

**LE**

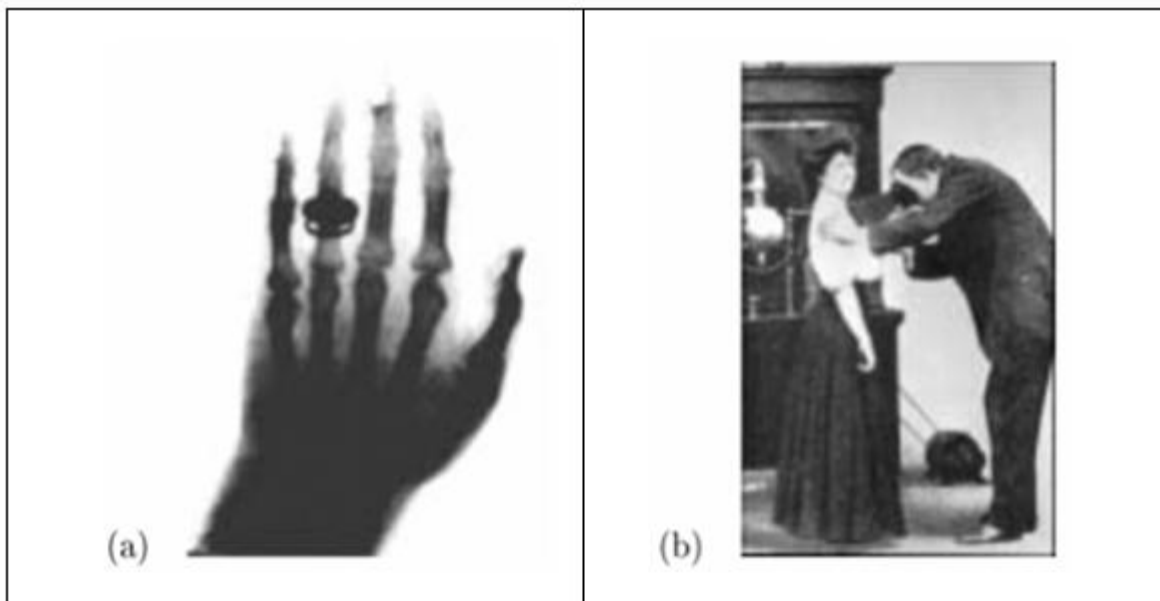
**Rayonnement**

**X**

## I. Définition

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique, au même titre que la lumière visible, l'ultra-violet, l'infrarouge, les micro-ondes, les ondes radio ou les rayons gamma.

En médecine, les rayons X trouvent un champ d'applications très vaste. La radiographie a été la première technique d'imagerie médicale largement employée, puisque son utilisation remonte à plus d'un siècle. Les rayons X constituent un rayonnement de courte longueur d'onde, entre 0,1 et 100 Å, découvert en 1895 par l'Allemand W.C. Röntgen (Prix Nobel en 1901). Le 28 décembre 1895, lors d'une communication à la Société Physico-Médicale de Würzburg, il présente une photographie, à présent devenue célèbre, d'une radiographie de la main de sa femme. Quelques années seulement après leur découverte, les rayons X sont employés dans le domaine médical.



(a) Radiographie de la main de la femme de Röntgen. Ce cliché est connu comme la première radiographie.

(b) Examen radiologique du thorax au début du siècle. Le tube à rayons X est situé derrière la patiente. Le médecin observe le rayonnement transmis à l'aide d'un écran fluorescent.

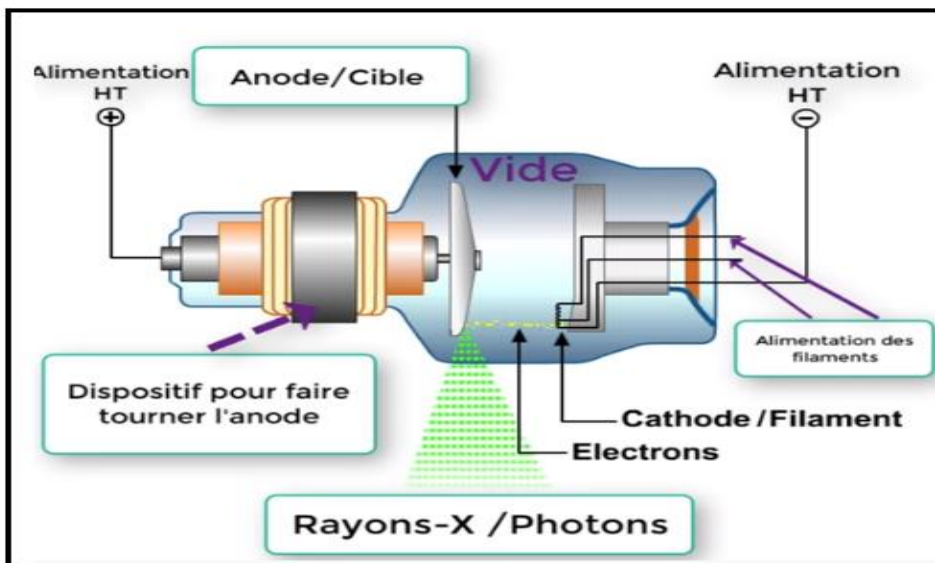
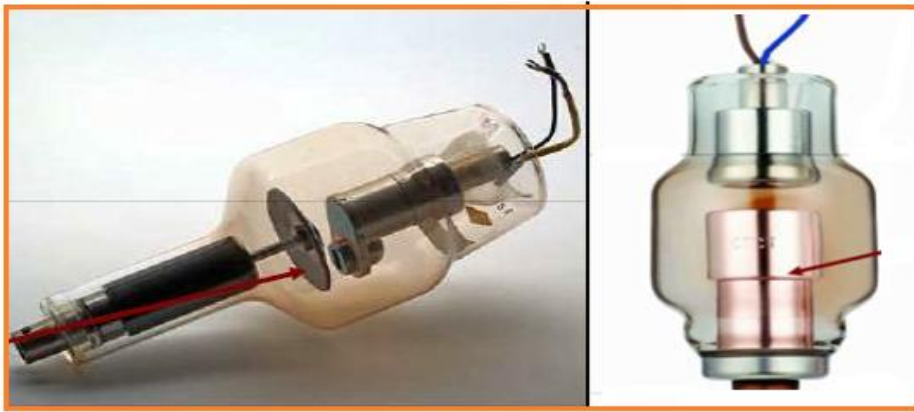
## II. Production des rayons X

Les rayons X sont produits dans des tubes à rayons X également appelés tubes de Coolidge.

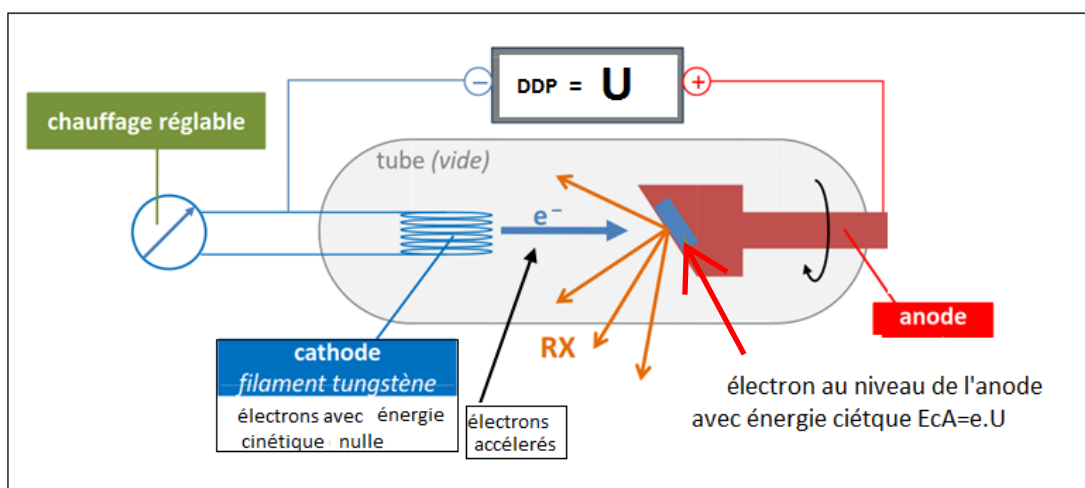
Les rayons X sont des photons produits par l'interaction des électrons avec la matière.

Le principe d'obtention des rayons X est le bombardement d'une plaque métallique par des électrons. Le « Tube à rayons X » appelé aussi tube de Coolidge est constitué d'une ampoule de verre dans laquelle, baignant dans le vide, on trouve d'un côté un filament de tungstène qui constitue la cathode, et de l'autre côté, d'une plaque d'un alliage de métaux ayant un nombre atomique  $Z$  élevé. Cette plaque, qui constitue

l'anode du dispositif, et donc la cible du flux d'électrons, est associée à un circuit de liquide de refroidissement.



On produit d'abord des électrons libres par effet thermoélectrique (échauffement d'un filament électrique) appelé cathode, on obtient des électrons d'énergie cinétique nulle ; pour les faire parvenir sur la plaque bombardée (appelée anode) il faut les accélérer ; pour cela on applique entre la cathode et l'anode une différence de potentiel  $U$  élevée (de 10 à 150 kV), les électrons arrivent sur l'anode avec une grande énergie, une grande partie de cette énergie (99%) est transformée en chaleur, et une petite quantité (1%) est transformée en rayons X



Le principe de la conservation de l'énergie donne :  $(E_c)_{\text{finale}} - (E_c)_{\text{initiale}} = e \cdot U$

$e$  = charge de l'électron

Comme  $(E_c)_{\text{initiale}}$  est nulle donc  $(E_c)_{\text{finale}} = e \cdot U$

Par la suite on notera  $(E_c)_{\text{finale}}$  par  $E_{CA}$

$E_{CA}$  = énergie cinétique des électrons au niveau de l'anode.

Exemple si  $U = 100 \text{ KV}$  les électrons auront au niveau de l'anode une énergie cinétique égale à :

$$E_{CA} = e \cdot U \quad E_{CA} = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 \cdot 10^3 \quad E_{CA} = 1.6 \cdot 10^{-14} \text{ Joule}$$

En électronvolt on aura  $E_{CA} = 1.6 \cdot 10^{-14} / 1.6 \cdot 10^{-19}$  car  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$$E_{CA} = 10^5 \text{ eV} \quad \text{soit} \quad E_{CA} = 100 \text{ KeV}$$

### **Méthode directe :**

Si  $U = 100 \text{ KV}$  alors les électrons auront une énergie cinétique :  $E_{CA} = e \cdot U \quad E_{CA} = e \cdot 100 \text{ KV}$

$$E_{CA} = 100 \text{ KeV}$$

Si  $U = 50 \text{ KV}$  alors les électrons auront une énergie cinétique :  $E_{CA} = e \cdot U \quad E_{CA} = e \cdot 50 \text{ KV}$

$$E_{CA} = 50 \text{ KeV}$$

Remarque : en appliquant la ddp  $U$  on fournit une puissance électrique :

$$P_{\text{elec}} = U \cdot I \quad U = \text{ddp}$$

$I$  = intensité du courant électrique ( $I$  = représente les électrons qui partent de la cathode)

### **Remarque :**

Pour régler ce dispositif, on peut modifier trois paramètres:

1- L'intensité du courant que l'on fait circuler dans le filament, qui va faire varier la quantité d'électrons émis par cette cathode, et du coup la quantité de rayons X émis par l'anode qui reçoit ce flux variable d'électrons. On fait varier cette intensité de 5 à 50 mA.

2- La tension appliquée entre le filament cathode, et la plaque d'alliage anode qui détermine l'énergie des rayons X émis par l'anode.

3- La composition de l'alliage de métaux utilisé pour la plaque anode qui conditionne donc sa nature chimique et détermine donc la longueur d'onde du rayonnement émis.

### III. Etude des spectres

Les rayons X sont émis par la cible selon deux mécanismes :

- le freinage des électrons par les atomes de la cible crée un rayonnement continu (rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung).
- les électrons accélérés ont une énergie suffisante pour exciter certains des atomes de la cible, en perturbant leurs couches électroniques internes. Ces atomes excités émettent des rayons X en retournant à leur état fondamental.
- Une faible portion, 1% environ de l'énergie cinétique cédée par les électrons est rayonnée sous forme de rayons X, les 99 % restants sont convertis en énergie thermique.

Tous les électrons arrivent sur l'anode avec la même énergie cinétique  $E_{CA}$ , ils interagissent avec les atomes de l'anode, soit avec le noyau, soit avec les électrons.

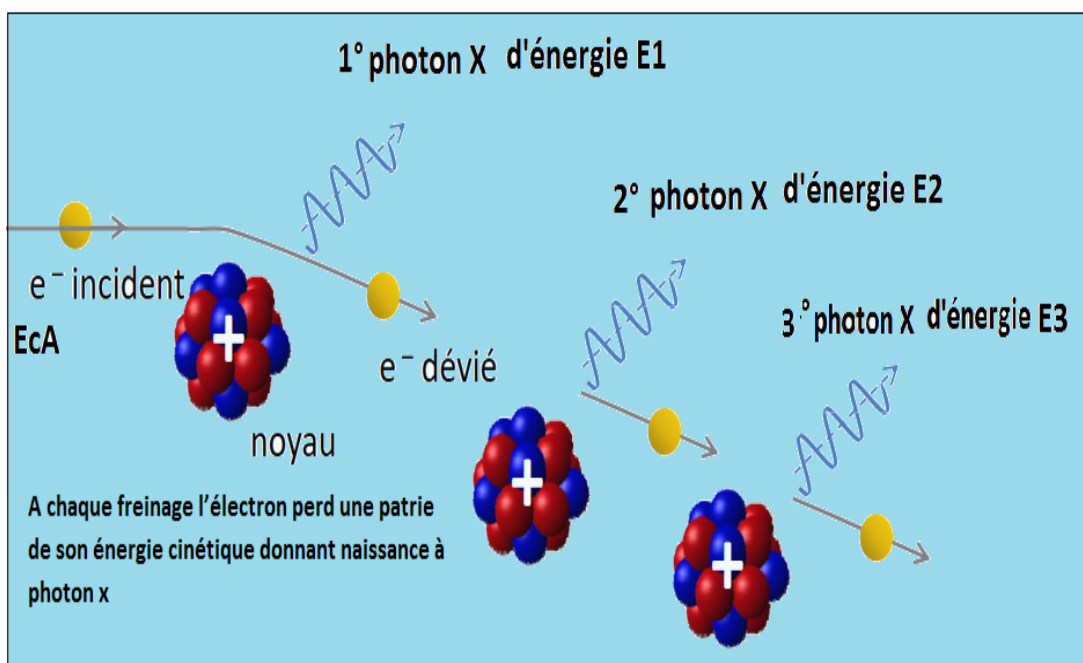
#### A - Interactions avec les noyaux

L'électron arrive avec une énergie cinétique  $E_{CA}$ , il passe à proximité d'un noyau de l'anode, il subit une force d'attraction coulombienne, il est dévié et freiné, son énergie cinétique diminue et il y a émission d'un photon appelé photon x, (l'énergie du photon dépend de la distance entre l'électron et le noyau) et ainsi de suite il continue sa trajectoire, à chaque fois qu'il passe à côté d'un noyau, il perd une partie de son énergie donnant chaque fois naissance à un photon X et ceci jusqu'à épuisement totale de son énergie  $E_{CA}$ .

Le freinage de l'électron s'accompagne d'une perte d'énergie cinétique par rayonnement de freinage (brehmstrahlung). Cette perte d'énergie est essentiellement dispersée en chaleur, ce qui nécessite de refroidir l'anode en la faisant tourner sur elle-même. Une faible quantité de cette énergie est convertie en photons X

Quelle sont les énergies possibles des photons ; puisque c'est l'énergie cinétique  $E_{CA}$  des électrons arrivant sur l'anode qui se transforme en photon X donc la valeur minimale des photons formés est égale au minimum à zéro et au maximum à  $E_{CA}$ , c.à.d. on obtient des photons X dont les énergies vitrifient :

$$0 \leq E \leq E_{CA}$$



### Remarque :

Le photon le plus énergétique est obtenu lorsque l'électron arrivant sur l'anode, subit un freinage total, dans ce cas toute l'énergie cinétique  $E_{CA}$  est transformée en un photon X.

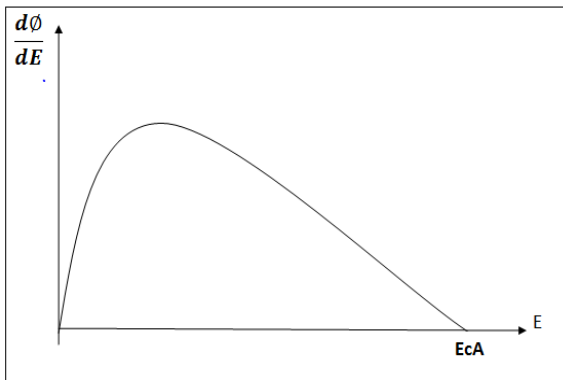
Donc le photon le plus énergétique a une énergie égale à  $E_{CA}$ , à ce photon correspond la plus petite longueur d'onde donnée par

$$E_{CA} = \frac{h.c}{\lambda_0} \quad \lambda_0 = \frac{h.c}{E_{CA}}$$

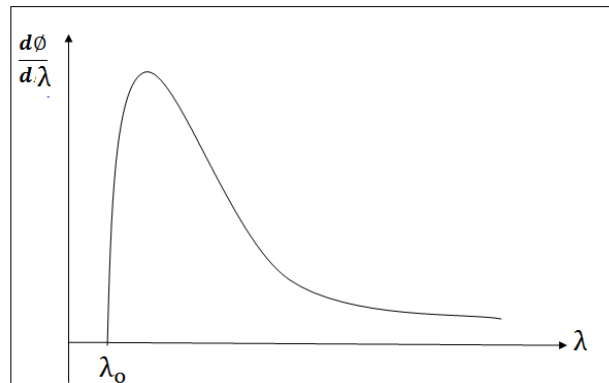
Ou bien  $\lambda_0 = \frac{12400 \text{ eV.A}}{E_{CA}(\text{eV})}$

$\lambda_0$  = longueur d'onde minimale

Le tracé des spectres des photons X en énergie et en longueur d'onde donne ce qui suit :



Spectre continu en énergie



Spectre continu en longueur d'onde

### B - Interactions avec les électrons de l'anode

Soit un atome de l'anode, ses électrons sont sur les couches K, L, M, N....avec des énergies de liaison  $W_K$ ,  $W_L$ ,  $W_M$ ,  $W_N$ ....

L'électron provenant de la cathode pénètre dans l'anode avec une énergie cinétique  $E_{CA}$ , s'il heurte un électron de la cathode il pourra l'arracher à condition que son énergie cinétique  $E_{CA}$  soit supérieure à l'énergie de liaison de l'électron, ce dernier en quittant sa case crée un vide, alors un électron d'une couche supérieure vient combler ce vide ; le changement de niveau de cet électron donne naissance à un photon X, l'électron qui a changé de niveau lui aussi engendre un vide, donc un autre électron vient le combler donnant naissance à un autre photon x et ainsi de suite donc il y a émission de photons X dont l'énergie dépend des énergies de liaisons des électrons cibles.

Exemple: La ddp accélérative est  $U=60 \text{ KV}$

$$W_K = 69,52 \text{ KeV} ; W_L = 11,27 \text{ KeV} ; W_M = 2,26 \text{ KeV} ; W_N = 0,40 \text{ KeV}$$

Quelle sont les raies(les photons) possibles, calculer leur énergie.

Les électrons arrivent sur l'anode avec une énergie cinétique  $E_{CA} = e \cdot U$

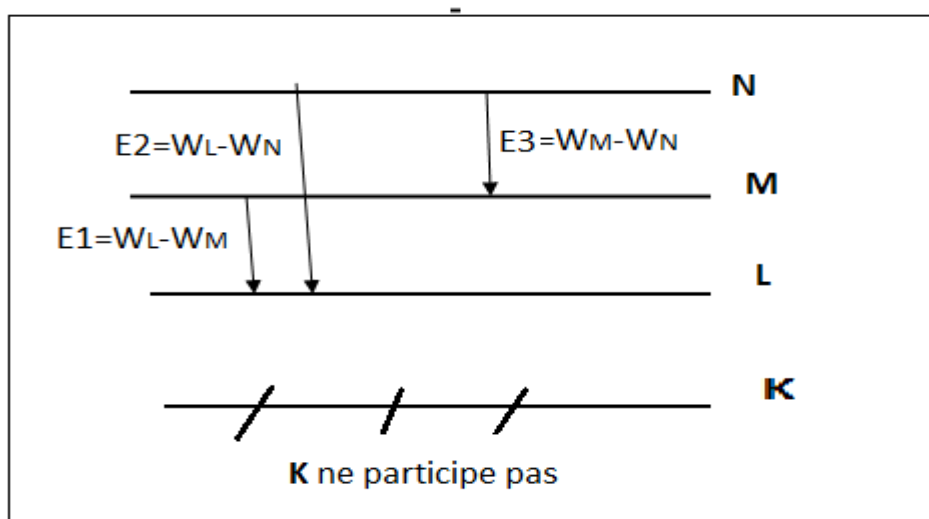
$U = 60 \text{ KV}$  donc  $E_{CA} = 60 \text{ KeV}$

On cherche les niveaux qui participent aux transitions des électrons :

On a  $W_K = 69.9 \text{ KeV} > E_{CA} = 60 \text{ KeV} > W_L > W_M > W_N$

On ne peut arracher l'électron de la couche K, par suite le niveau k ne participe pas aux transitions électroniques, par contre les autres niveaux (L, M, N) ont des énergies inférieures, ils pourront participer aux transitions électroniques. Les transitions possibles sont les suivantes : M vers L, N vers L et N vers M

Les transitions possibles sont représentées sur la figure suivante



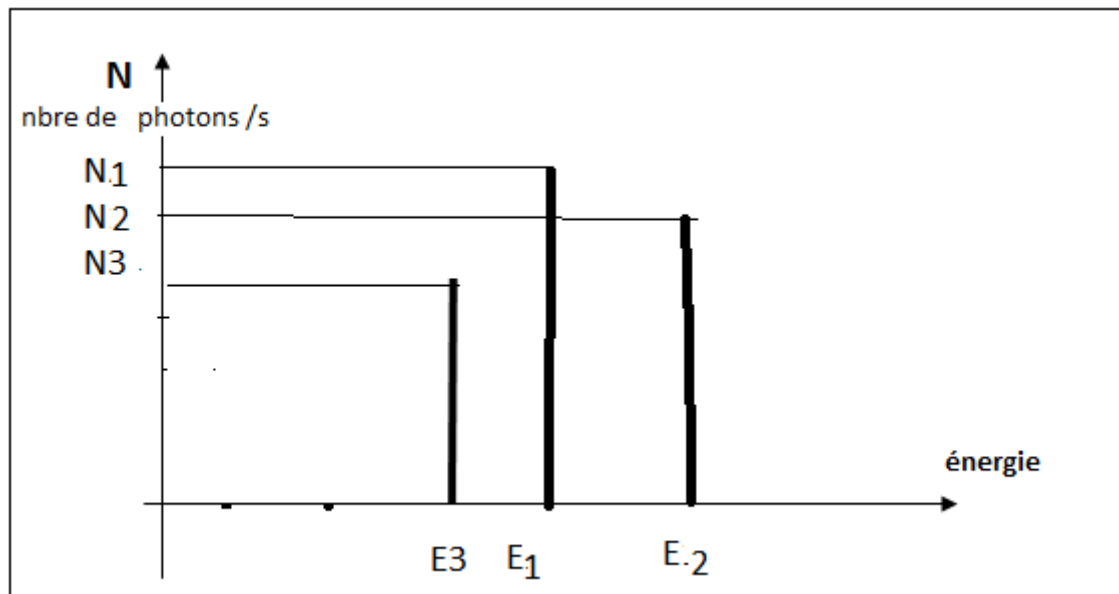
L'énergie du photon est donnée par  $E = W_{\text{final}} - W_{\text{initial}}$

$E1 = 11.27 - 2.26$   $E1 = 9.01 \text{ KeV}$

$E2 = 11.27 - 0.4$   $E2 = 10.87 \text{ KeV}$

$E3 = 2.26 - 0.4$   $E3 = 1.86 \text{ KeV}$

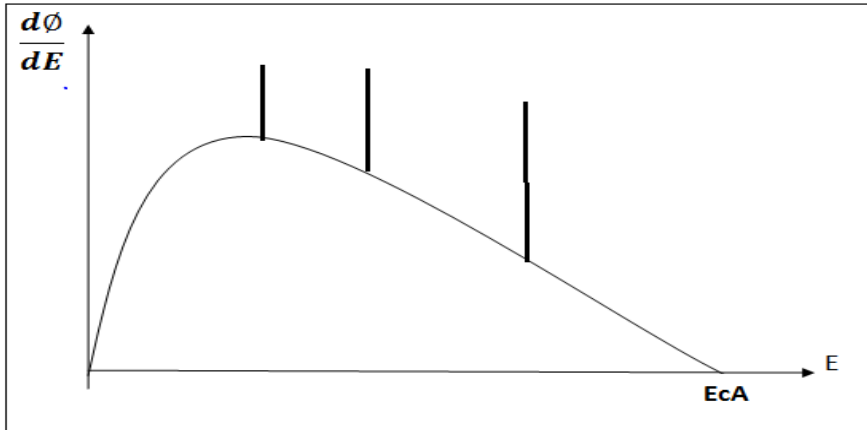
Le spectre discontinu correspondant à ces transitions est le suivant



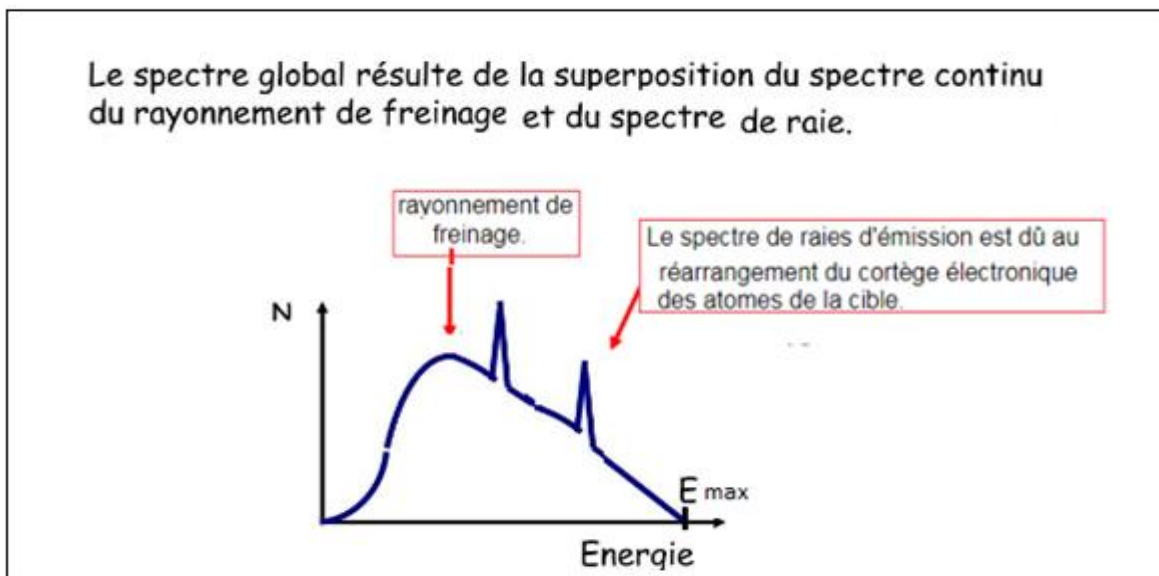
**CONCLUSION :** Les électrons arrivent sur l'anode avec une énergie cinétique  $E_{CA}$ , Ils interagissent :

- 1- Avec les noyaux de la cathode subissant des freinages donnant un spectre continu
- 2- Avec les électrons de la cathode engendrant des transitions électronique donnant naissance à un spectre discontinu.

La superposition ses deux spectres donne le spectre en énergie suivant :



### Spectre global dans le cas général



Remarque ; le nombre de transition (de raies) dépend de  $E_{CA}$  et des énergies de liaison de l'atome de l'anode (il peut être nul, égal à 1, 2, 3...)

### IV. Bilan énergétique

En appliquant la ddp  $U$  pour accélérer les électrons, on fournit une puissance électrique

$$P_{elec} = U.I$$

Cette puissance électrique sert à produire un rayonnement  $X$  de puissance  $\phi$ , au même temps il y a perte de puissance (dissipée par effet Joule) notée  $P_{chal}$  sous forme de chaleur au niveau de l'anode (l'anode chauffe)

On peut écrire :  $P_{elec} = \phi + P_{chal}$

Le rendement du tube à rayons X est  $r$  :  $r = \frac{\text{puissance rayonnée}}{\text{puissance fournie (puis elec)}}$

$$r = \frac{\phi}{U.I} \quad \phi = r. U. I$$

$I$  = intensité du courant

$$P_{\text{elec}} = \phi + P_{\text{chal}} \quad U.I = r.U.I + P_{\text{chal}}$$

$$P_{\text{chal}} = (1-r).U.I$$

L'élévation de la température de l'anode est donnée par :

$$P_{\text{chal}} . t = m. c . \Delta T$$

$$(1-r).U.I . t = m. c . \Delta T$$

$t$  = temps.

$m$  = masse de l'anode.

$C$  = capacité calorifique de l'anode.

$\Delta T$  = élévation de température de l'anode.

## V- Etude théorique

### 1) équation théorique du spectre continu en énergie.

L'étude théorique, donne pour le spectre l'équation suivante :

$$\frac{d\Phi}{dE} = k \times I \times Z \times (E_{CA} - E)$$

$\Phi$  = la puissance émise par le tube.

$k$  = constante, dépend de la nature du métal de la cible.

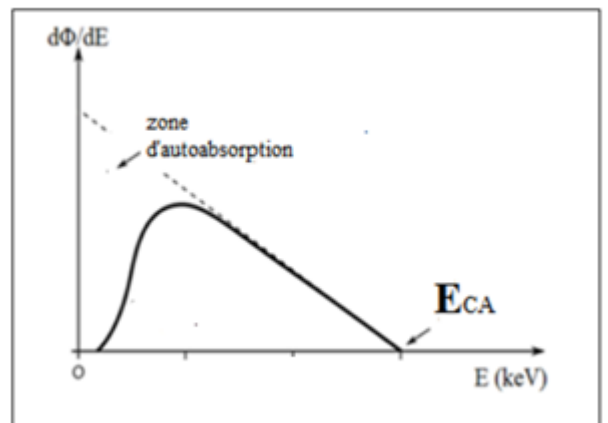
$I$  = Intensité du courant électrique.

$Z$  = Numéro atomique de l'anode.

$E$  = Énergie des photons X émis.

$E_{CA}$  = énergie cinétique des électrons au niveau de l'anode = énergie maximale des photons.

$$E_{CA} = e \times U$$



**Remarque :** La zone d'autoabsorption représente les photons de faibles énergies qui ne sortent pas de l'anode (ils sont absorbés par l'anode).

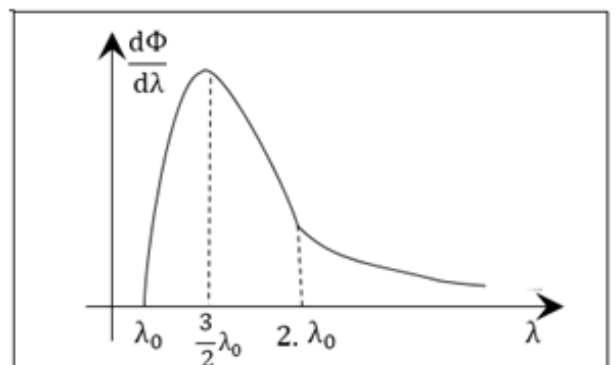
### 2) Équation du spectre continu en longueur d'onde

L'équation du spectre continu en longueur d'onde est donné par:

$$\frac{d\Phi}{d\lambda} = \frac{d\Phi}{dE} \times \left| \frac{dE}{d\lambda} \right| \quad (1)$$

$$\text{On a } E = \frac{h \times C}{\lambda} \rightarrow \frac{dE}{d\lambda} = \frac{-h \times C}{\lambda^2} \quad (2)$$

$$\frac{d\Phi}{d\lambda} = k \times I \times Z \times (E_{CA} - E) \quad (3)$$



En remplaçant (2) et (3) dans (1) on obtient l'équation du spectre en longueur d'onde :

$$\frac{d\Phi}{d\lambda} = k \times I \times Z \times (E_{CA} - E) \times \left(\frac{h \times C}{\lambda^2}\right)$$

## 2) Puissance du rayonnement

La puissance rayonnée, est égale à la surface en dessous de la courbe représentant le spectre.

$$\Phi_{\text{ray}} = \int_0^{E_{CA}} \left(\frac{d\Phi}{dE}\right) \cdot dE$$

$$\Phi_{\text{ray}} = \frac{1}{2} \times k \times I \times Z \times E_{CA}^2$$

## 3) Rendement du tube

Le rendement du tube est égal au rapport de la puissance rayonnée par la puissance électrique fournie.

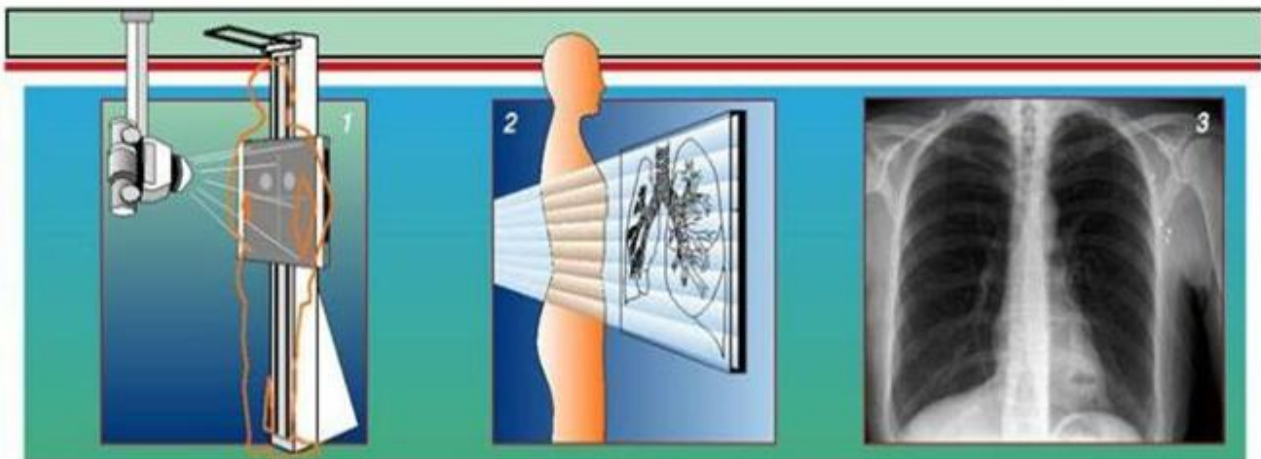
$$r = \frac{\Phi_{\text{ray}}}{P_{\text{elec}}} \quad r = \frac{\frac{1}{2} k \times I \times Z \times E_{CA}^2}{U \times I} \quad r = \frac{k \times Z \times (eU)^2}{2 \times U}$$

$$r = \frac{k \times Z \times e^2 \times U}{2}$$

## V. Imagerie médicale

Le faisceau de rayons produit par un tube à rayons X est orienté dans la direction de la partie du corps humain à examiner, les photons X interagissent avec les atomes du corps, alors leur nombre diminue c'est-à-dire que le faisceau est atténué, son intensité est différemment atténuée par les organes traversés selon leurs densités (coefficients d'atténuation différents). L'image est recueillie en sortie sur un détecteur (plaque photographique ou film radiographique par exemple). Le film est à l'origine blanc, plus il reçoit de RX plus il devient noir. Ainsi, les structures osseuses arrêtent les RX et apparaissent en blanc et les organes qui, comme les poumons, contiennent beaucoup d'air laissent passer les rayons et apparaissent en noir ou gris foncé. Entre ces deux extrêmes, toutes les nuances de gris existent.

### • PRINCIPE



TUBE → FAISCEAU RAYONS X

ATTENUATION PAR TISSUS

CAPTEUR → IMAGE PLANE

## Un dispositif d'imagerie médicale est constitué de deux grandes parties:

Un émetteur de rayons X, chargé de créer et d'envoyer les rayons X, qui seront par la suite projetés sur la partie du corps qui intéresse les médecins ; Et aussi d'un capteur qui analyse les rayons X et qui les transforme en images.

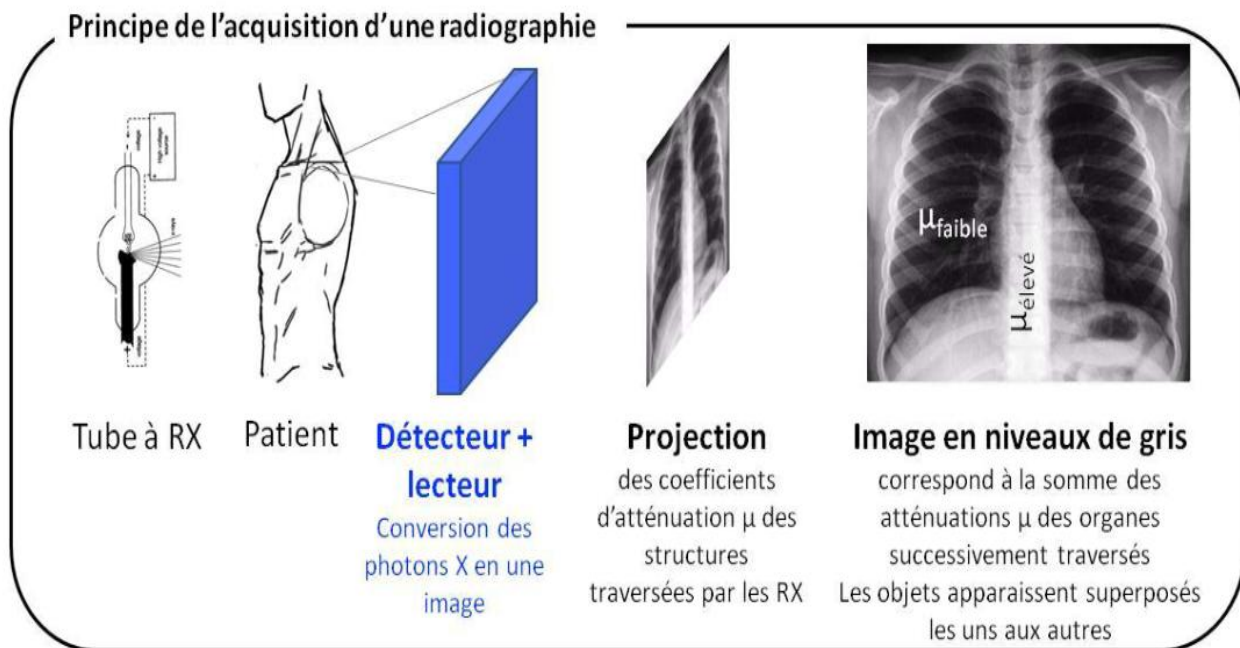


Schéma montrant la composition d'un dispositif d'imagerie médicale.

## La radiographie

La radiographie repose sur l'utilisation des rayons X qui ont la propriété de traverser les tissus de manière plus ou moins importante selon leur densité. Ainsi, une source émettrice de rayon X est placée devant le corps à radiographier et un détecteur est placé à l'arrière du corps. Les photons émis vont traverser le corps en étant plus ou moins absorbés par les tissus rencontrés sur leur chemin. Cela permet de différencier les os des muscles sur le cliché final.

