** du **spectre continu** du rayonnement de freinage (qui est **prédominant**) et du **spectre de raies**.



Spectre de rayons X
(anode Cu)

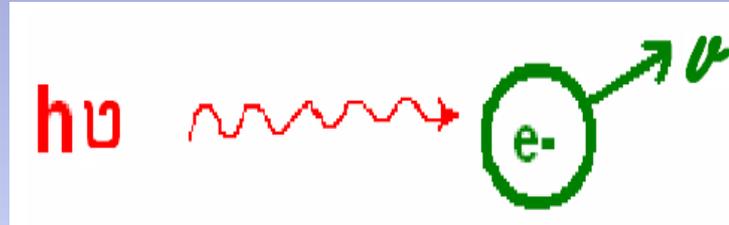
5. Interaction rayonnement avec la matière



Cette interaction dépend de :

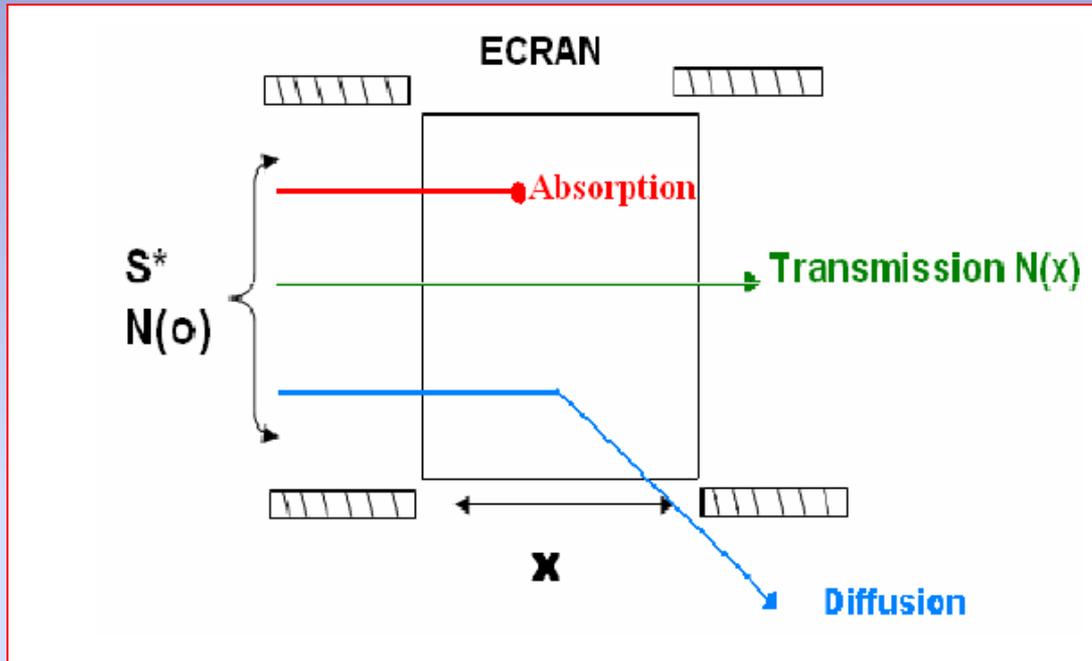
- **la nature du rayonnement.**
- **l'énergie de ce rayonnement.**
- **la nature de la matière traversée.**

Interactions des photons avec la matière (RX et $R\gamma$)



- ✓ Les RX et $R\gamma$ ont le même comportement vis-à-vis de la matière.
- ✓ Lorsqu'un faisceau de photons traverse un matériau, il interagit, d'une manière **aléatoire**, avec les atomes de ce matériau et en ressort atténué.
- ✓ Cette **atténuation** est due à la fois à une **diffusion**, c'est à dire à un changement de direction des photons incidents, et à une **absorption**, c'est à dire un transfert de l'énergie des photons incidents au matériau traversé.

Loi d'atténuation



✓ Soit N_0 le nombre total de photons arrivant sur l'écran par unité de surface. Soit $N(x)$ le nombre de photons ayant traversé une épaisseur x de l'écran sans être atténués, c'est à dire ni réabsorbés ni diffusés, on les appelle les photons transmis.

(Faisceau transmis)



$$N(x) = N(0)e^{-\mu x}$$

μ est le coefficient d'atténuation linéique



probabilité d'interaction par unité de longueur, son unité est le cm^{-1}

Exemple

Un filtre de cuivre de 1 mm d'épaisseur placé sur la fenêtre d'un tube à rayons X transmet 10 % d'un faisceau de photons d'énergie 10 keV.

- Calculer le coefficient d'atténuation linéique.

coef linéique d'atténuation μ

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\mu x}$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = \ln(e^{-\mu x})$$

$$\mu = -\frac{1}{x} \ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$$

$$N = \frac{N_0}{10}$$

$$x = 0,1 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \mu = -\frac{1}{0,1} \ln\left(\frac{N_0/10}{N_0}\right)$$

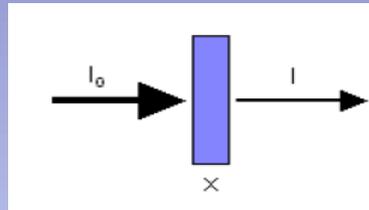
$$\Rightarrow \mu = -\frac{1}{0,1} \ln\left(\frac{1}{10}\right) = 10 \ln(10) = 10(\ln 2 + \ln 5)$$

$$\Rightarrow \mu = 10(0,7 + 1,6)$$

$$\mu = 23 \text{ cm}^{-1}$$

✓ De même, si $I(0)$ = intensité du rayonnement à l'entrée de l'écran (x)

$$I(x) = I(0) e^{-\mu x}$$



✓ μ est **caractéristique** de l'énergie du rayonnement et du matériau considéré.

✓ On utilise souvent **coefficient massique d'atténuation μ/ρ** ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$ ou en $\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$) qui est indépendant de l'état physique du matériau

✓ Ainsi on peut, par interposition d'écran, **atténuer un** faisceau de photons mais **jamais l'arrêter complètement**.

✓ Si le faisceau **traverse plusieurs milieux** de coefficients d'atténuation différents : $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_i$, sur des épaisseurs $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$, le nombre de rayons émergents est

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3 + \dots + \mu_i x_i)}$$

Exemple

Soit un tube à Rayon X, on place, devant ce dernier, un filtre constitué d'une plaque d'aluminium et d'une plaque de cuivre, d'1mm d'épaisseur chacune. Ce filtre permet le passage 35 % d'un faisceau de photons d'énergie égale à 50 keV.

On donne $\mu_{\text{Cu}} = 0,69 \text{ mm}^{-1}$

Calculer le coefficient d'atténuation d'aluminium μ_{Al} ?

on sait que $I = I_0 e^{-(\mu_{\text{Cu}} x_{\text{Cu}} + \mu_{\text{Al}} x_{\text{Al}})}$

avec $x_{\text{Cu}} = x_{\text{Al}}$

$$\Rightarrow \mu_{\text{Al}} = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) - \mu_{\text{Cu}}$$

$$\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{35}{100} = 0,35$$

$$\Rightarrow \mu_{\text{Al}} = -\ln(0,35) - 0,69$$

$$\mu_{\text{Al}} = 0,345 \text{ mm}^{-1}$$

Couche de demi atténuation (CDA)



Epaisseur de matière traversée qui atténue de **moitié** l'**intensité** du rayonnement

$$I_{\text{CDA}} = I_0/2$$

$$I_{\text{CDA}} = I_0 e^{-\mu (\text{CDA})} = I_0/2$$

$$2 = e^{\mu (\text{CDA})} \rightarrow \text{Ln } 2 = \mu (\text{CDA})$$

$$\text{CDA} = \text{Ln } 2 / \mu = 0.693/\mu \rightarrow \text{cm}$$

Exemple: Le coefficient d'absorption linéique du Plomb est de $0,79 \text{ cm}^{-1}$, pour des photons de 1 MeV. Calculer la CDA?



$$\text{CDA} = \ln 2 / \mu = \ln 2 / 0,79 = 0,877 \text{ cm}$$

Applications:

- Le plomb est utilisé en médecine nucléaire, radiologie et radiothérapie pour la protection contre les rayonnements ionisants.
- Pour chaque type de rayonnement, on précise l'énergie et la CDA

Les interactions élémentaires

L'atténuation du faisceau de photons X et γ se fait selon **plusieurs mécanismes**. Seuls **trois types** d'interaction sont **d'intérêt** dans l'application **médicale**

Effet Photoélectrique

Effet Compton

Effet de Matérialisation

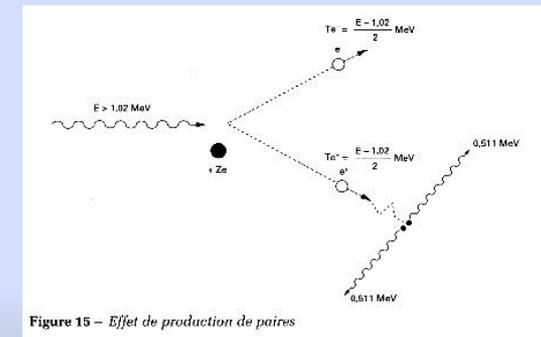
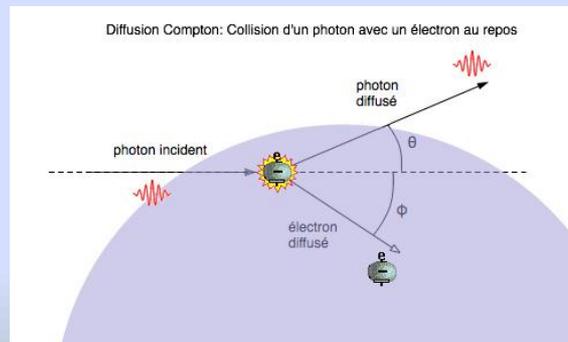
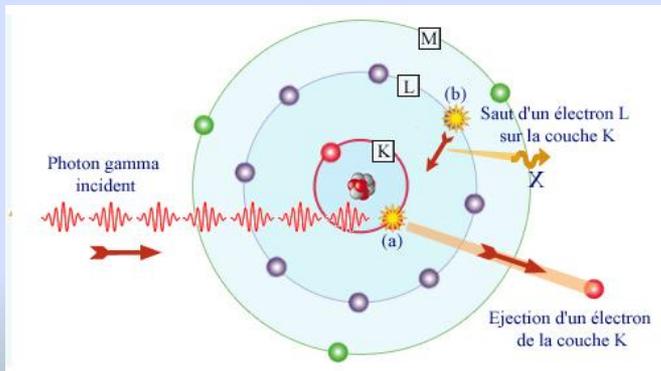
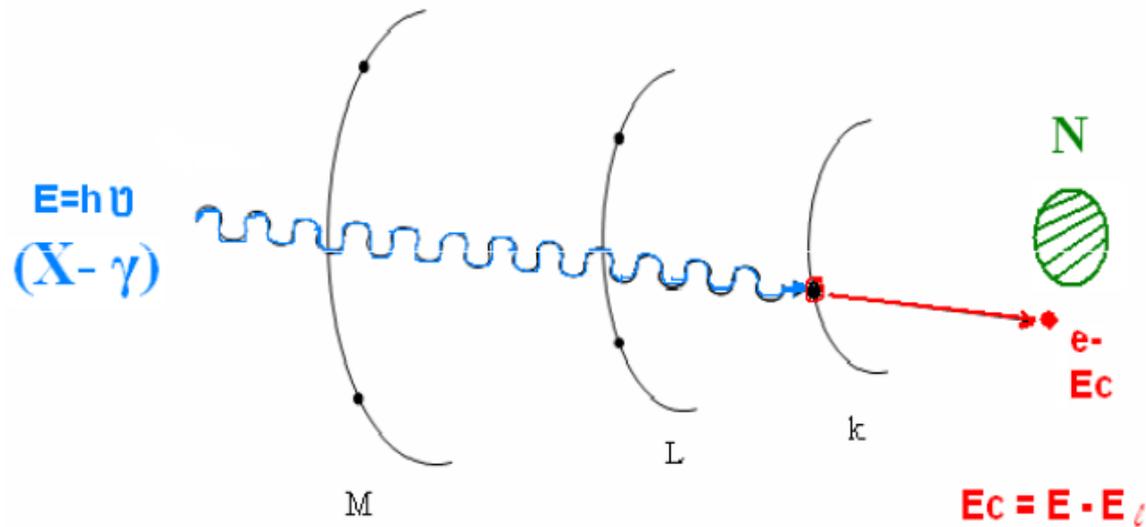


Figure 15 – Effet de production de paires

a. Effet photoélectrique

- * Phénomène primaire : e- lié.
Photon disparaît.



E_l = énergie de liaison

L'énergie $E = h\nu$ du photon sert à :

- extraire l'électron de sa couche.
- communiquer à l'électron une E_c .

Conditions



✓ Cet effet ne se produit que si l'énergie E du photon est supérieure à l'énergie E_I de liaison de l'électron

$$(E > E_I)$$

✓ électron **lié** du cortège électronique de la cible

*Phénomène secondaire

❖ L'électron expulsé épuise son énergie en **ionisation et excitation**.
L'énergie E_c est donc totalement absorbée dans la cible

❖ Il laisse une place vacante et il y a par conséquent un réarrangement électronique

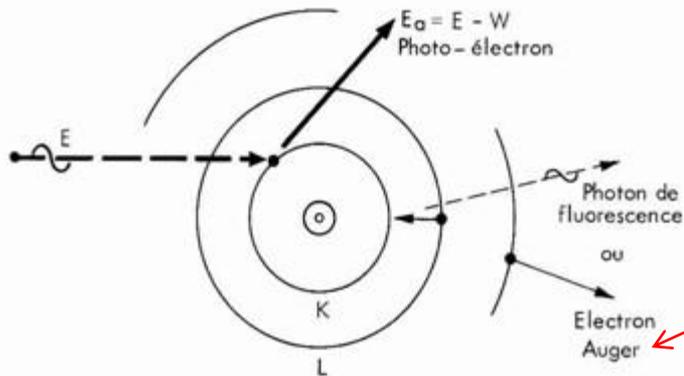
Cette place vacante va être comblée
par un électron d'une couche plus externe.



Libération d'énergie

$Z \uparrow \uparrow$ (plomb)

Être absorbés secondairement



EFFET PHOTO - ELECTRIQUE

Coefficient d'atténuation (τ)



- ✓ τ est le coefficient linéaire lié à l'effet photoélectrique
- ✓ τ/ρ est le coefficient d'atténuation massique

Relation approchée de Bragg et Pierre →

$$\frac{\tau}{\rho} \propto k \cdot \frac{Z^3}{E^3}$$

- k est une constante qui ne dépend pas du matériau
- ρ est la masse volumique et Z est le numéro atomique de l'écran (cible)

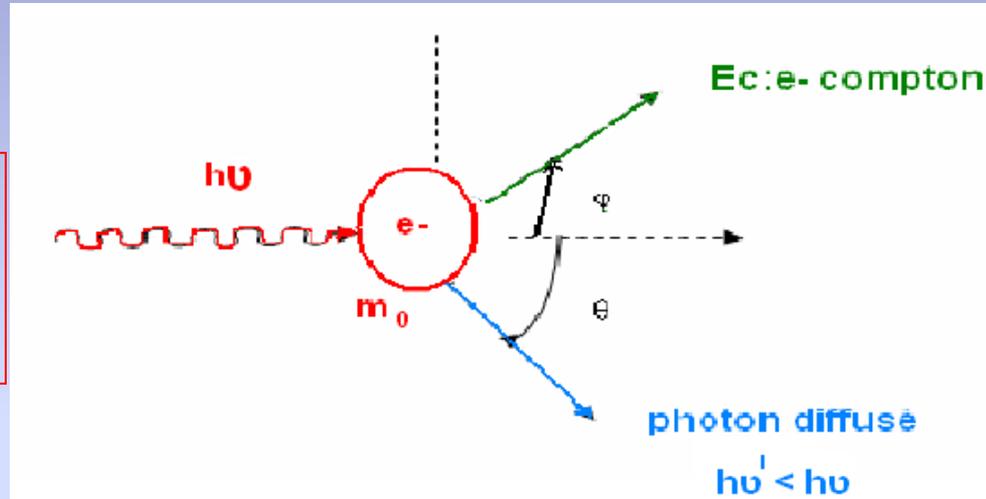
L'effet photoélectrique est **important** surtout pour les **éléments lourds** et les **photons peu énergétiques**.

b. Effet Compton



Le photon incident interagit avec un électron **libre** ou **faiblement lié** d'un atome

L'énergie du photon incident est partagée entre le **photon diffusé** et l'**électron Compton**



Bilan énergétique



$$\frac{1}{E_{\text{diff}}} - \frac{1}{E_i} = \frac{1 - \cos\theta}{m_0 c^2}$$

$$0 \leq \varphi \leq 90^\circ$$

$$0 \leq \theta \leq 180^\circ$$

Relation de Compton-Debye



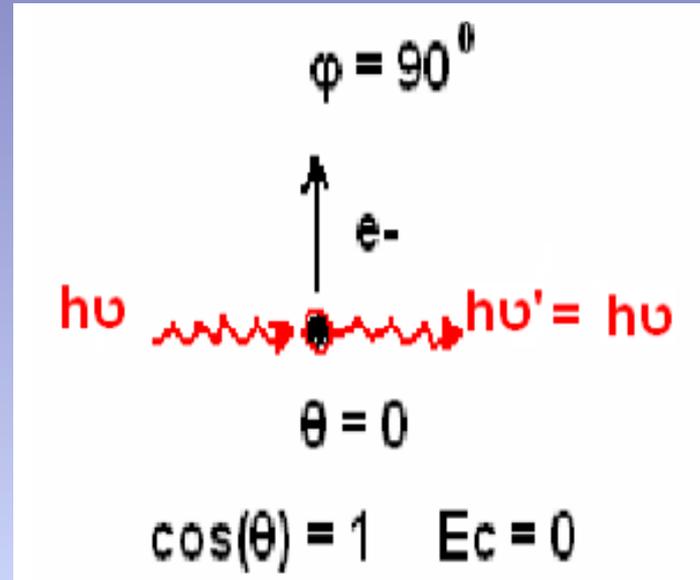
$$\lambda_{\text{diff}} - \lambda_i = \frac{h}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)$$

1. Choc tangentiel ($\theta=0$)



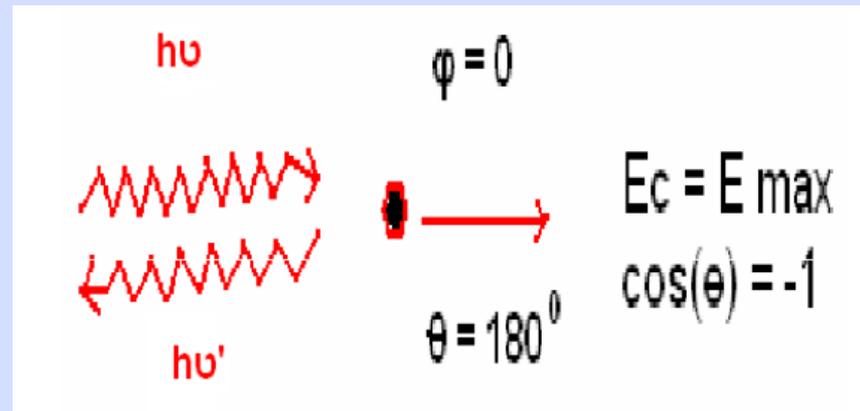
(Diffusion rasante)

le photon garde sa Trajectoire et toute son énergie



2. Rétrodiffusion ($\theta = 180$)

En cas de choc frontal, l'énergie cédée à l'électron est maximum, celle du photon diffusé est minimum et il retourne



Coefficient d'atténuation (σ)

✓ σ est le coefficient d'atténuation linéaire de l'effet Compton

✓ σ/ρ est le coefficient d'atténuation massique



{ Indépendant de Z
↓ Lentement quand E ↑

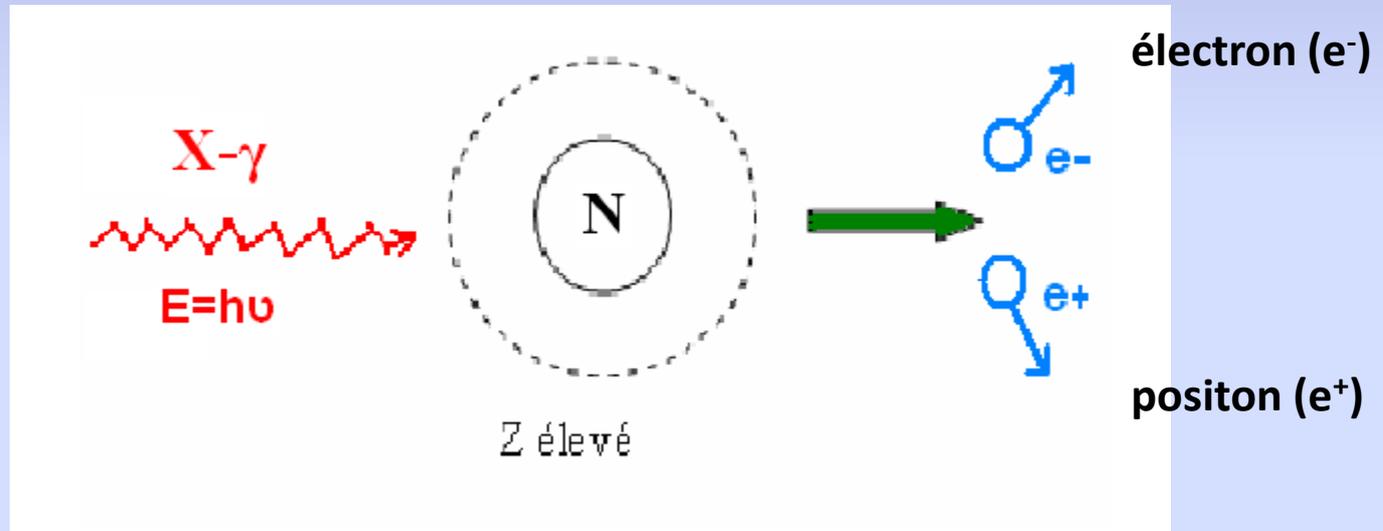
L'effet Compton existe, mais il reste **peu probable** lorsque **Z est élevé**

c. Effet de Matérialisation (création de paires)

Le processus se produit pour des photons
très énergétiques

$$h\nu \geq 1,022\text{MeV}$$

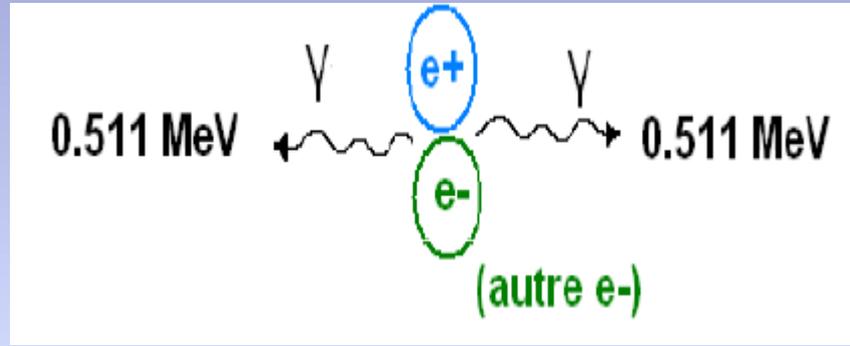
passant à
proximité d'un
noyau



$$E = 2m_0 c^2 + E_{ce1} + E_{ce2}$$

**Conséquences :

- l'électron (e^-) perd son E_c en excitation/ionisation.
- L'e positon (e^+) s'annihile en rencontrant un électron libre de la matière



Coefficient d'atténuation (π) \longleftrightarrow Probabilité d'interaction par production de paire

$\pi = 0$ lorsque $E < 1,022 \text{ MeV}$

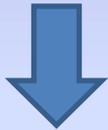
Importance relative des interactions élémentaires

✓ Le coefficient d'atténuation global μ résulte de ces trois effets

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x} = N_0 e^{-\tau x} e^{-\sigma x} e^{-\pi x}$$



$$\mu = \tau + \sigma + \pi$$



Dans l'eau :

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\pi}{\rho}$$

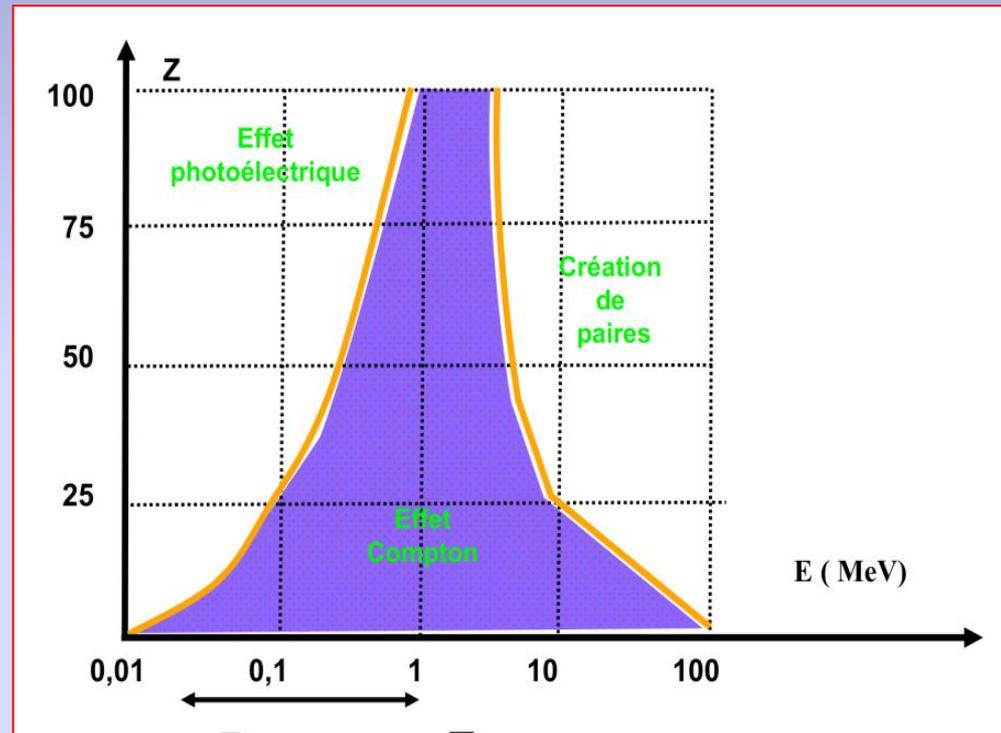
Energie incidente E	Effet prédominant
$E < 50 keV$	Photoélectrique
$50 keV < E < 20 MeV$	Compton
$E > 20 MeV$	Création de paires

Probabilité de l'un des effets en fonction de Z et E

▪ Faibles énergies (< 100 keV) l'effet Photoélectrique est largement prédominant

▪ Energies moyennes (100 à quelques MeV), l'effet Compton est prédominant

▪ Energies élevées (> 5 MeV), la matérialisation est l'effet prédominant.



Exemple

Soit un rayonnement d'énergie $E=1\text{MeV}$ passant dans un **milieu aqueux**, quelle est l'effet dominant dans cette situation?

- ✓ un milieu biologique a un Z de 10, en se reportant au graphique on remarque bien que **l'effet Compton** est celui dominant.
- ✓ la production de paires n'est possible qu'à partir d'une énergie de $1,02\text{MeV}$, ici **l'effet prédominant est l'effet Compton.**

Exemple

Pour réaliser une mammographie, on utilise des rayons . d'énergie $E=20$ keV .On sait que 3 cm de tissu mammaire arrêtent 78% de ces photons par effet photo-électrique

1. Calculer le coefficient d'atténuation par effet photo-électrique du tissu mammaire pour ces photons.

2. Le coefficient d'atténuation global de ce tissu pour ces photons est $\mu_{\text{tissu}} = 0,71 \text{ cm}^{-1}$

Calculer le coefficient d'atténuation par effet-Compton de ce tissu pour ces photons.

$$\mu = \tau + \sigma + \pi$$

$$\pi = 0$$

$$I(x) = I(o) e^{-\mu x}$$

Interactions des particules chargées avec la matière

I- Cas général → Particule chargée quelconque



➤ Interaction obligatoire avec les **électrons** des atomes de la cible ou avec ses **noyaux**



Dominant jusqu'à des énergies
100 MeV dans l'eau (malade) et **10 MeV dans le plomb** (radioprotection).

A- Interaction avec un électron de l'atome cible (collision)

✓ L'énergie ΔE cédée par la particule incidente est transférée à un électron d'énergie de liaison W_l de l'atome cible.



Deux phénomènes peuvent se produire selon que ΔE est suffisante ou non pour éjecter l'électron de son orbite

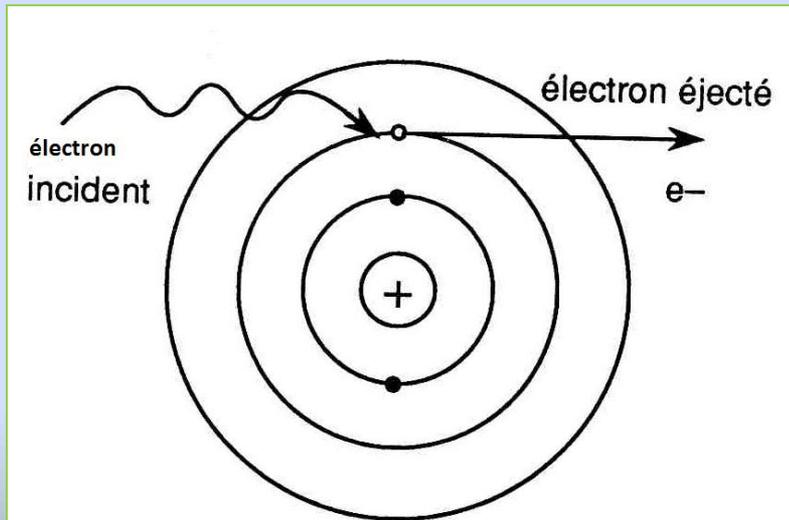


Ionisation : si $\Delta E \geq W_l$

Excitation : si $\Delta E < W_l$

Ionisation : si $\Delta E \geq W_I$

- ✓ l'électron est éjecté de son orbite avec une énergie cinétique ($\Delta E - W_I$)
- ✓ il se produit une **ionisation** de l'atome cible
- ✓ **Création d'une paire d'ions** formée par l'ion positif qui a perdu un électron et l'ion négatif qui a gagné un électron
- ✓ L'ionisation est suivie d'un **réarrangement du cortège électronique** avec émission de fluorescence X.



Ionisation



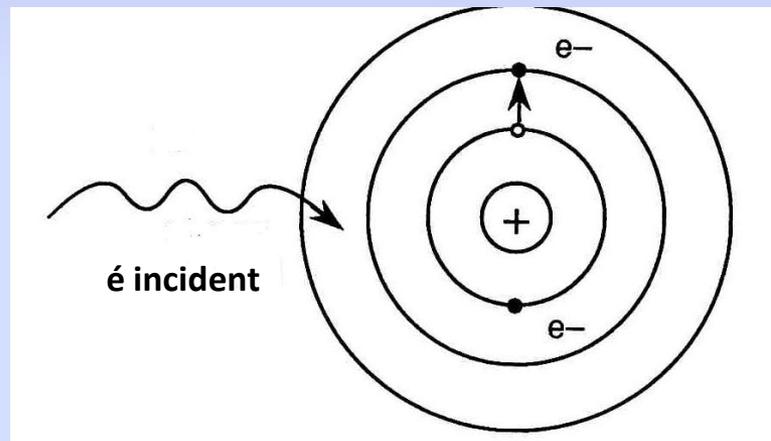
Mécanisme fondamental pour les effets biologiques des rayonnements

Exemple

Dans le cas de l'eau, une **ionisation** nécessite un transfert d'énergie ΔE au moins égal à 16 eV. Mais pour une ionisation, se produisent environ trois excitations qui représentent un transfert d'énergie d'environ 16 eV. Les transferts d'énergie, W_i , sont donc en moyenne de 32 eV par ionisation c'est-à-dire par paire d'ion créée. Dans l'air, cette énergie moyenne, W_i , est de 34 eV.

Excitation : si $\Delta E < W_I$

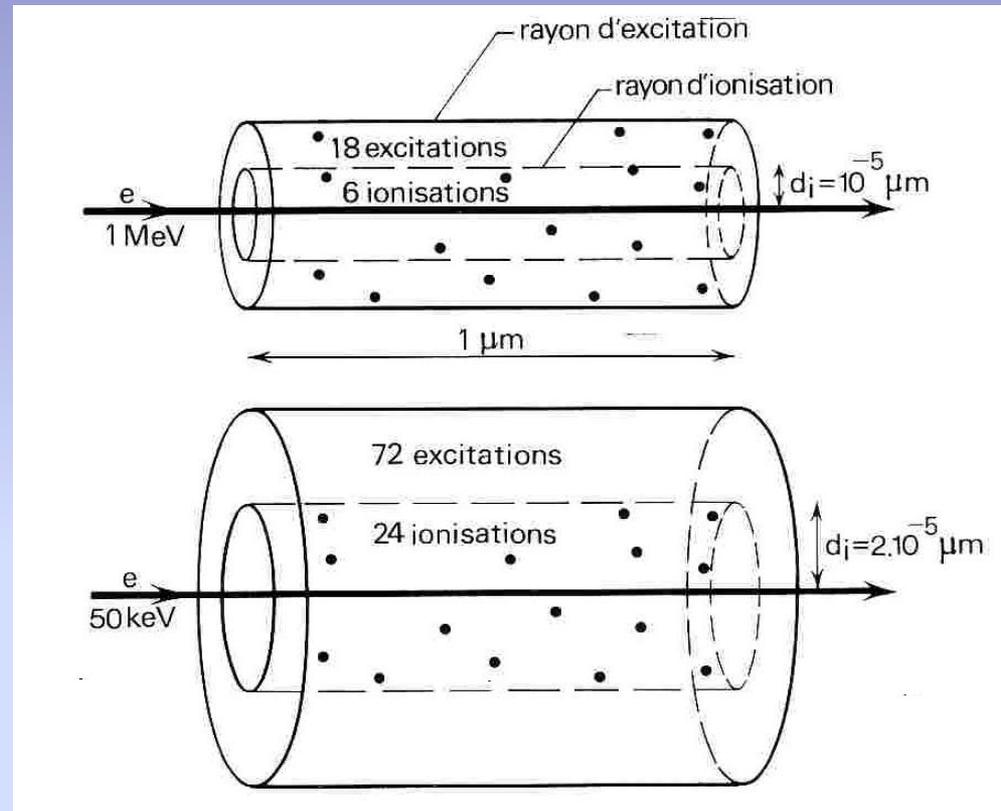
- ✓ Le transfert d'énergie ΔE ne **peut produire aucune ionisation** mais porte l'électron à un **niveau énergétique supérieur**, avec **excitation** de l'atome cible
- ✓ L'énergie transférée est secondairement dissipée sous la forme d'une émission électromagnétique peu énergétique



- ✓ Si ΔE est très faible: il y a **dissipation thermique** (énergie de translation, rotation ou vibration des molécules)

Répartition entre ionisations et excitations

Distribution des ionisations et excitations dans l'eau pour 1 électron de 1 MeV et 50 keV



A 50 keV la vitesse est plus faible, l'interaction est plus forte => il y a plus d'ionisations

Quantification de l'énergie transférée : notion de TEL et DLI

1. Transfert d'énergie linéique ou (TEL)



- ✓ Le TEL est la quantité d'**énergie transférée** au milieu cible par la particule incidente par **unité de longueur** de trajectoire.



$$\text{TLE} = \frac{dE}{dx}$$



Le TLE s'exprime en **keV.μm⁻¹**

- ✓ Pour des particules de vitesse faible devant la lumière on a :

$$\text{TLE} = K \frac{z^2}{v^2} nZ$$

- k = constante
- z = charge de la particule incidente
- n = nb d'atomes de la cible par unité de volume
- Z = numéro atomique de la cible
- v = la vitesse de la particule incidente

2. Densité Linéique d'ionisation (DLI)



✓ On appelle DLI le **nombre de paires d'ions** créés par la particule incidente par **unité de longueur**.

✓ Unité= (paires d'ions) μm^{-1}

$$\text{DLI} = \frac{\text{TLE}}{W_i}$$



W_i = énergie moyenne transférée pour chaque ionisation

Exemple

On considère un faisceau d'électron d'énergie **200 keV**.

Sachant que la distance parcourue dans le platine par ce faisceau est de **5 μm** , calculer le TEL du platine pour ce faisceau.

$$\text{TEL} = \frac{E}{d}$$

$$d = 5 \mu\text{m}$$

$$E = 200 \text{ keV}$$

$$\text{TEL} = \frac{E}{d} = \frac{200}{5} = 40$$

$$\text{TEL} = 40 \text{ keV}/\mu\text{m}$$

Exemple

Des particules α de 8,1 MeV ont un parcours de 54 mm dans du néon. On considère que l'énergie moyenne de formation d'une paire d'ion dans le néon est de 50 eV.

$$\text{TEL} = \frac{E}{d}$$

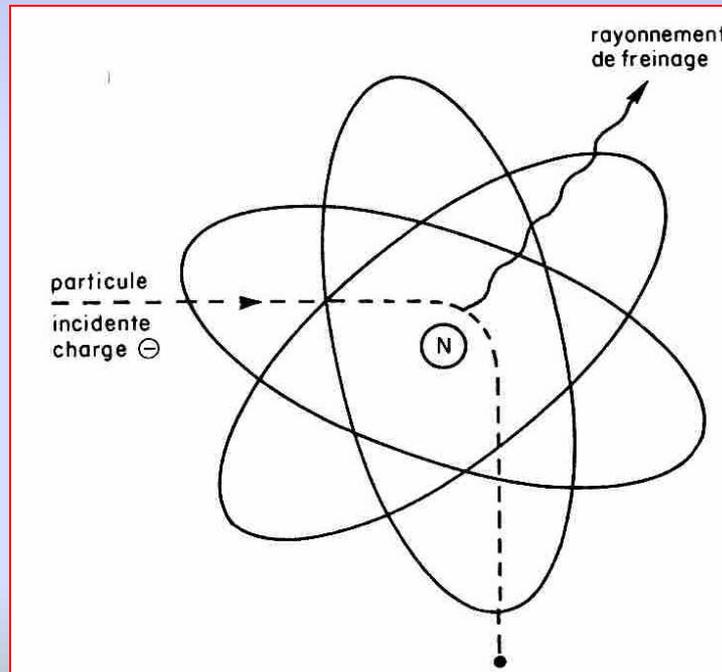
$$d = 54 \text{ mm}$$
$$E = 8,1 \text{ MeV}$$

$$\text{TEL} = 150 \text{ keV/mm.}$$

$$\text{DLI} = \frac{\text{TLE}}{W_i}$$

B. Interaction avec le noyau de l'atome cible

Quand les particules chargées passent à proximité du noyau d'un atome de la cible, leur trajectoire est déviée. Ceci entraîne une perte d'énergie cinétique, émise sous la forme de RX dit **rayonnement de freinage**.



II- Cas de particules chargées légères

électrons (négatons et positons)

- ✓ Les électrons en **mouvement rapides** sont obtenus par :
- l'émission β des radioéléments
 - des accélérateurs d'électrons
 - la projection d'électrons secondaires par des photons X ou γ . (Auger)

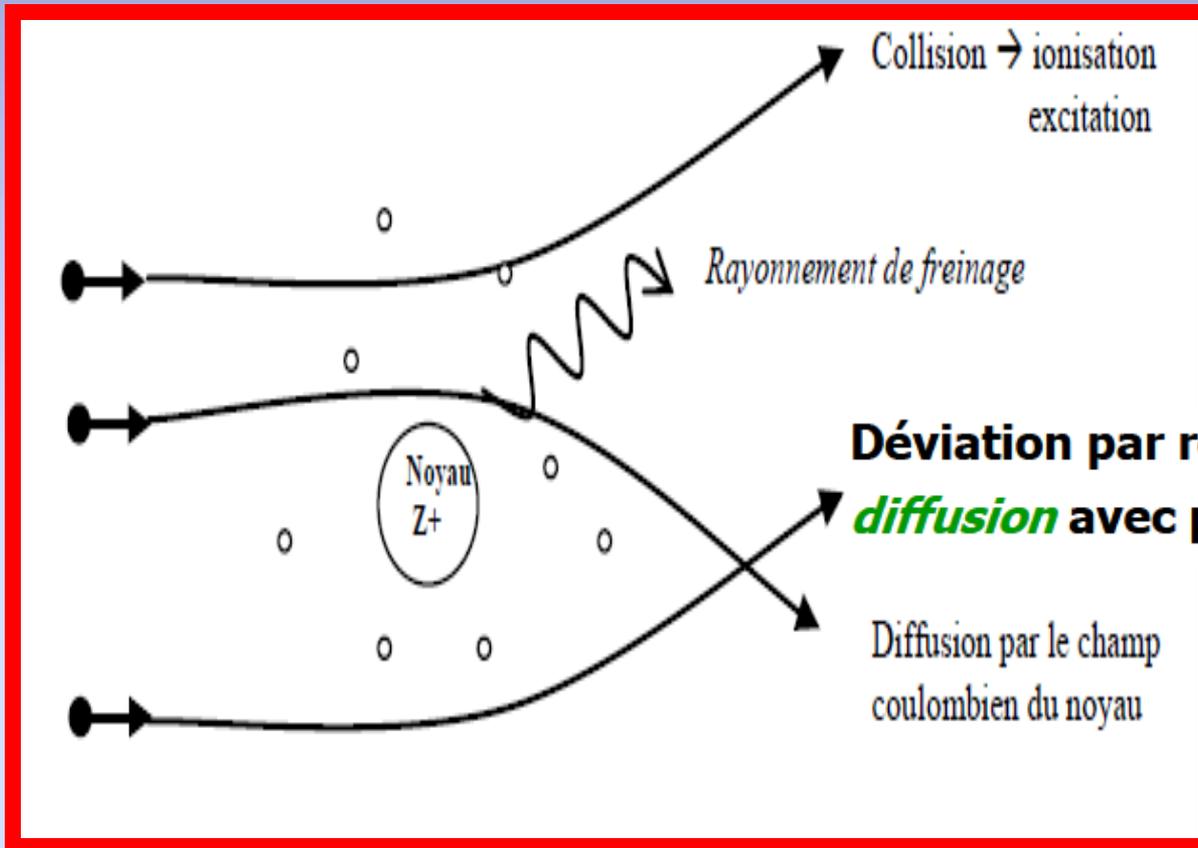
E_c quelques keV
à quelques MeV

- ✓ Le processus d'interactions des Particules chargées légères avec les électrons est dominant /celui noyaux jusqu'à des énergies :

- $E \approx 100$ MeV dans l'eau,
- $E \approx 10$ MeV dans le plomb

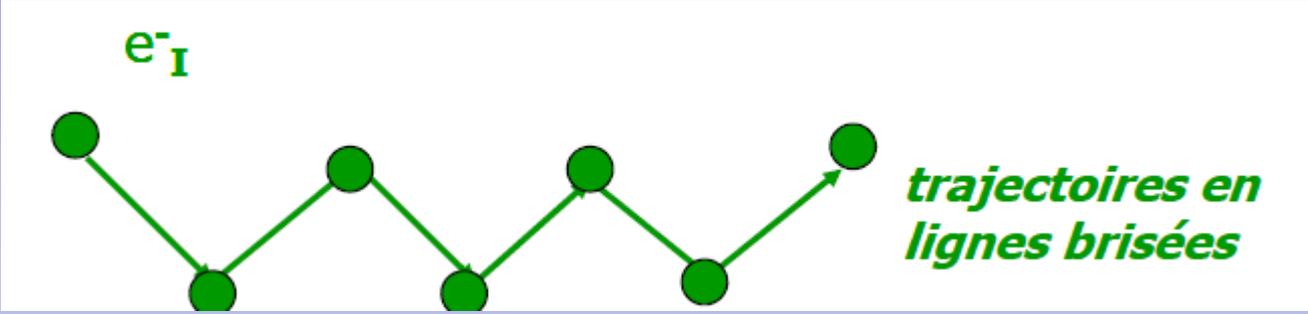
Dans l'eau pour des E de 500 KeV à MeV \longrightarrow **TLE $\approx 0,25$ KeV / μ m**

Modes d'interaction des particules chargées légères avec la matière



Déviation par répulsion coulombienne :
***diffusion* avec perte d'énergie importante**

✓ Les trajectoires des particules sont des lignes brisées.



✓ Dans l'eau la somme des longueurs de tous les segments de la trajectoire est donnée par:

$$\text{longueur (cm)} = (\text{énergie initiale de la particule en MeV})/2$$

✓ profondeur de pénétration moyenne



La distance qui sépare le point d'entrée de la particule dans le milieu cible, du point terminal de sa trajectoire

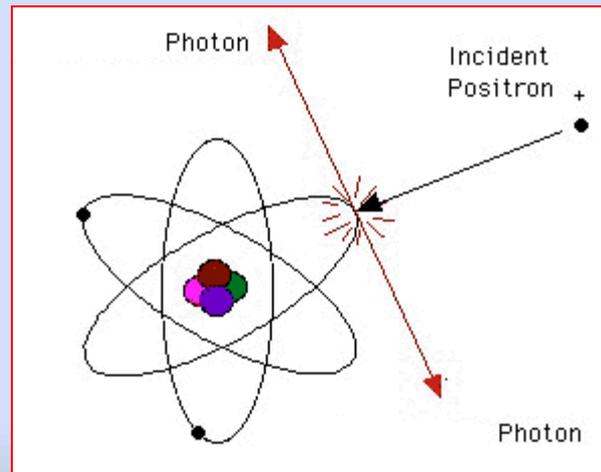
$$P_{\max} = \frac{0,215}{\rho} E(\text{MeV})^{1.66}$$



La valeur maximale de cette distance P_{\max} (cm)

Particule chargée positive (Positron)

Le **positron** a le **même** type **et caractéristiques** d'interaction avec la matière que l'é. La principale différence entre **électron** et positron est la réaction d'annihilation pour ce dernier.



Cas de particules chargées lourdes (α , p)

- ✓ Particules très lourdes \Rightarrow La masse d'un proton est environ 1840 fois plus grande que celle d'un électron
- ✓ Les transferts d'énergie sont importants
- ✓ La trajectoire est approximativement rectiligne

Dans l'eau

$$TLE \sim 150 \text{ keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

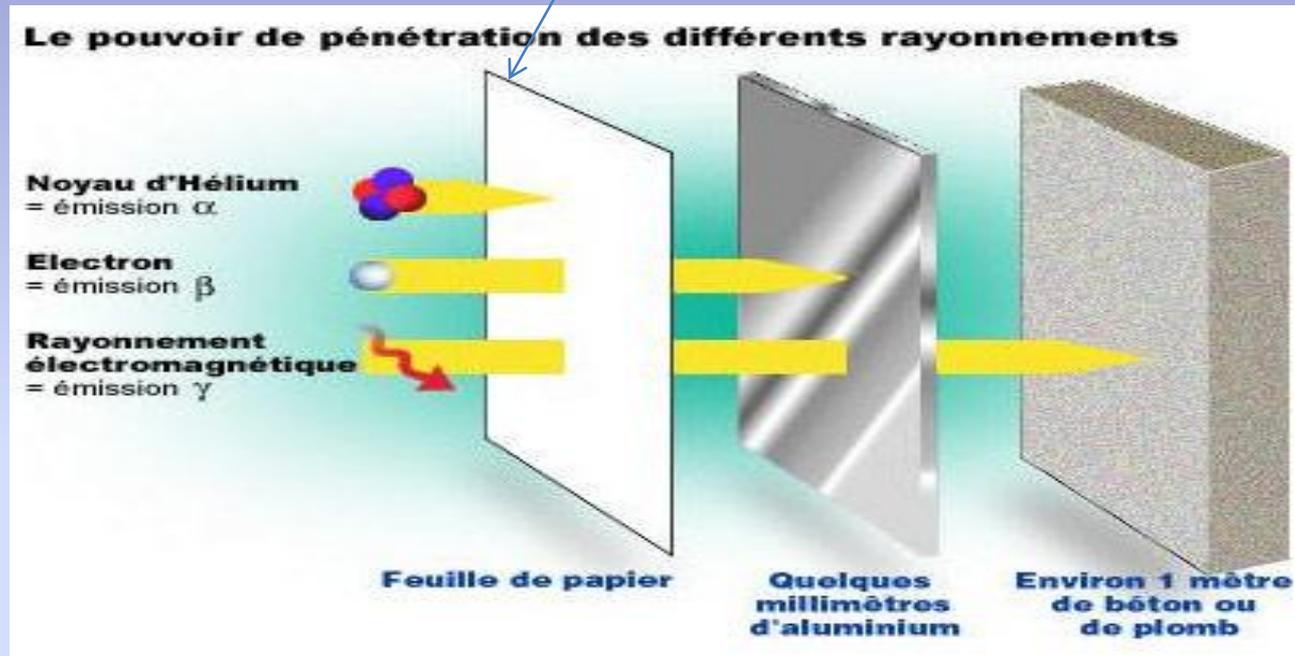
$$DLI \sim 4500 \text{ paire d'ions} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

La longueur des trajectoires, est presque égale à la profondeur de pénétration :

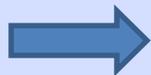
$$L(\text{cm}) = \frac{E(\text{MeV})}{1500}$$

L Ne dépasse pas quelques cm dans l'air et quelques dizaines de μm dans l'eau

➤ Ces particules sont totalement **arrêtées** par une simple **feuille de papier** ou par la couche cornée de la peau



Sans danger



Irradiation externe

Dangereuses!!



Irradiation interne

Interactions des particules neutres avec la matière (neutrons)

✓ Particules non chargées, les neutrons ont une **interaction négligeable avec les électrons**.

✓ Leur énergie cinétique est absorbée par leur interaction avec les noyaux jusqu'à leur arrêt total

✓ La probabilité d'interaction avec les noyaux est très faible en raison du diamètre de l'atome.



Les neutrons sont très pénétrants

✓ Un neutron qui a une énergie cinétique **> 1keV** est dit **rapide**, son ralentissement se fait par choc avec les noyaux.

✓ La perte d'énergie cinétique est maximale pour un noyau d'hydrogène.



l'eau est un matériau très atténuant pour les neutrons rapides

Neutrons lents



interaction avec les noyaux se traduit par l'absorption du neutron

Application de l'interaction rayonnement - matière en médecine

Intérêt double : diagnostique et thérapeutique

Diagnostique :

- Radiographie
- scanner X
- scintigraphie (gamma et TEP)

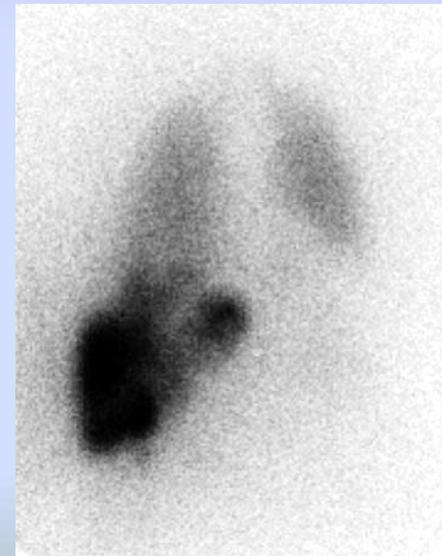
Thérapeutique :

- radiothérapie externe
- radiothérapie interne : curiethérapie

Scanner= utilisation des rayons X pour réaliser cartographie des coefficients d'atténuation de l'organisme

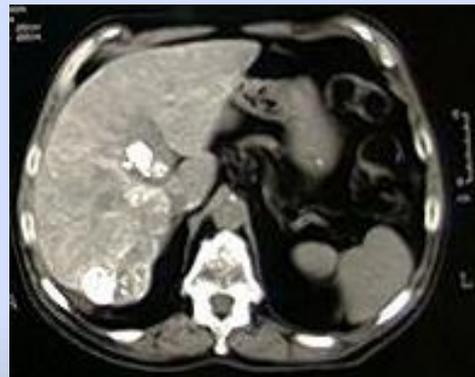
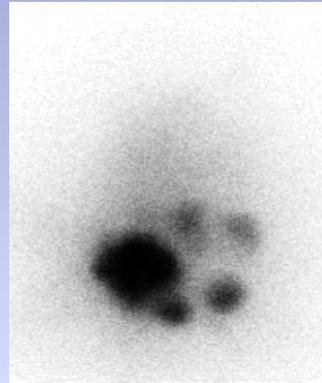
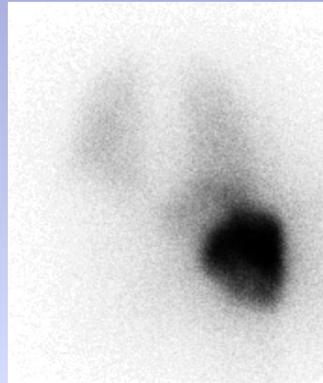
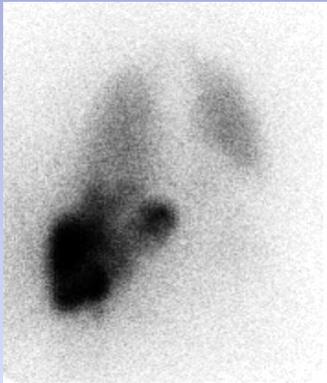


Scintigraphie: utilisation des rayons γ pour étudier une fonction de l'organisme



Radiothérapie métabolique : utilisation des rayonnements β -

Lipiodol marqué à l'iode 131 (γ de 365 kev, β - de 606 kev)



9 mois plus tard

Partie 2:

EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS ET APPLICATIONS EN MEDECINE

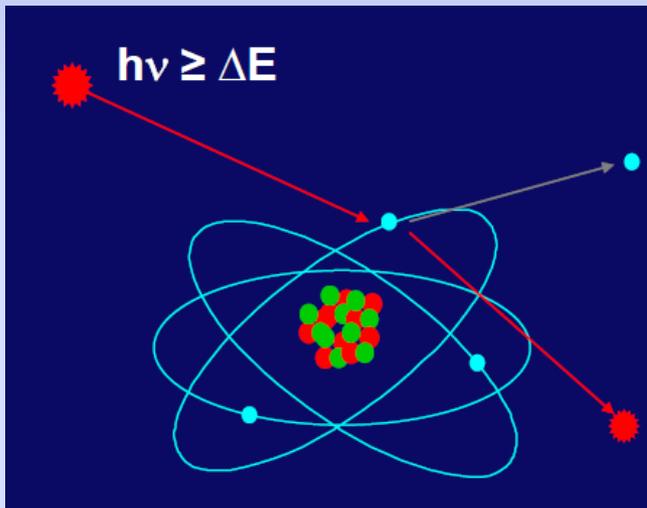
Catégorie des rayonnements

Ionisant



Non-ionisant

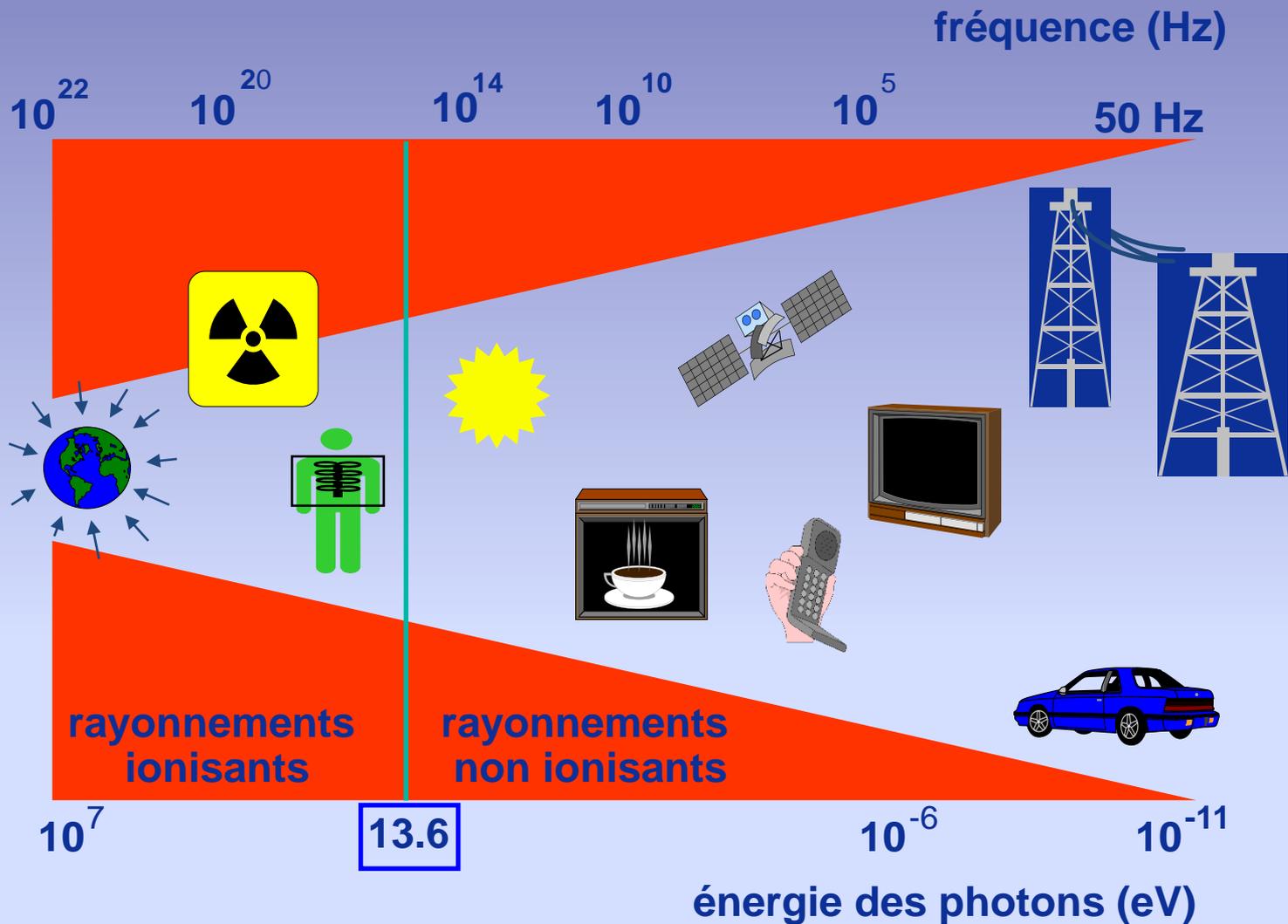
Selon leurs effets sur la matière



	ΔE
C	11,24 eV
H	13,54 eV
O	13,57 eV
N	14,24 eV

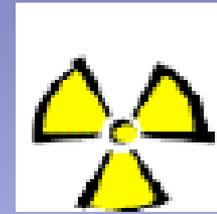
H₂O # 13,6 eV

Molécules d'intérêt biologique

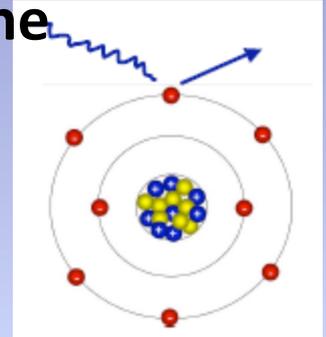


✓ Les rayonnements ionisants, comme non ionisants peuvent avoir des effets délétères, nuisibles à la santé, ou au contraire utiles et même nécessaires à la vie.

I- Rayonnements ionisants



- ✓ Capables d'ioniser les atomes d'hydrogène et d'oxygène
- ✓ **Seuil de 13,6 eV** choisi en raison de l'importance de l'ionisation de l'eau dans l'interaction entre les rayonnements et les tissus



- ✓ Par leur énergie, les rayonnements ionisants sont **pénétrants**

- ✓ Le pouvoir de pénétration dépend du **type de rayonnement** et du pouvoir d'arrêt de la matière

 Des épaisseurs différentes de matériaux pour s'en protéger

Principaux rayonnements ionisants

Type de <u>rayonnement</u>		Rayonnement ionisant	<u>Charge</u> élémentaire	<u>Masse</u> (MeV/c ²)
<u>Rayonnements électromagnétiques</u>	Indirectement ionisant	<u>Rayonnement ultraviolet</u>	0	0
		<u>Rayon X</u>		
		<u>Rayon gamma</u>		
<u>Rayonnements particulaires</u>	Directement ionisant	<u>Neutron</u>	0	940
		<u>Électron</u> / <u>particule β⁻</u>	-1	0,511
		<u>Positron</u> / <u>particule β⁺</u>	+1	0,511
		<u>Muon</u>	-1	106
		<u>Proton</u>	+1	938
		<u>Ion ⁴He</u> / <u>particule α</u>	+2	3730
		<u>Ion ¹²C</u>	+6	11193
<u>Autres ions</u>	Variable	Variable		

Sources des rayonnements ionisants

1. Les rayonnements cosmiques

Origine naturelle ([Soleil](#))

Noyaux atomiques

Particules de
haute énergie

Rayonnements
électromagnétiques

Leur interaction dans l'atmosphère produit des éléments radioactifs

2. La radioactivité

les [particules \$\alpha\$](#) , les [particules \$\beta\$](#)
(β^- : [électrons](#), β^+ : [positons](#)), les [protons](#),
les [neutrons](#) et les [rayons \$\gamma\$](#) .

3. Certains rayonnements électromagnétiques

→ $\lambda < 0,1 \mu\text{m}$

←
Les rayons gamma

↓
Les rayons X

↘
Certains ultraviolets

4. Certains rayonnements particuliers

←
Sources naturelles

↘
Sources artificielles

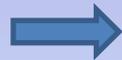
→ Accélérateurs de particules

↓
électrons, protons, ions

Les modes d'exposition aux rayonnements

Selon la manière dont les rayonnements atteignent l'organisme, on distingue deux modes d'exposition : **externe ou interne**.

➤ L'exposition externe



Exposition à des sources de rayonnements
externes

(Ex: substances radioactives sous forme de nuage
ou de dépôt sur le sol, sources à usage industriel ou médical...)



✓ Elle cesse dès que l'on n'est plus sur la trajectoire des rayonnements

exemple d'une radiographie du thorax



✓ L'exposition externe peut concerner tout l'organisme ou une partie
seulement

➤ L'exposition interne



des substances radioactives se trouvent à l'intérieur de l'organisme



Irradiation interne

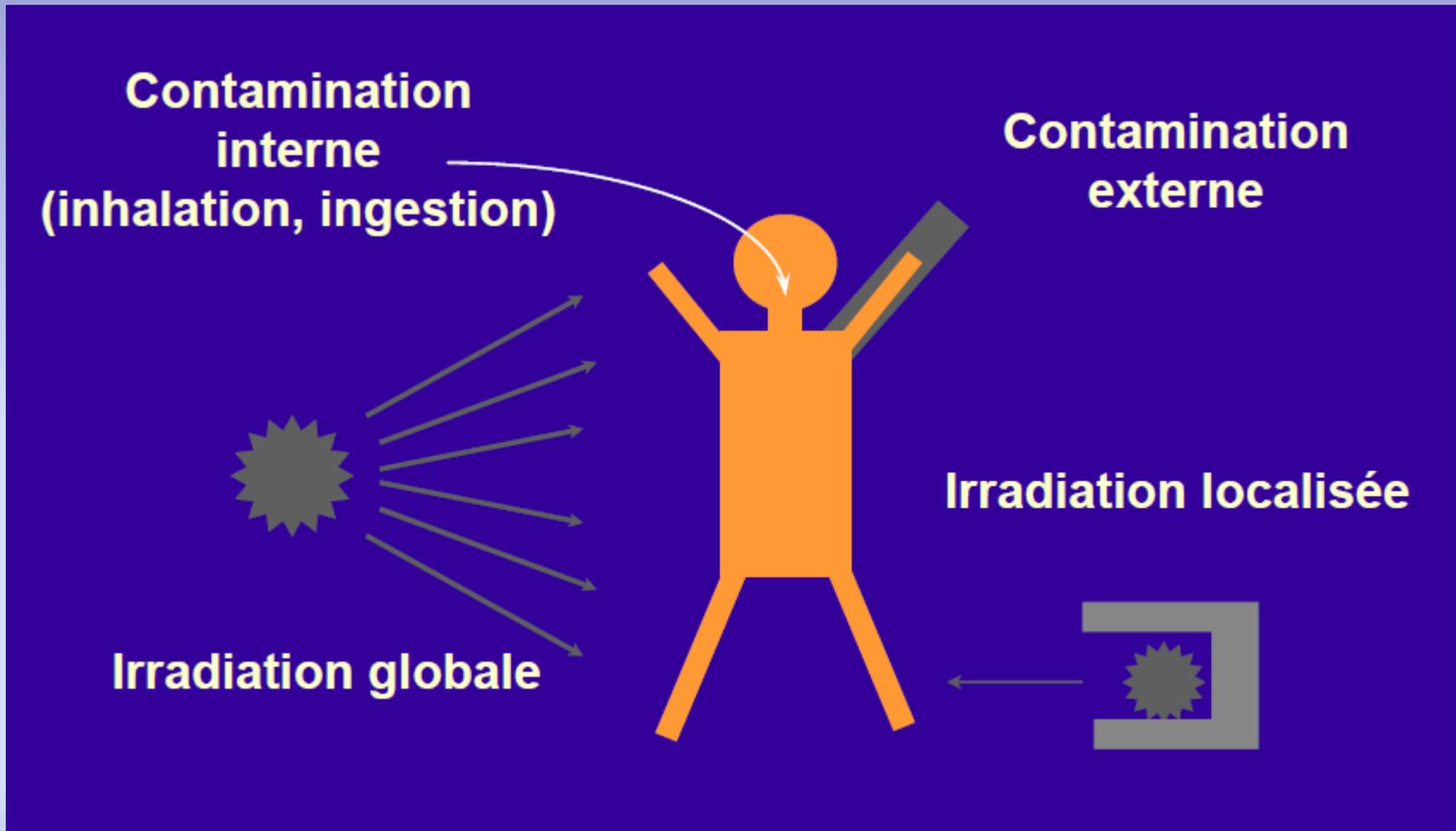
✓ Pénétration par inhalation, par ingestion, par une plaie ou par voie transcutanée, et se distribuent ensuite dans l'organisme



Contamination interne

✓ Elle **cesse** lorsque les substances radioactives ont disparu de l'organisme après un temps plus ou moins long par élimination naturelle, décroissance radioactive.

Une réglementation a défini depuis 2006 plusieurs modes d'exposition



Dosimétrie des rayonnements ionisants

1. Dose absorbée

La grandeur physique qui permet de **quantifier** l'**interaction** d'un rayonnement avec la matière

$$D = (EI - EF) / dm$$

un rayonnement d'énergie incidente **EI** qui pénètre dans un élément de volume de masse **dm** et qui en ressort avec une énergie **EF**

Unité : **Gray ou Gy**

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

✓ Une unité historique est encore utilisée: le **rad** avec $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

• Débit de dose absorbée



✓ Indique la vitesse avec laquelle la dose absorbée augmente

$$D' = D / t \text{ (= dose absorbée / temps écoulé)}$$

✓ Unité internationale : **Gray/seconde** En pratique : $\mu\text{Gy/h}$

Exemple : Un manipulateur séjourne 2 heures à un poste de travail où le débit de dose absorbée est de $0,3 \text{ mGy.h}^{-1}$.

La dose absorbée par son organisme est donc de $0,6 \text{ mGy}$.

✓ **Débit de dose à une distance X =**
(constante d'équivalent de dose x activité de la source) / X²

✓ Cependant, des expositions conduisant à **une même valeur** de dose absorbée ne présentent pas nécessairement les **mêmes risques**, qui sont également liés à la **nature des rayonnements**, aux **conditions de l'exposition** et à la **sensibilité des organes** et tissus irradiés.



La connaissance de la dose absorbée n'est donc pas suffisante pour quantifier l'impact biologique d'une exposition



2. Dose équivalente

$$H_R = D_R \cdot W_R$$



Dose absorbée x le facteur de qualité

Rayonnement (R)

Caractéristique du rayonnement

✓ Unité: **sievert (Sv)**

Facteur de qualité du rayonnement W_R

(Facteur de pondération radiologique)

- $W_R = 1$ pour rayons X, rayons gamma, rayons beta
- $W_R = 5$ pour protons à énergie > 2 MeV, pour neutrons à énergie > 20 MeV ou < 10 keV
- $W_R = 10$ pour neutrons à énergie entre 10 et 100 keV ou entre 2 et 20 MeV
- $W_R = 20$ pour neutrons à énergie entre 0,1 et 2 MeV et pour rayons alpha ou noyaux plus lourds.

✓ Unité: **Sv/Gy**

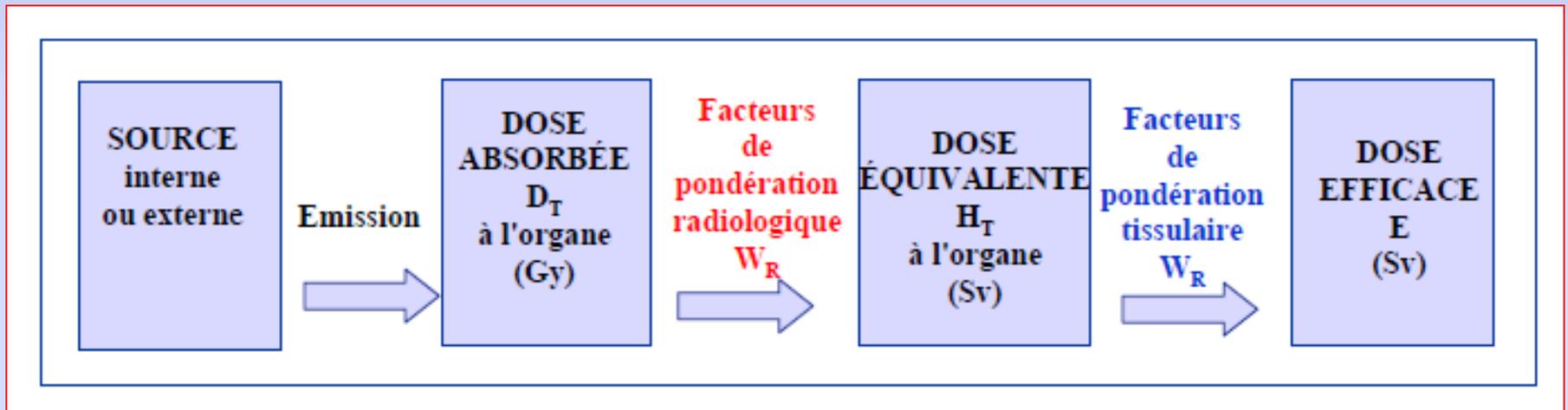
3. Dose efficace

$$H_E = \sum W_T \times H_T$$

= somme de tous les produits entre facteur de pondération tissulaire W_T et la dose équivalente H_T pour le tissu T.

Dose équivalente pour le tissu T

Facteur de pondération tissulaire



Relation entre dose absorbée, dose équivalente et dose efficace

Facteur de pondération tissulaire W_T

Facteur W_T	Organes
0,2	Gonades
0,12	Colon, poumons, estomac, moelle osseuse rouge
0,05	Seins, vessie, foie, œsophage, thyroïde
0,01	Os (surface, peau)
0,05	Reste de l'organisme

Différentes radiosensibilités pour différents organes.

Exemple

Calcul de la dose efficace :

	W_R	W_T	%
RX : 100 mGy / 50 cm² peau	1	0,01	30 %
¹³¹I : 10 mGy / thyroïde	1	0,05	100 %
dose efficace = (100 x 1 x 0,01 x 0,30) + (10 x 1 x 0,05 x 1)			
dose efficace = 0,8 mSv			

Signification de la dose efficace

✓ L'indication de la dose efficace est synonyme de l'indication du **RISQUE !!!!**



- ❖ le risque de mourir d'un cancer radioinduit
- ❖ le risque de développer un cancer radioinduit
- ❖ le risque de produire des effets génétiques sur l'ensemble des générations.

Risque de cancer mortel



5%/Sv

Risques héréditaires



1%/Sv

4. Le KERMA (Kinetic Energy Released per unit Mass)

$$\text{KERMA} = E_{\text{tr}} / m$$

E_{tr} : Energie cinétique transférée

Dose absorbée



Décrire l'absorption d'énergie
par la matière

Le KERMA



Décrit l'énergie transférée à des
particules directement ionisants



Cette différence est importante pour des énergies
élevées (**radiothérapie**)

5. Le produit dose-surface - DAP

$$\text{DAP} = D \times F \text{ (= surface irradiée } \times \text{ Dose)}$$

✓ Il est indépendant de la distance à la source

Unité: **Gy x m²**

La protection contre les rayonnements ionisants

✓ Les **effets** sur un organisme d'une radioexposition dépendent de la **nature du rayonnement**

Rayonnement	particules α β énergie < 70 keV	β énergie > 70 keV	X et γ β énergie élevée neutrons
Pénétration dans les tissus	environ 10 μm : ne franchissent pas la couche cornée	traverse l'épiderme touche éventuellement le derme	très pénétrants
Effet	Aucun danger en exposition externe	ne provoquent "que" des lésions cutanées	tissus ou organes atteints

✓ la dose absorbée reçue par une personne est le produit du **temps d'exposition** par le **débit de dose absorbée**



✓ **Protection** contre une exposition externe:

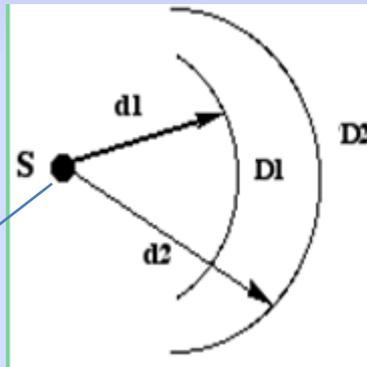
1. Minimisation du temps d'exposition

2. Minimisation du débit de dose absorbée: la distance avec la source



Trouver un moyen d'augmenter la distance entre l'opérateur et la source de rayonnements

Source ponctuelle(****)



$$\frac{D1}{D2} = \frac{(d_2)^2}{(d_1)^2} \Rightarrow D1 \cdot (d_1)^2 = D2 \cdot (d_2)^2$$

***On dit qu'une **source** d'émission est **ponctuelle** si toute l'activité est concentrée en son centre

Exemple

Pour une source de cobalt 60, le débit de dose absorbée à 1 m est :

$$D_{1\text{ m}} = 12 \text{ mGy.h}^{-1}$$

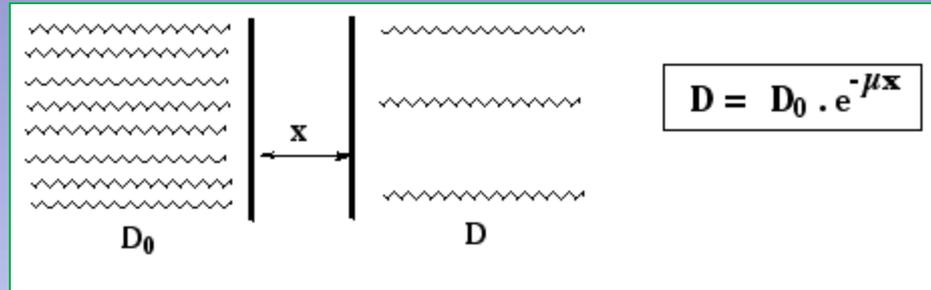
- Calculer le débit de dose absorbée à 2 m de cette source

Le débit de dose absorbée à 2 m de cette source avec la relation qui précède :

$$D_{2\text{ m}} = \frac{D_{1\text{ m}} \cdot (d_1)^2}{(d_2)^2} = \frac{12 \cdot (1)^2}{(2)^2} = 3 \text{ mGy.h}^{-1}$$

le débit de dose absorbée est diminuée d'un facteur 4

3. Minimisation du débit de dose absorbée: l'atténuation par les écrans



Exemple 1

On utilise un écran en fer de 2 cm d'épaisseur pour atténuer un rayonnement électromagnétique d'énergie 1 MeV.

Sachant que $D_0 = 0,2 \text{ mGy.h}^{-1}$, calculons la valeur du débit de dose absorbée derrière l'écran :

$$D = D_0 \cdot e^{-\mu x} = 0,2 \cdot \exp(-0,466 \times 2) = 0,078 \text{ mGy.h}^{-1} = 78 \text{ }\mu\text{Gy.h}^{-1}$$

Exemple 2

Calculons l'épaisseur de plomb nécessaire pour atténuer d'un facteur 40 le débit de dose absorbée d'un rayonnement électromagnétique d'énergie 1 MeV.

$$\frac{D}{D_0} = e^{-\mu x} \implies x = \frac{\ln(D / D_0)}{\mu} = \frac{\ln(1/40)}{0,739} = 5 \text{ cm}$$

Détection et mesure des rayonnements ionisants



Grâce à leurs interactions
avec la matière

Ionisation

Excitation

Différents types de détecteurs



Les détecteurs mettant en jeu l'ionisation des gaz

Les détecteurs à scintillations

Les détecteurs utilisant le noircissement des films photographiques

Les détecteurs thermoluminescents.

Les détecteurs à semi-conducteurs.

Les dosimètres par résonance paramagnétique électronique.

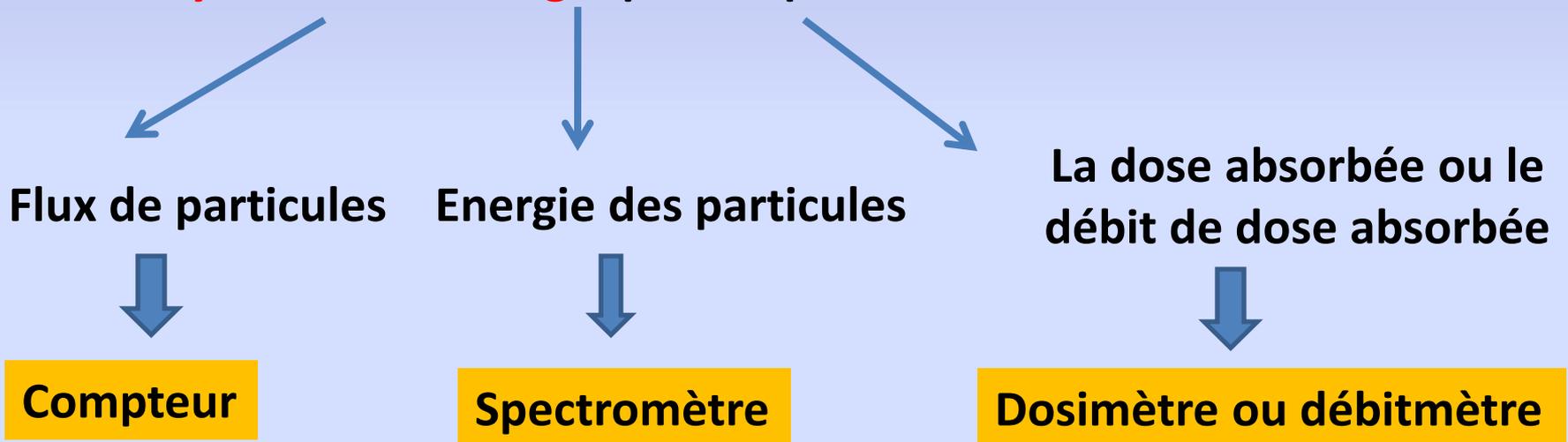
Les dosimètres chimiques

Les appareils mettant en jeu les méthodes calorimétriques.

**Détecter est simple,
mesurer une grandeur
est plus complexe.**

Mode de fonctionnement d'un détecteur

- ❑ **Un capteur** au niveau duquel le rayonnement interagit avec la matière
- ❑ **Un système d'amplification** qui met en forme et amplifie le signal produit par la sonde.
- ❑ **Un système de traitement du signal.**
- ❑ **Un système d'affichage** qui indique :



Paramètres caractéristiques d'un détecteur

Efficacité de détection



nombre de particules détectées/nombre de particules reçues



Dépend de la nature et de l'énergie du rayonnement

1. Le temps mort



Le plus petit intervalle de temps entre deux informations

2. Le mouvement propre



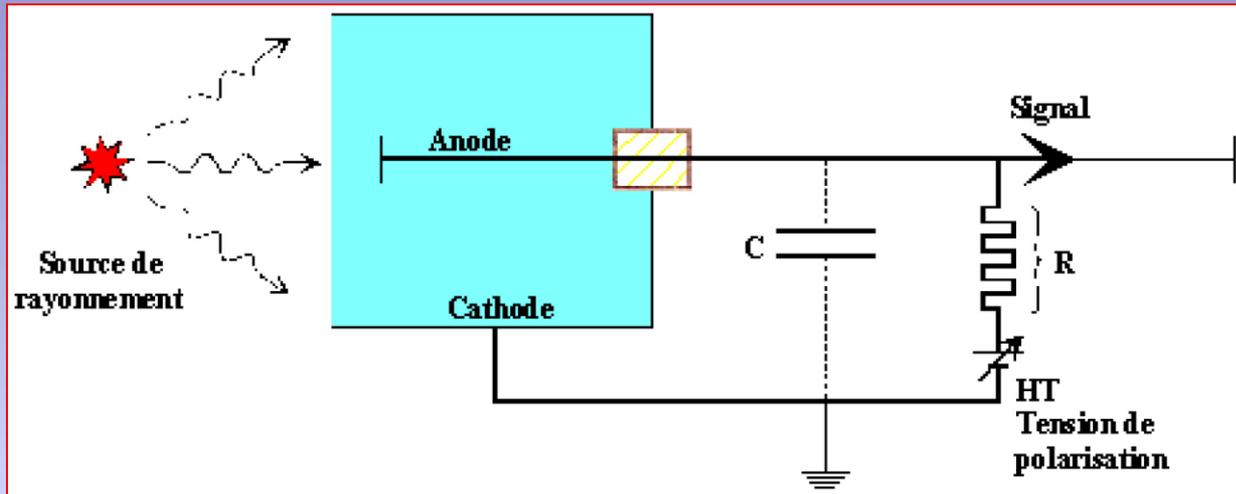
Le taux de comptage enregistré en absence de toute source

3. Les caractéristiques géométriques



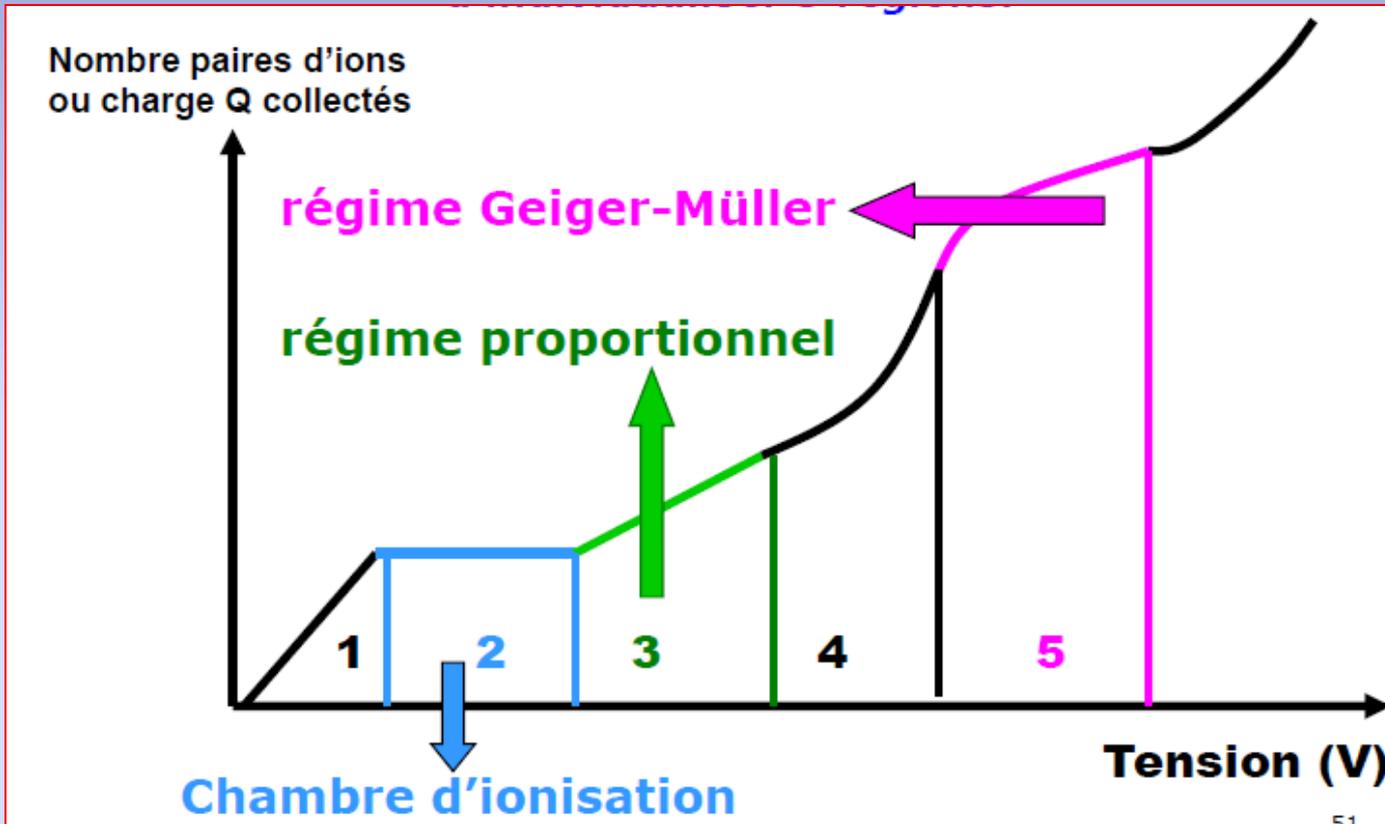
La forme du détecteur

Les appareils mettant en jeu l'ionisation des gaz



- ✓ Une chambre dans laquelle est enfermé un **gaz**
- ✓ Un fil qui constitue l'**anode**
- ✓ Les parois de la chambre reliée à la masse, constituent la **cathode**
- ✓ **ionisation** → Les **é** et les **ions** sont collectés sous l'effet \vec{E}
Signal électrique apparaît aux bornes d'un circuit RC

l'amplitude du **signal** est **proportionnelle** au **nombre de paires d'ions formés** et donc à **l'énergie** déposée par le rayonnement.



les différents modes de fonctionnement des détecteurs à gaz

✓ Région 1 : régime de recombinaison partielle

$U < 100 \text{ V}$ \Rightarrow Les ions se **recombinent** totalement ou partiellement avant d'atteindre l'électrode et l'amplitude de l'impulsion est **nulle ou faible**

Aucun détecteur ne fonctionne dans cette région.

✓ Région 2 : régime d'ionisation primaire

$U > 100 \text{ V}$ \Rightarrow La recombinaison est négligeable et tous les électrons sont collectés

Amplitude de l'impulsion est constante et indépendante de la différence de potentiel, mais dépend de l'énergie des particules

Détecteurs de chambres d'ionisation

✓ Région 3 : régime de proportionnalité

$U = 300-1000 \text{ V}$ → Provoquer des ionisations secondaires s'ajoutant à l'ionisation primaire.

Nombre d'électrons collectés → $N = k \cdot n$ ← Nombre d'électrons primaires

k est le coefficient de multiplication gazeux

Compteurs proportionnels

✓ Région 4 : régime de semi-proportionnalité

$U = 1000-1100 \text{ V}$ → k n'est plus indépendant de n

Aucun détecteur ne fonctionne dans cette région

✓ Région 5 : régime de Geiger – Muller

A partir de 1100 V  Chaque ionisation primaire entraîne une avalanche d'ions secondaires et le nombre d'ions collectés devient indépendant du nombre d'ions primaires

Détecteurs de Geiger et Muller

✓ Région 6

>1400 à 1500 v

Certains compteurs Geiger - Muller et certains compteurs proportionnels fonctionnent avec des tensions pouvant atteindre respectivement 3000V et 4000V.

Caractéristiques des différents détecteurs à gaz

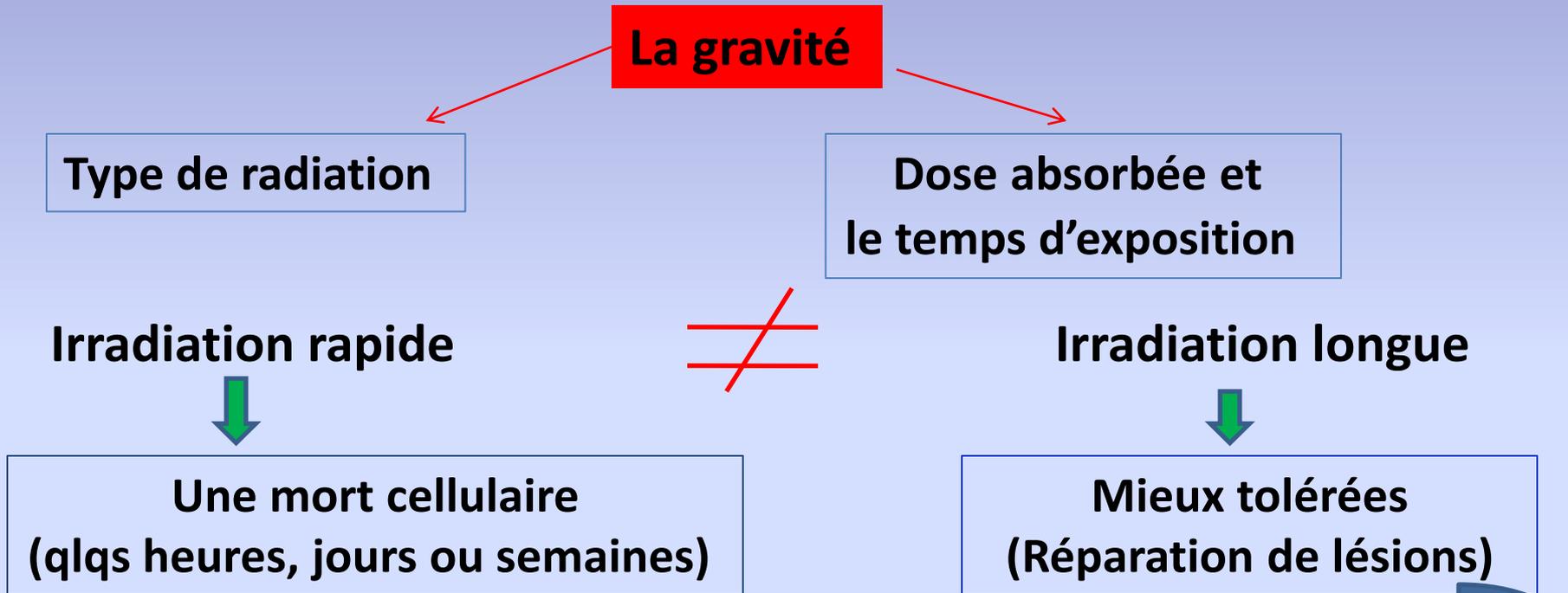
Détecteurs	Particules détectées	Temps mort (μs)	Taux de comptage maximum conseillé ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)
Chambre d'ionisation	Alpha, bêta, X, gamma	1 à 10	10^4 à 10^5
Compteur proportionnel	Alpha, bêta, X	1 à 10	10^4 à 10^5
Compteur de Geiger-Müller	Bêta, X, gamma	100	10^3

Rendement d'un détecteur :

- de la distance entre la source et le détecteur ;
- de la surface de la source ;
- du support sur lequel elle se trouve.

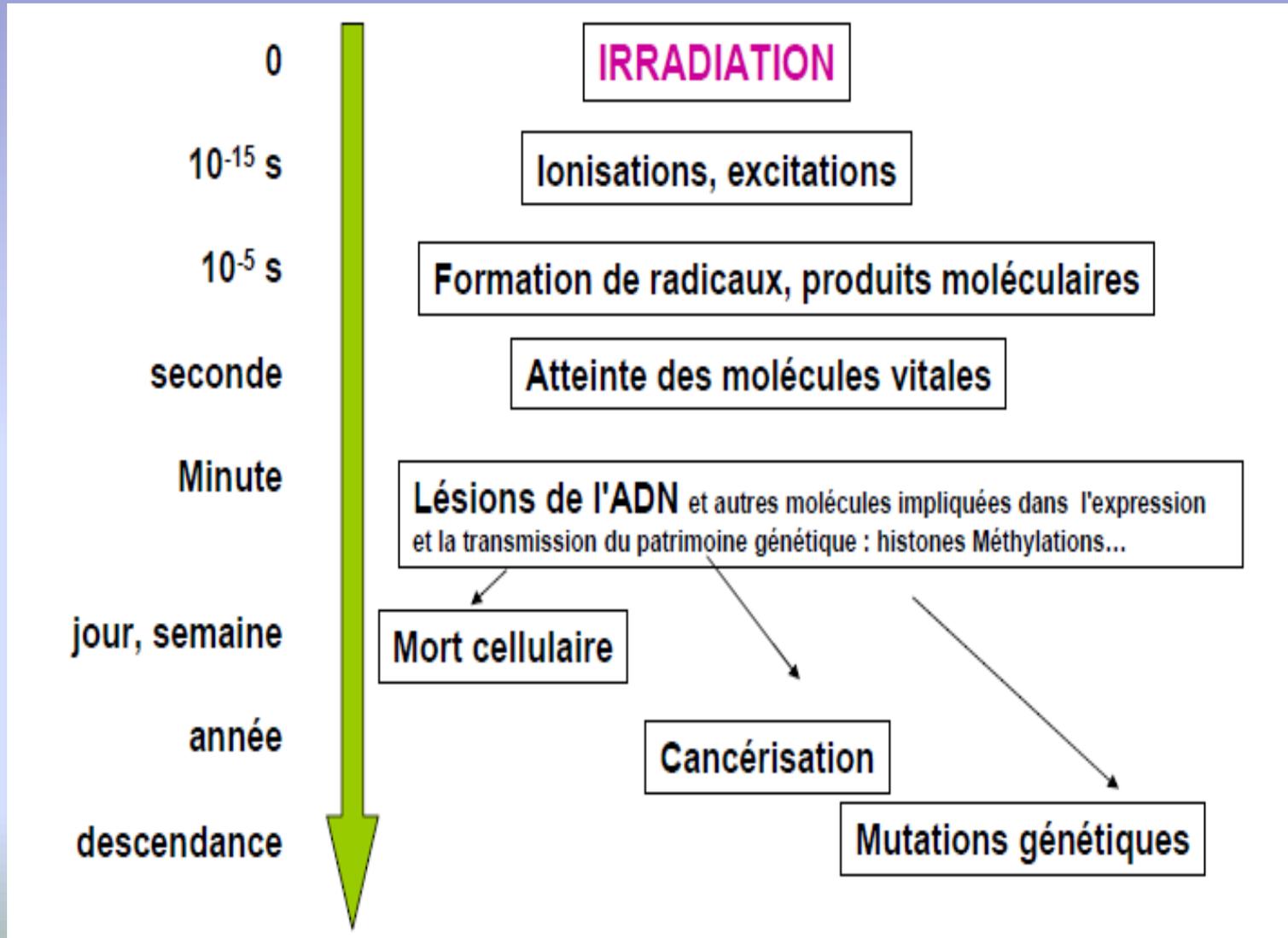
Effets biologiques des rayonnements ionisants

- ✓ Effets observés lorsque des radiations ionisantes interagissent avec le **tissu vivant** en transférant leur énergie aux **molécules organiques**.



- ✓ Les radiations de trop **faibles doses** (pour détruire les cellules) peuvent provoquer des **modifications cellulaires** dont les conséquences apparaissent au bout de plusieurs années.

Action des RI sur la matière vivante (Succession des phénomènes)



Différentes étapes successives

□ Etape physique

- Ionisation
- Excitation

□ Etape chimique-moléculaire : formation des radicaux libres

- Action sur l'eau
- Action sur les autres molécules directes et indirectes

□ Effets cellulaires

- Mort cellulaire
- Les effets héréditaires

□ Effets tissulaires ou sur l'organisme entier : Effets pathologiques

- effets déterministes
- Effets stochastiques

Au niveau moléculaire (Les lésions moléculaires)

1. Lésions induites par transfert direct d'énergie

✓ L'énergie du rayonnement est transférée **directement** à la molécule.

Excès d'énergie

- Rayonnement de fluorescence

Ionisée

excitée

- Rupture de liaisons chimiques

Exemple :

Excès d'énergie d'une ionisation
= 12,6 eV

Excès d'une excitation
6,6= eV



Suffisant

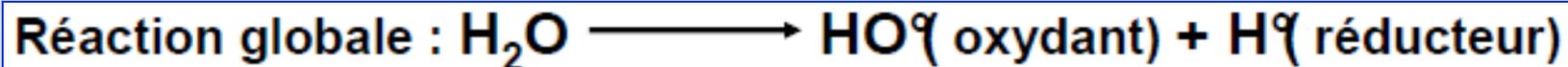


Rompre la liaison H-OH d'une molécule d'eau (5,16 eV)

2. Lésions induites par transfert indirect d'énergie

✓ L'énergie est transférée à des molécules au **voisinage des molécules concernées** qui induisent à leur tour des lésions des molécules concernées.

✓ Liées à l'action des radicaux libres formés lors de la radiolyse de l'eau



✓ En raison de leur courte durée de vie (10^{-6} secondes) les radicaux libres migrent à de faibles distances



✓ La lésion concerne seulement les radicaux libres qui sont formés à proximité d'une molécule

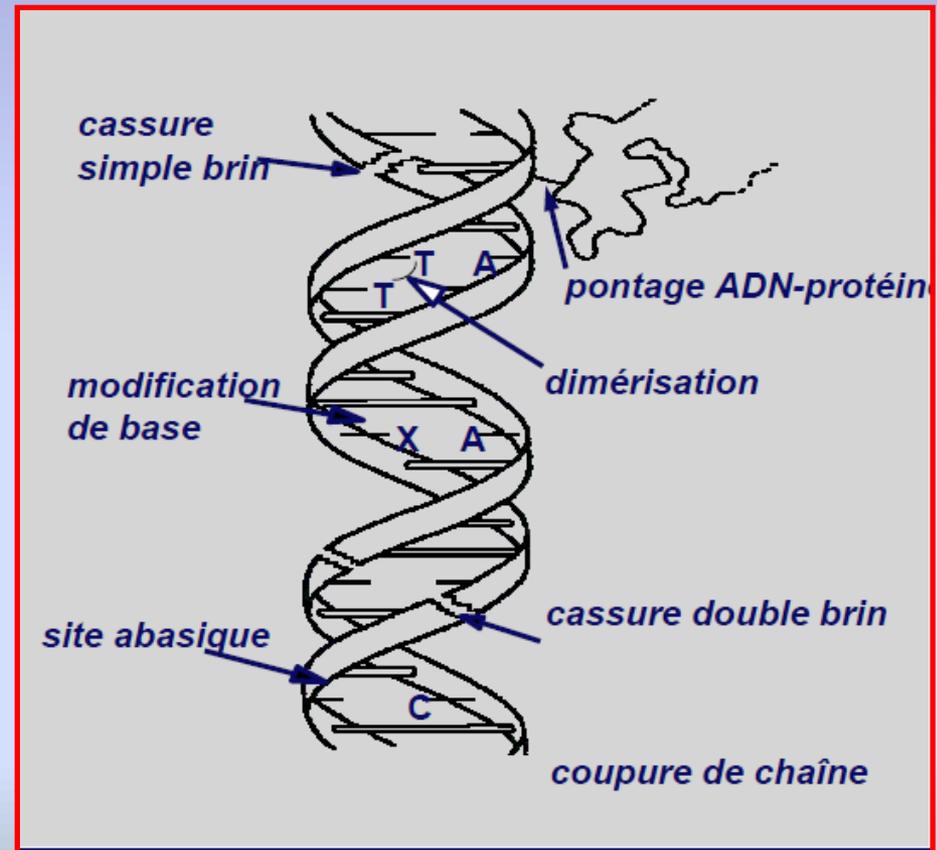
Les cibles des lésions radioinduites

Toutes les molécules biologiques sont des cibles

1. l'eau: en raison de sa **proportion** dans tous les organismes vivants (environ **70%** chez l'homme)

2. l'ADN: en raison de sa fonction centrale dans la cellule

- Altération des chromosomes
- Division cellulaire
- altération des gènes et mutations



Au niveau cellulaire



Mort cellulaire, cancérogénèse et effets héréditaires

✓ La mort cellulaire résulte de **lésions irréparables** dans des structures vitales pour la cellule telles que les chromosomes

Mort cellulaire immédiate



Doses élevées

centaines Gy → millier de Gy

Mort cellulaire différée



Faibles doses

Effets



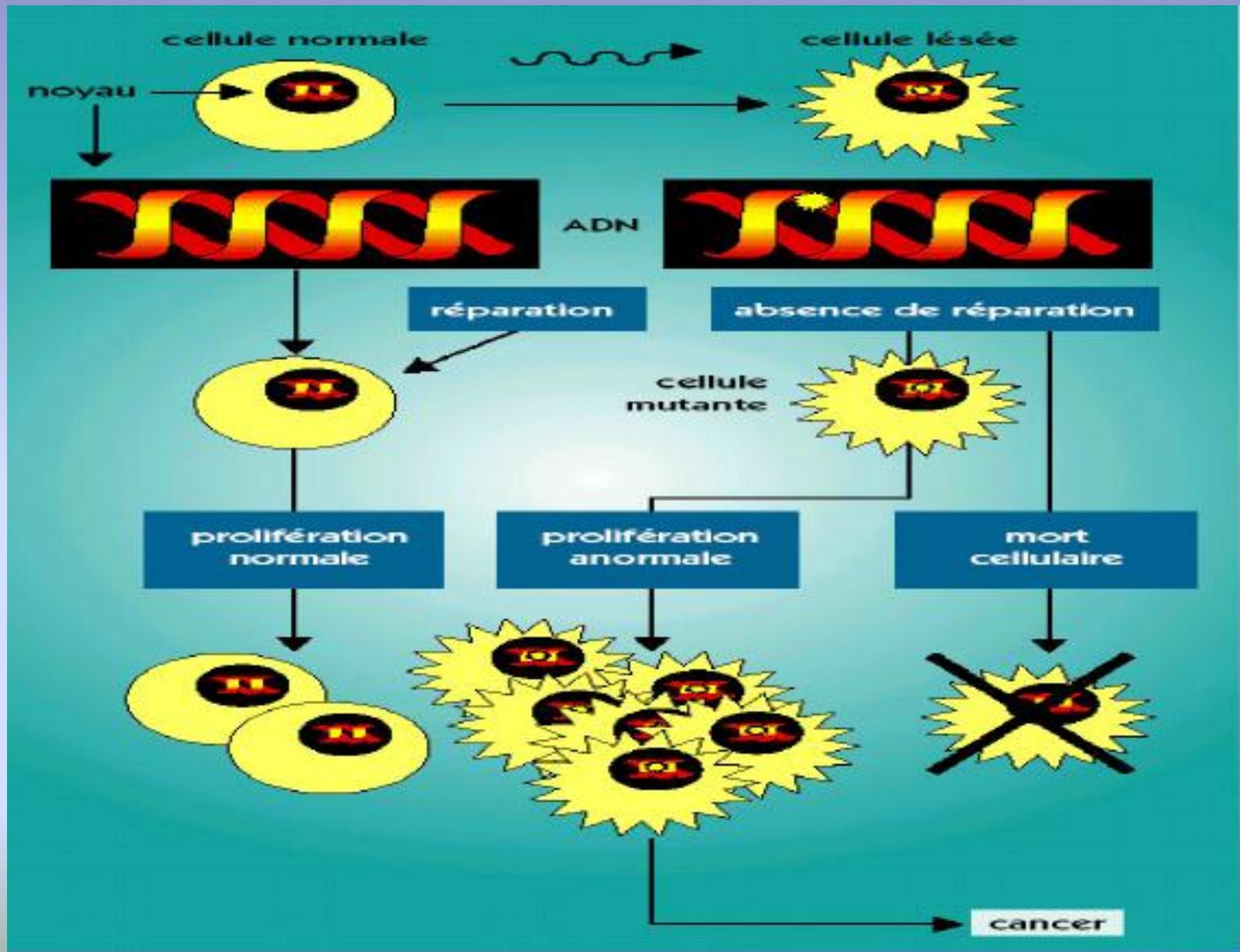
Réparation et la cellule redevient normale

Mal réparation



Cellules perdent leur capacité de division dès la 1^{ère} division ou après plusieurs divisions (**mort différée**)

Les dommages cellulaires



Enfin, la cellule peut sembler **normale** en terme de **survie**, mais être **anormale** en terme **chromosomique** et subir des effets génétiques (**héréditaires**) ou s'orienter vers le développement de **cancers**.

effets pathologiques des RI chez l'homme

1. Effets déterministes

✓ Lors d'une exposition, si le **nombre de cellules détruites est trop important**, leur remplacement par la multiplication des cellules viables est insuffisant.

Lésions tissulaires

Attaquent la fonction de l'organe

La mort de l'individu.

Entraîner des signes cliniques

✓ Effets déterministes observés au delà d'un **seuil** 0,2 à 0,3 Gy

Ils sont appelés déterministes car ils sont **obligatoires**

2. Effets stochastiques: (effets aléatoires)

✓ Les effets stochastiques sont les **conséquences probabilistes à long terme**, chez **un individu** ou chez **sa descendance**, de la transformation d'une cellule.



Résultat de lésions **mal réparées** des molécules d'ADN.



Effets cancérogènes



mutation porte sur un gène
d'une **cellule somatique**



Effets héréditaires

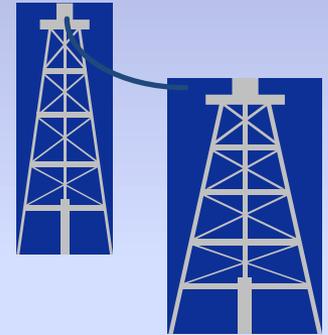
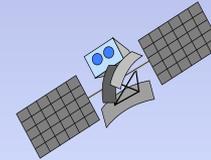


mutation porte sur un gène d'une
cellule germinale

Tableau comparatif des effets déterministes et stochastiques

Effets déterministes	Effets stochastiques
cause: destruction massive des cellules	cause: lésions non réparées de l'ADN
obligatoires (ils apparaissent toujours)	aléatoires
pathologies diverses	cancers et effets génétiques
dose seuil d'apparition: 0,2 - 0,3 Gy	pas de dose seuil d'apparition
manifestation précoce	manifestation tardive
gravité dépendante de la dose	gravité indépendante de la dose
clairements décrits	non spécifiques

II- Rayonnements non-ionisants



Classification des Rayonnements non-ionisants

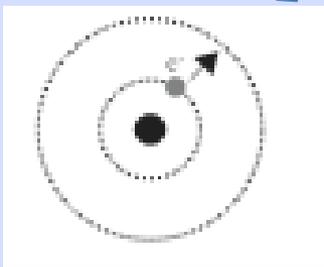
- Les champs électriques et magnétiques statiques (0 Hz) : champ magnétique terrestre, ...)
- Les champs électriques et magnétiques alternatifs d'extrême basse fréquence (≈ 50 Hz) : lignes à haute tension, appareils électriques,
- Les radiofréquences : allant jusqu'à 300 GHz :
 - Les ondes radio (émetteurs radio, radars, téléviseurs, téléphones mobiles ...).
 - Les micro-ondes (fours à micro-ondes, ...).
- Les rayonnements optiques: (\approx quelques centaines de THz)
 - Rayonnement infrarouge (IR)
 - Lumière visible.
 - UV (rayonnement ultraviolet, soleil, solariums)



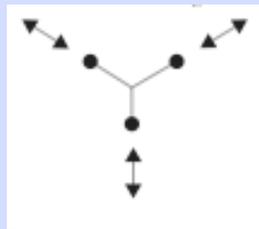
interaction rayonnement non-ionisants avec la matière

Le site d'action des rayonnements ionisants essentiellement l'atome
(les é atomique)

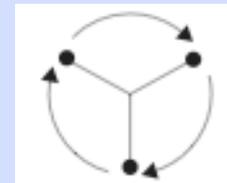
Par
contre Le site d'action des RNI c'est la molécule → photochimie



Changement de niveau
d'énergie des électrons
Ultraviolet et visible



Vibration
moléculaire
Infra rouge proche



Rotation et torsion
moléculaire
Infra rouge lointain +
radiofréquences

Absorption des rayonnement non-ionisants par la matière

Radiations **incapable d'ioniser**  Elles n'agissent sur la **matière** que
dans la mesure elles sont **absorbées**

Leur action dépend de la façon dont finalement
cette **énergie absorbée va être utilisée**



Comment varie l'énergie d'un atome ou d'une molécule?

Quantification de niveaux
électroniques



Spectre d'absorption présente
des raies

•Cas d'un atome isolé

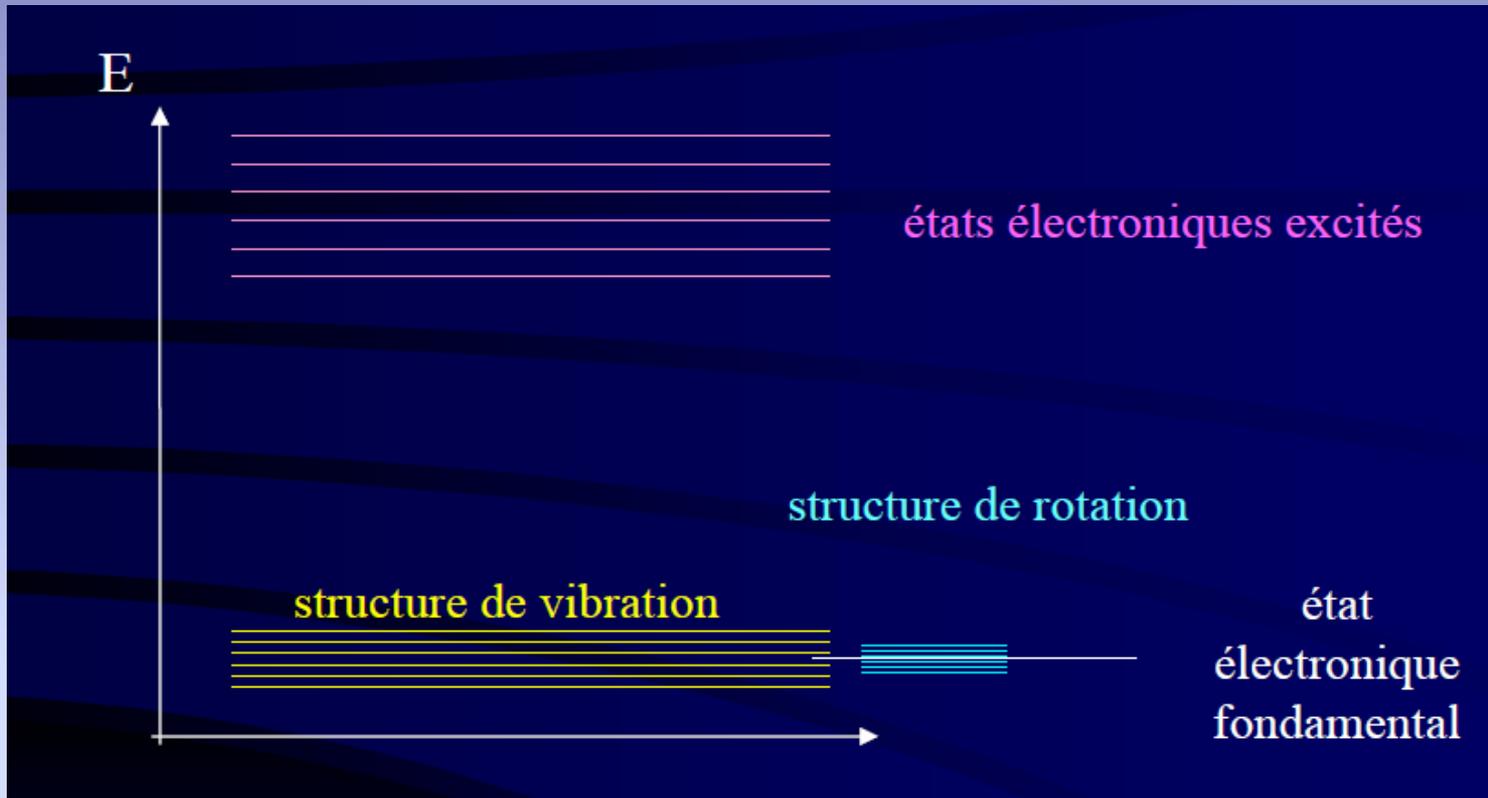


Cas simple comprenant que des
états électroniques excités

•Cas d'une molécule
isolée



Cas plus complexe comprenant:
-Énergie électronique
-Énergie de vibration
-Énergie de rotation



Une énergie électronique $\Delta E_e \sim \text{qqes eV}$

Une énergie de vibration $\Delta E_v \sim \text{qqes } 1/10^{\text{ème}} \text{ eV}$

Une énergie de rotation $\Delta E_r \sim \text{qqes } 1/100^{\text{ème}} \text{ eV}$

Devenir de l'énergie absorbée

Energie absorbée = initiatrice de réactions photochimiques

- les radiations visibles et UV : $\Delta E_r + \Delta E_v + \Delta E_e$
- Les radiation IR proche : $\Delta E_r + \Delta E_v$
- Les radiations IR lointain et ondes hertziennes ΔE_r

ΔE_r est négligeable



Ne modifie pas la structure de la molécule



Les IR lointains et les ondes hertziennes : pas d'action chimique

ΔE_v



L'amplitude des oscillations



La molécule est plus fragile



Mais action négligeable à T° ordinaire

Plus apte à réagir



Les IR : pas d'action chimique

Donc



**Seules les transitions électroniques
(Visible et UV)
ont un intérêt photochimique**



Avec $h\nu$ de l'ordre de liaison chimique \Rightarrow Réactivité augmentée

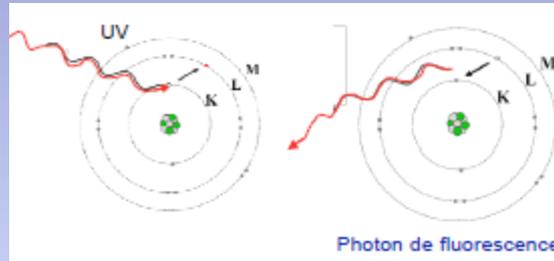
Excitation accompagnée d'une dissociation par rupture de liaison



Deux radicaux très réactifs

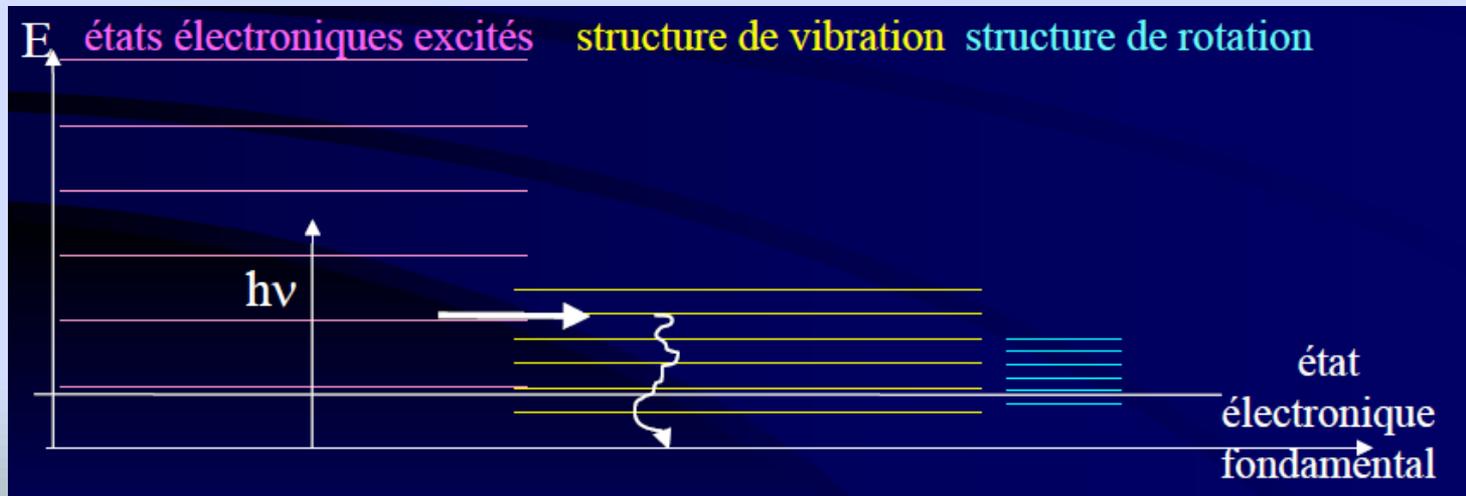
Deux autres processus possibles :

1- processus de fluorescence



L'énergie est dissipée sous forme de chaleur ou réémise sous forme de photon

2- processus de conversion de l'énergie interne



Biologie des rayonnements non-ionisants

Photobiologie moléculaire

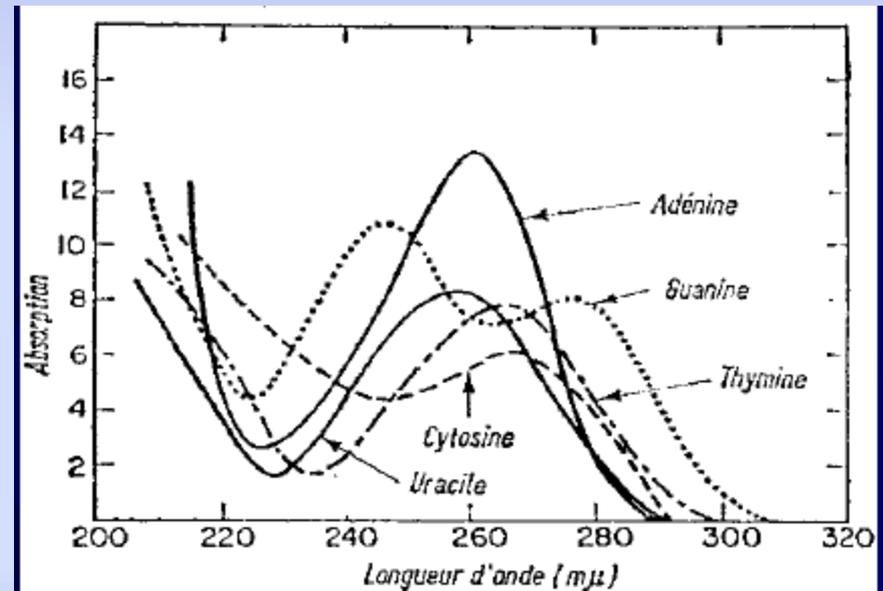
Seuls les composés organiques qui absorbent sélectivement sont concernés par ce type de radiations



(= composés chromophores)

(les autres ayant une absorption négligeable pour $\lambda > 220\text{nm}$)

absorption de l'ADN due aux bases $200\text{ nm} < \lambda < 300\text{ nm}$ avec un pic à 260 nm



Pas d'effet indirect car l'eau n'absorbe pas pour $\lambda > 250 \text{ nm}$

Au niveau moléculaire

Action sur
les protéines

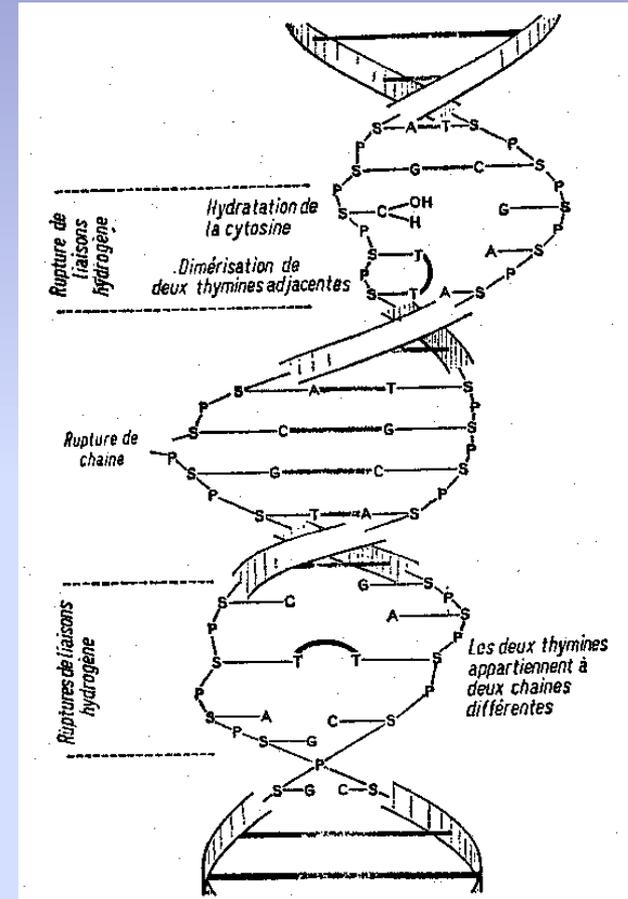


dénaturation avec
en particulier la
**disparition de leur
action
enzymatique.**

Action
sur les acides
nucléiques



**Une fixation d'une
chaîne d'ADN a
d'autres molécules
d'ADN ou
même de protéines**



Rayonnement ultra-violet (UV)

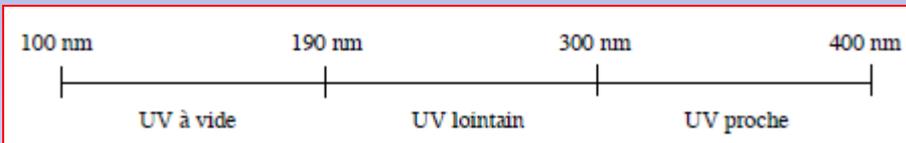


100 - 400 nm

Source naturelle d'UV : le soleil

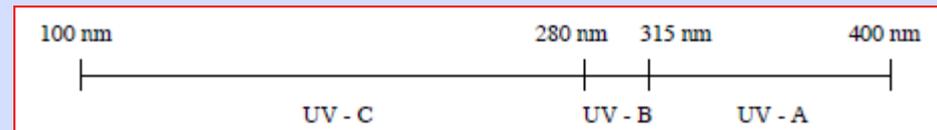


• Classification physique



L'UV à vide, absorbé par l'air présente **peu d'effets biologiques**, sauf pour les sources intenses

• Classification biologique



✓ **UVC** : ne parvient pas à la surface de la terre, **absorbé par l'oxygène**

✓ **UVA** : **non absorbé**, parvient à la surface de la terre

✓ **UVB** : **totalément absorbé par la couche d'ozone** quand λ : 280 - 295 nm
traverse la couche d'ozone quand λ : 295 - 315 nm

- **UVA présents de façon constante du lever au coucher**

La quantité d'UVB dans le rayonnement solaire direct est d'autant plus importante que le **trajet** est court :

- fonction de la **saison** (maximale en juillet dans l'hémisphère Nord)
- fonction de la **latitude** (max tropiques)
- fonction de **l'altitude** (augmentation de 4% tous les 300 m)
- fonction de **l'heure de la journée** (11h - 14h, heure solaire)
- Influence de **la réflexion** du rayonnement : max pour la neige (80%), sable (17%), eau (5%), herbe (3%)

Sources artificielles de rayonnement UV

**Toute substance portée à plus de 2500 °K
est émettrice de rayonnements
ultraviolets**



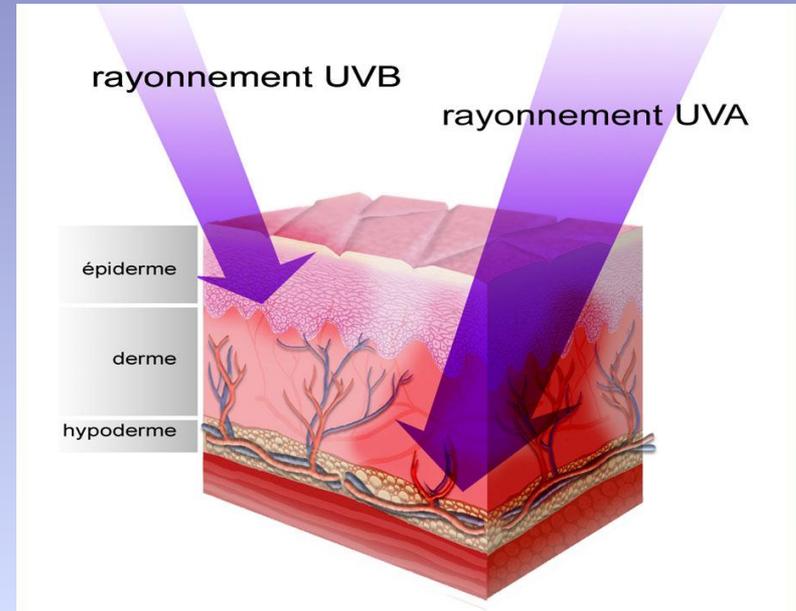
- lampe à incandescence et fluorescentes
- arcs de soudure
- lampes germicides (UVC) : stérilisation chirurgicale, asepsie des armoires frigorifiques, stérilisation des aliments
- lampes des laboratoires de recherche
- lampes pour photothérapie
- lampes des cabines de bronzage



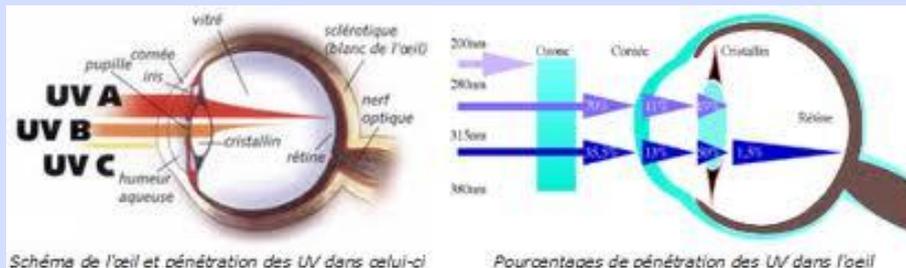
Effets des rayonnements UV sur la santé

• Effets sur la peau

- 90% des UVB absorbés par l'épiderme (10% par le derme)
- 50% des UVA absorbés par l'épiderme (50% par le derme)



• Effets sur l'œil



- UV < 295 nm arrêtés par la cornée
- UV < 400 nm arrêtés par le cristallin
- UVB, partiellement absorbés par la cornée et complètement arrêtés par les structures constituant la chambre antérieure de l'œil
- Les UVA pénètrent jusqu'au cristallin

• Effets bénéfiques

- 1- UV est bénéfique et indispensable à la **synthèse de vitamine D**
- 2- Les UV servent à traiter plusieurs maladies : **rachitisme, le psoriasis, l'eczéma et l'ictère**

• Risques

- coup de soleil ou **érythème actinique** (responsable : UVB)
- bronzage par néosynthèse de la mélanine (UVA et UVB)
- Epaissement de la couche cornée (UVB)
- Action immunologique : **diminution des défenses immunitaires** cutanées et bactéricide (UVA et érythème actinique (coup de soleil) (UVB)

les cas les plus graves, un cancer cutané ou une cataracte



Nécessité de protection !!!!!

Micro-ondes



λ : 1 mm et 1 m \longrightarrow E: 10^{-3} eV à 10^{-6} eV



Sources

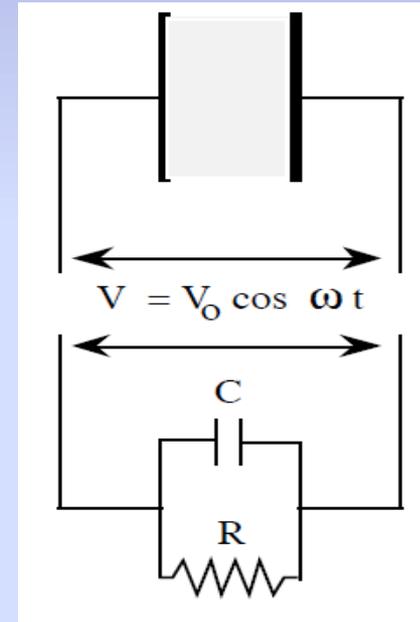


Téléphones portables, four à micro-ondes, téléphones sans-fil, radar, Wi-Fi,

Pour les milieux vivants, modification de l'état rotationnel des molécules d'eau.



L'élévation de la température locale est de loin l'effet déterminant, mais on peut aussi imaginer l'induction de vibration longitudinale des molécules d'ADN et donc **des effets mutagènes.**



Modèle de milieu biologique

• Pour des **expositions importantes** 

Apparition des effets
potentiellement
dangereux

• Pour des fréquences assez
précises (en raison du
phénomène de **résonance**,
et pour des intensités très
fortes, de l'ordre de 200
Watt par m²



effets cellulaires,
chromosomiques et génétiques



Actuellement les effets fondamentaux des différentes interactions sont **peu connus**, et comme souvent les effets des **faibles doses** ne peuvent être mis en évidence, que ce soit pour un sujet isolé ou lors d'une approche épidémiologique.



Les micro-ondes sont utilisées, comme les infrarouges pour provoquer une augmentation localisée de **la température**, c'est **la diathermie**.

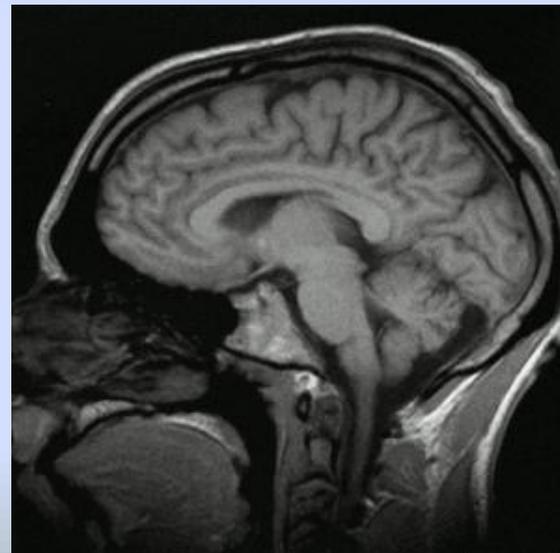
Radiofréquences (Ondes hertziennes)

> 0,1 m ou 3Hz à 300 GHz

- ✦ Formées à partir d'un courant électrique
- ✦ Transmission d'information (radio, télévisions, radars),
- ✦ Application en médecine et science (IRM et RMN)

Imagerie par Interaction
par résonance
magnétique

système nerveux central
(cerveau et moelle épinière)



Application médicale des radiofréquences :

traitement local de tumeurs

Fréquence: 400 à 500 kHz.

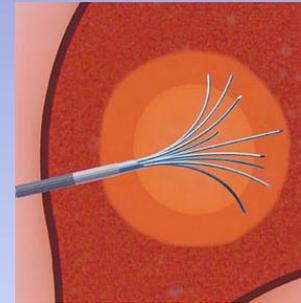
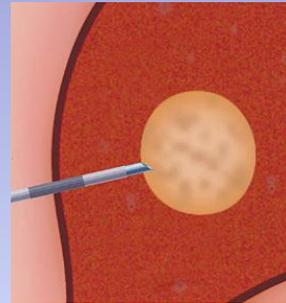
Puissance : 90 à 200 W.

Durée d'application : environ 15 minutes par lésion
Les régions traversées subissent une agitation thermique

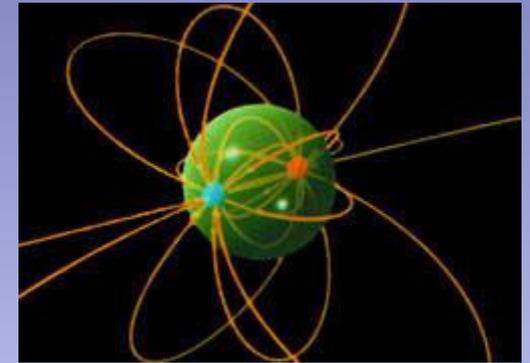
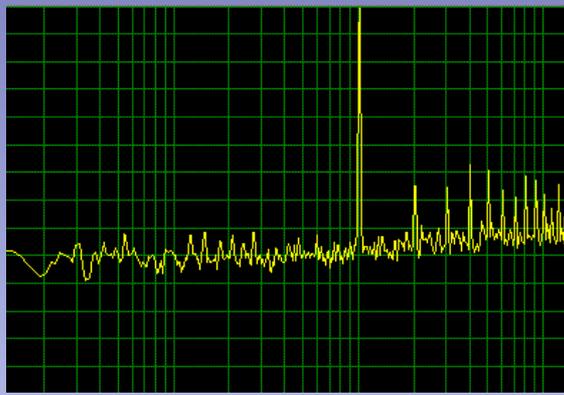
(augmentation de température : de 60 à 100°C, dénaturation cellulaire immédiate)

Procédure : électrode placée sous contrôle scanographique ou échographique, en percutané ou en per-opératoire, dans le centre de la lésion.

Principe



Applications thérapeutiques en cancérologie



Conclusion

Qu'il soit **ionisant** ou **non-ionisant**, le rayonnement peut modifier la cartographie génique de notre **ADN**.

