

RAYONS X

I - PRODUCTION DE RAYONS X (RX)

Comment sont-ils produits ?

C'est un électron qui passe dans la matière et qui interagit soit avec les électrons soit avec le noyau et dans tous les cas il génère des **photons de fluorescence** qu'on va appeler **photons X**.

Les rayons X utilisés en médecine sont produits grâce à des interaction des électrons avec la matière.

Interactions avec la matière :

Par collision

Soit les **rayons X caractéristiques** produits avec les principes généraux des interactions : excitation et ionisation (par collision).

Par freinage

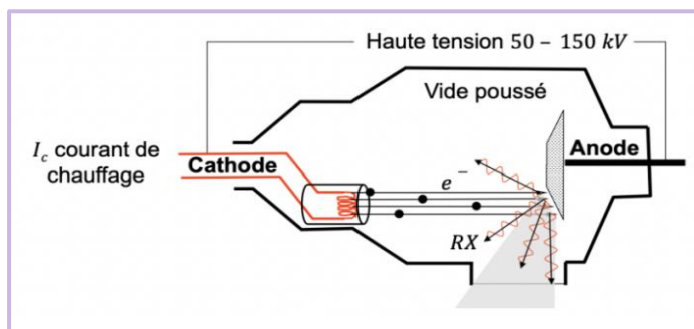
Soit les **rayons X produits spécifiquement par freinage** : par l'incurvation de la trajectoire des électrons lorsqu'ils passent à proximité du noyau.

Dans les deux cas les rayons X sont produits par des **tubes à RX**.

A - Le tube à rayons X

Le tube à RX est **dérivé du tube de Coolidge** qui date du 19ème siècle et qui servait aux physiciens de l'époque.

Le tube à RX est une **enceinte blindée** dans laquelle il y a un **vide poussé**. On a deux extrémités : d'un côté une **cathode** et de l'autre une **anode**. Entre les deux, on règle une haute tension U de 50 à 150 kV.



La cathode

C'est une sorte de filament dans lequel on fait passer un courant qu'on appelle courant de chauffage noté I_c . Sous l'effet de la haute tension et du vide poussé, ce filament va permettre l'émission d'électrons, des électrons sont arrachés et accélérés du filament de la cathode vers l'anode.

Au niveau de l'anode

Les électrons vont la percuter. Cette percussion de la cible : l'interaction du flux d'électrons avec l'anode, va provoquer la création de RX soit par l'interaction électron-électron (par collision) soit par l'interaction électron-noyau (par freinage). Ces RX vont diffuser et être collimatés en sortie du tube pour être utilisés à des fins d'imagerie.

B - Cathode = émetteur d'électrons

La cathode est à gauche c'est la zone où sont émis les électrons. On a un filament de tungstène dans lequel circule un courant de chauffage I_c dont la valeur est comprise entre 0,5 et 1 Ampère.

On a donc ce courant qui passe dans le filament et lorsque ce filament est assez chaud pour qu'il y est incandescence, il y a un effet thermoélectronique du fait de la haute tension qui règne entre la cathode et l'anode. Cet effet thermoélectronique va arracher des électrons à la cathode qui vont ensuite être accélérés en direction de l'anode.

Ce flux d'électron est appelé courant anodique noté i . Il est de l'ordre du mA.

Attention ne confondez pas avec le courant de chauffage I_c : le flux d'électrons va vers l'anode donc courant anodique :

Courant de chauffage I_c

→ arrache les électrons à la cathode

Courant anodique i

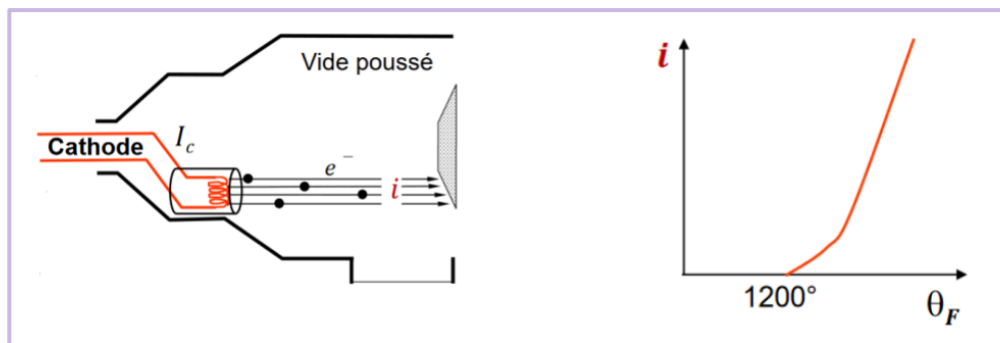
→ flux d'électrons en direction de l'anode

Il existe une relation entre le courant de chauffage I_c et le courant anodique i :

Cette relation n'est pas tout à fait linéaire puisque ça démarre à partir d'une certaine chaleur pour qu'il y ait l'effet thermoélectronique.

I_c permet d'augmenter la température du filament θ_F , et à partir d'un seuil, 1200°C pour le tungstène, il va se produire un effet thermoélectronique : les électrons sont arrachés à la cathode et accélérés, ce qui va créer le courant anodique.

Plus on chauffe la cathode, plus on augmente l'effet thermoélectronique et plus on augmente le flux d'électrons, donc i . Ainsi, **plus on augmente le courant de chauffage I_c plus i va augmenter.**



C - Haute tension accélératrice des électrons (U)

La haute tension, notée U , est appliquée entre la cathode et l'anode. Elle accélère les électrons dans le tube.

La tension a des valeurs comprises entre 50 et 150 kV selon le réglage du tube.

Haute tension accélératrice des électrons (U)

Cette énergie cinétique est exprimée non pas en joules, mais en **eV** :

Définition :

1 eV = énergie cinétique acquise par un électron sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 V

Donc l'énergie cinétique maximale des électrons du tube exprimée en eV est numériquement égale à la haute tension en Volt :

$$T = 1 \times U \Rightarrow T[\text{eV}] = U [\text{V}]$$

Exemple : pour $U = 100 \text{ kV} = 100 \text{ keV}$

Elle est responsable de l'énergie cinétique T des électrons, avec laquelle ils vont percuter l'anode cible. Plus la tension est élevée, plus l'énergie cinétique sera élevée.

D - L'anode = cible

L'anode est la **cible** où ont lieu les **interactions électrons/matière** qui vont créer les **rayons X** : collision, freinage, chaleur.

Cette anode est en métal parce que l'interaction sera d'autant plus importante si elle est composée d'atomes riches en électrons donc qui ont des **Z élevés**, c'est-à-dire des **cibles métalliques** en général.

Il y a beaucoup d'interactions qui vont produire de la chaleur donc il va y avoir un **problème important de dégagement** de chaleur au niveau de l'anode.

Cela a deux conséquences :

On va utiliser des **alliages métalliques (tungstène + rhénium)** dont le point de fusion est élevé, pour éviter que l'anode ne fonde.

On va également utiliser des **dispositifs de dispersion de la chaleur**, notamment une **anode tournante** : disque biseauté qui va tourner de manière à ce que l'impact des électrons accélérés par la haute tension se distribue sur toute la circonférence et non pas sur un seul point.

On a sur la photo du dessus à gauche une anode tournante, où on voit la trace de l'impact du courant anodique. On voit aussi qu'elle a été endommagée (en haut à droite) parce qu'à un moment ou à un autre, le système de rotation n'a plus fonctionné et donc le flux d'électrons a percuté profondément la zone de manière continue en faisant fondre l'alliage à ce niveau.



II - SPECTRE DES RAYONS X

A - Description

Notion de spectre énergétique : c'est une représentation graphique de la distribution énergétique d'un rayonnement.

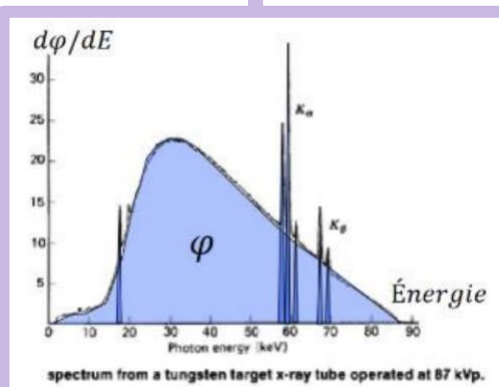
On retrouve sur le spectre énergétique :

En abscisse :

Énergie du rayonnement, exprimée en général en keV pour un spectre de rayons de X

En ordonnée :

$d\phi/dE$: c'est la fraction du flux porté par le rayonnement pour chaque intervalle d'énergie, en quelque sorte le nombre de photons qui ont l'énergie donnée en abscisse, entre E et dE.



Le spectre de rayons X possède deux composantes :

- Une composante continue
- Une composante de raie

La surface sous cette courbe est égale à la valeur du flux énergétique ϕ , c'est la quantité de rayons X.

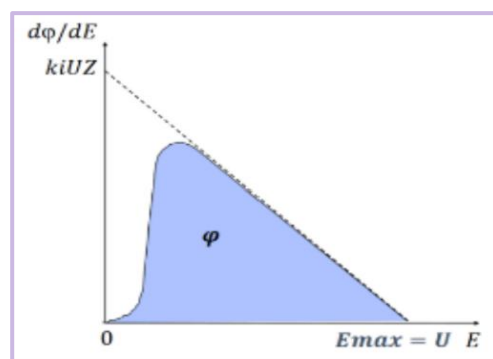
B - Explication de la composante continue

Cette composante continue est liée aux rayonnements de freinage, c'est-à-dire lorsque l'électron interagit avec la cible en passant à proximité des noyaux de celle-ci. Cela génère des photons qui sont non quantifiés, donc toutes les énergies de photon sont possibles entre 0 et l'énergie maximale, qui est donnée par la haute tension.

En fonction de la distance au noyau, le photon rayonné sera plus ou moins énergétique mais de manière continue. C'est ce phénomène qui donne la partie continue du spectre.

Le spectre théorique correspondant à ce phénomène devrait être triangulaire (représenté en pointillés sur le schéma) parce qu'on devrait avoir soit pas d'énergie soit un maximum d'énergie.

Le spectre réel lui est représenté par la courbe du fait des phénomènes d'auto-absorption qui ne sortent pas du tube et qui donnent cet aspect en dôme du spectre énergétique continu.



Flux énergétique ϕ (puissance émise par le tube) :

$$\phi = \frac{\text{Facteur de proportionnalité} \times \text{Courant anodique} \times \text{Numéro atomique} \times E_{\text{max}}}{2} = \frac{\text{Numéro atomique} \times \text{Courant anodique} \times \text{Haute tension}^2}{2}$$

Facteur de proportionnalité
Courant anodique
Numéro atomique
Haute tension

L'énergie maximum des rayons X produits (en eV) est numériquement égale à la haute tension du tube (en V) puisque c'est la situation où toute l'énergie cinétique de l'électron incident a été transformée en rayons X par freinage

C - Explication de la composante de raies

Cette composante de raies est due aux rayonnements caractéristiques : c'est-à-dire aux interactions électron-électron : par collision. Il va y avoir ionisation ou excitation d'un électron des atomes de la cible, qui va donner des réarrangements et des photons de fluorescence.

Prenons un exemple pour illustrer cela : après ionisation d'un électron de la couche K du Tungstène (74W), quels sont les raies caractéristiques qu'il est possible d'observer ?

NB : Modèle de Bohr-Sommerfeld (avec des sous-couches) ; U = 90 kV

keV	K	L _I	L _{II}	L _{III}	M _I	M _{II}	M _{III}	N _{III}	e libre
W _i	-69,5	-12,1	-11,5	-10,2	-2,8	-2,6	-2,3	-0,43	0
W _i - W _K	0	57,4	58	59,3	66,7	66,9	67,2	69,0	69,5
Raies			K - L _{II}	K - L _{III}		K - M _{II}	K - M _{III}	K - N _{III}	K

1^{ère} ligne :

Énergie des électrons sur chacune des différentes couches. Cette fois il ne s'agit plus du simple modèle de Bohr, mais d'un modèle un peu plus sophistiqué qui est le modèle de **Bohr-Sommerfeld** et dans lequel il y a des sous-couches.

2^{ème} ligne :

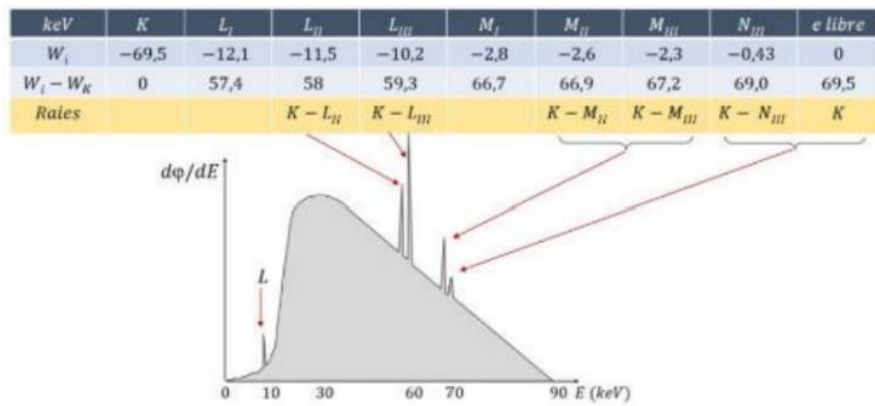
C'est la différence d'énergie qui règne entre la couche K et une des couches. Lorsqu'on a ionisé un électron de la couche K, un autre électron va venir combler cette vacance électronique et il va venir de l'une de ces couches. En fonction de la couche de laquelle il vient, il va générer un photon de fluorescence, qui est ici un photon X caractéristique, qui va avoir l'une des valeurs de la deuxième ligne.

Si l'électron vient de la couche L1, son énergie sera de 69,5 - 12,1, c'est-à-dire 57,4, etc.. pour chacune des couches.

S'il s'agit d'une ionisation et que l'électron qui vient combler la vacance sur la couche K est un électron libre, le photon de fluorescence correspondant sera égal à la valeur de l'énergie de liaison de l'électron de la couche K, donc 69,5.

En théorie, on peut avoir **autant de raies que de composantes** de réarrangement et nous pouvons voir tous ces photons de fluorescence. Mais en pratique (ligne jaune), **seules quelques raies** sont visibles.

D - Spectre réel complet : continu + raies



1 - Si on part des énergies les plus élevées, on voit que la raie caractéristique liée au passage d'un électron de la couche N3 à la couche K c'est 69,0 keV. Si c'est un électron libre qui vient combler la couche K c'est 69,5 keV. Ces deux raies sont donc **confondues**, du fait de la résolution énergétique du spectre, et correspondent donc à la première raie la plus énergétique.

2 - Il y a également une deuxième raie, qui confond les photons de fluorescence/photons X caractéristiques liés soit à la venue sur la couche K d'un électron en provenance de la couche M2 ou de la couche M3, qui sont de l'ordre de 67 keV.

3 - Ensuite, on a une raie autour de 59 keV qui correspond au réarrangement lorsque l'électron vient de la couche L3, puis une raie à 58 keV lorsque l'électron vient de la couche L2.

4 - Pour terminer, on voit également qu'il y a un pic du côté des faibles énergies, qui correspond à des phénomènes de réarrangement lorsque que l'excitation ou l'ionisation portera sur un électron non pas de la couche K mais de la couche L.

Continu

→ rayonnement par freinage

Raies

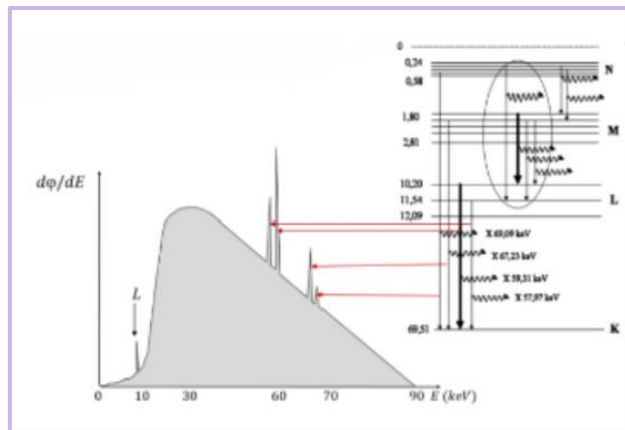
→ interaction électron-électron avec les réarrangements et l'émission des photons de fluorescence

Si on résume et le présente d'une manière différente : on peut voir que la raie la plus énergétique correspond au réarrangement d'un électron qui vient sur la couche K à partir de la couche N, voir un électron libre.

Ensuite, la raie suivante correspond à des réarrangements en provenance de la couche M.

Les deux autres viennent d'un retour d'un électron de la couche K à partir de sous- couches de la couche L. La raie la plus à gauche est entourée sur le schéma à droite et correspond au retour d'un électron depuis les couches N et M vers la couche L.

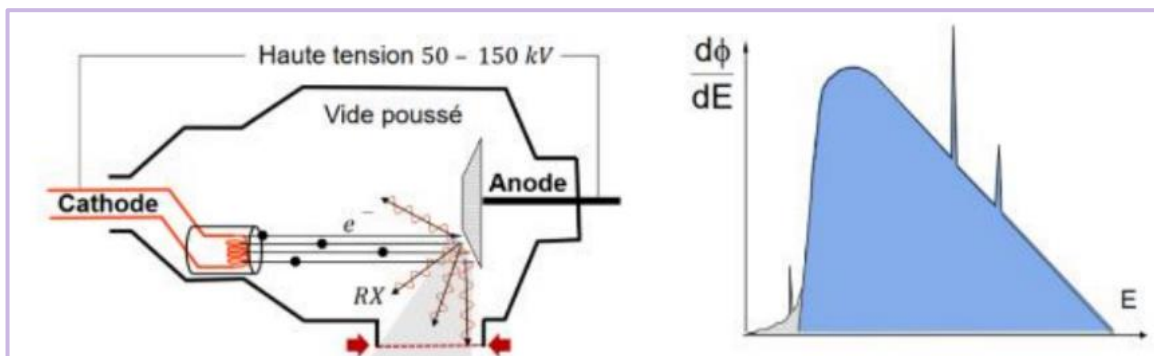
Voilà pour le spectre rayons X, qui est composé d'une partie continue liée à l'interaction des électrons avec le noyau, et une partie avec des raies qui sont liées aux réarrangements lorsqu'il y a eu une interaction par collision au niveau des atomes de la cible.



III - CARACTERISTIQUES D'EXPOSITION

A - Filtre métallique

A la sortie du tube à RX, il existe un filtre métallique qui va absorber les photons de faibles énergies qui sont en pratique inutiles pour l'imagerie. C'est pour cela que les photons de faibles énergies n'apparaissent pas sur le spectre réel, contrairement au spectre théorique.



B - Rendement d'un tube à rayons X

Le rendement c'est le rapport entre ce que l'on consomme en énergie pour fabriquer les RX et ce que l'on tire en énergie des rayons X.

La puissance consommée c'est ce qui est consommée pour mettre en mouvement les électrons et créer le courant anodique :

Puissance consommée P :

$$P = U \times i$$

Elle est fonction de la haute tension U et du courant anodique i.

La puissance rayonnée φ , c'est les photons qui sont produits

Puissance consommée P :

$$\varphi = \frac{kiZU^2}{2} = KiZU^2$$

avec $K = k/2$

Attention : K remplace la constante k divisée par 2.

On peut établir le rendement du tube à RX:

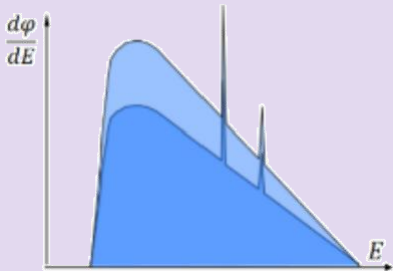
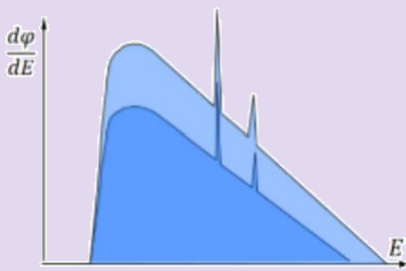
Puissance consommée P :

$$r = \frac{\varphi}{P} = \frac{KiZU^2}{Ui} = KZU$$

Le rendement dépend du Z de la cible : on utilise donc des anodes avec un Z élevé (d'où l'utilisation du tungstène par exemple 74W).

Ce qui est surtout important c'est que ce rendement est faible : il est de seulement quelques %. En effet, plus de **95%** de l'**énergie cinétique** des électrons est convertie en **chaleur** au niveau de la cible.

C - Paramètres du tube

Le milliampérage i	Le kilovoltage U
= courant anodique	= valeur de la haute tension
<p>Si on augmente i, on augmente φ :</p> <p>-> $\varphi = KiZU^2$</p>  <p>Le flux de RX est <u>augmenté</u> sans qu'on modifie le reste des caractéristiques énergétiques :</p> <p>La <u>surface</u> sous le spectre <u>augmente</u> mais les <u>raies</u> ne changent pas puisqu'elles sont liées au Z de la cible.</p> <p>En effet, la <u>valeur maximale</u> est liée à la <u>haute tension</u>, qui elle <u>ne change pas</u>. Les raies sont caractéristiques de la cible.</p>	<p>Si on augmente U, on augmente :</p> <ul style="list-style-type: none"> - φ - E_{\max} ($E_{\max} = U$)  <p>Les RX sont dits plus pénétrants.</p> <p>On a une <u>augmentation</u> de la surface sous la courbe et une <u>augmentation</u> de l'énergie maximale des RX.</p> <p>On <u>augmente</u> φ car <u>proportionnelle</u> à U, et E_{\max} car l'<u>énergie cinétique</u> maximale des électrons, et donc des photons produits, dépend de la <u>haute tension</u>. On va donc avoir plus de photons, mais aussi des photons <u>plus énergétiques</u>, donc dits <u>plus pénétrants</u>.</p>

IV - CONCLUSION

<ul style="list-style-type: none"> • <u>Les rayons X associent deux types de photons :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Rayonnement de freinage → spectre continu - Raies caractéristiques de la cible → spectre de raies • <u>Avec une cible (anode) donnée, le réglage du tube à rayons X :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Permet de jouer sur l'énergie maximale des photons de freinage - Sur le flux de rayons X - Pas sur les raies caractéristiques de la cible

The end !

On se retrouve la semaine prochaine pour ma dernière fiche sur l'application médicale aux rayons X

