

---

# LES RAYONS X

---

Salut les bggg, je tiens à remercier votre best tutrice d'anat petit bassin Esla car j'me suis bcp inspiré de sa ronéo qui était bien complète ! Courage et bonne lecture !

Voici un petit bonus, c'est une vidéo qui explique comment on produit les rayons X :

<https://youtu.be/8qGJfMI2XAM?t=488> (durée 4 min)

Je vous ai mis le lien au moment précis de la vidéo parce que je sais que vous avez pas le time (mais vous pouvez regarder en entier)

---

## I. PRODUCTION DES RAYONS X

---

Les **rayons X** sont des photons produits par l'interaction des **électrons** avec la matière, conformément aux mécanismes que nous avons vus dans le cours interactions particules/matière. Ces électrons interagissent de **2 manières** avec la matière :

- **Par collision** : ils produisent alors des rayons X caractéristiques
- **Par freinage** : lorsqu'ils passent à proximité du noyau

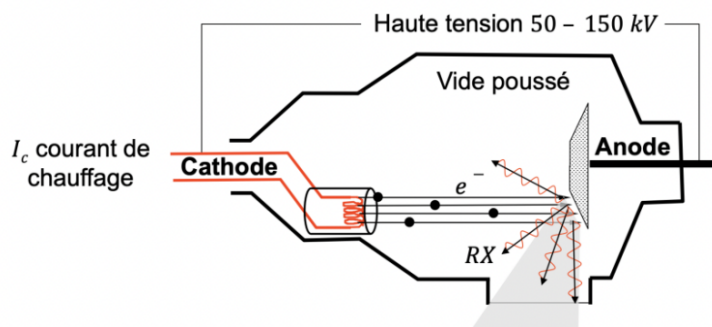
Les rayons X utilisés en médecine sont produits par des **tubes à RX**.

---

### A. LES TUBES A RAYONS X

---

Le **tube à RX** est dérivé de ce qu'on appelait le tube de Coolidge au 19ème siècle, qui a beaucoup servi aux physiciens de cette époque.



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

Ce montage permet de faire passer un **courant de chauffage** noté  $I_c$  depuis la **cathode**. Sous l'effet de la haute tension, des électrons sont arrachés et accélérés du filament **de la cathode vers l'anode**. Au niveau de l'anode, les électrons interagissent avec la cible soit par **collision** (rayons X caractéristiques), soit par **freinage**. Ces RX vont diffuser et être collimatés en sortie du tube pour être utilisés à des fins d'imagerie.

## B. LA CATHODE : ÉMETTEUR D'ÉLECTRONS

Si on détaille au niveau de la cathode : c'est là que sont **émis les électrons** qui vont produire les RX. C'est un filament de tungstène, dans lequel circule un courant de chauffage noté  $I_c$ , dont la valeur est comprise entre 0,5 et 1 Ampère.

Lorsque ce courant circule dans le filament de tungstène de la cathode et le porte à incandescence, il se produit un effet **thermoélectronique** à partir d'une certaine température. Associé à la haute tension qui règne dans le tube, cet effet thermoélectronique va arracher des électrons à la cathode, qui vont ensuite être accélérés en direction de l'anode.

→ Cela va créer un flux d'électrons entre la cathode et l'anode que l'on appelle **courant anodique**, et que l'on note  $i$ . Il est de l'ordre du **mA** ! **A ne pas confondre avec le courant de chauffage  $I_c$**  !

(mémo : le flux d'électrons va vers l'anode, donc courant ANODIQUE).

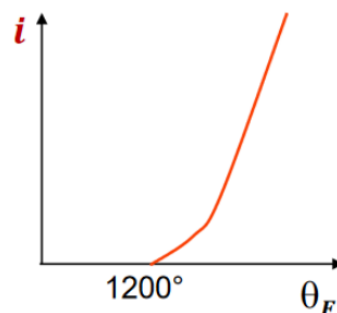
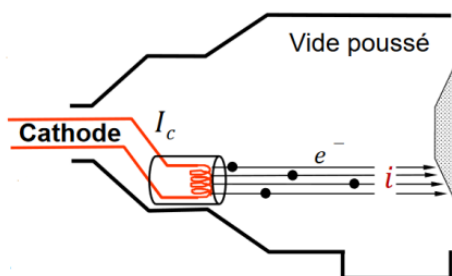
**Courant de chauffage  $I_c$  : arrache les électrons à la cathode**

**Courant anodique  $i$  : flux d'électrons en direction de l'anode**

o

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

- $I_c$  permet d'augmenter la température du filament  $\theta_F$ , et à partir d'un seuil, 1200°C pour le tungstène, il va se produire un effet thermoélectronique : les électrons sont arrachés à l'anode 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  $i$ . **Donc si  $I_c$  augmente, alors  $i$  aussi.**



### C. HAUTE TENSION ACCÉLÉRATRICE DES ÉLECTRONS (U)

---

→ La **haute tension**, notée  **$U$** , est appliquée entre la cathode et l'anode. Elle accélère les électrons qui sont arrachés à la cathode vers l'anode.

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

→ 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.**

→ Cette énergie cinétique est exprimée non pas en joules (J), 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  $U = 100 \text{ kV} = 100 \text{ keV}$*

### D. ANODE = CIBLE

---

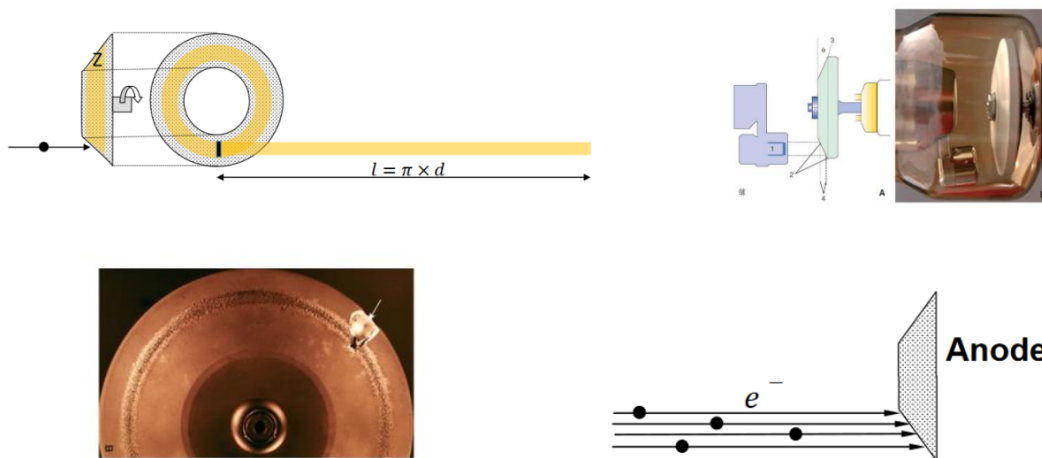
L'anode est la cible où ont lieu les **interactions électrons/matière** : **collision, freinage, chaleur**.

La **probabilité d'interaction  $\propto Z$**  des électrons est **proportionnelle au  $Z$**  des atomes de la cible : c'est pour cette raison qu'on utilise des cibles avec des atomes de  $Z$  élevés, c'est-à-dire des cibles métalliques en général.

Par ailleurs, il y a une **très forte production de chaleur** au niveau de la cible. 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. SPECTRES DES RAYONS X

### A. DESCRIPTION

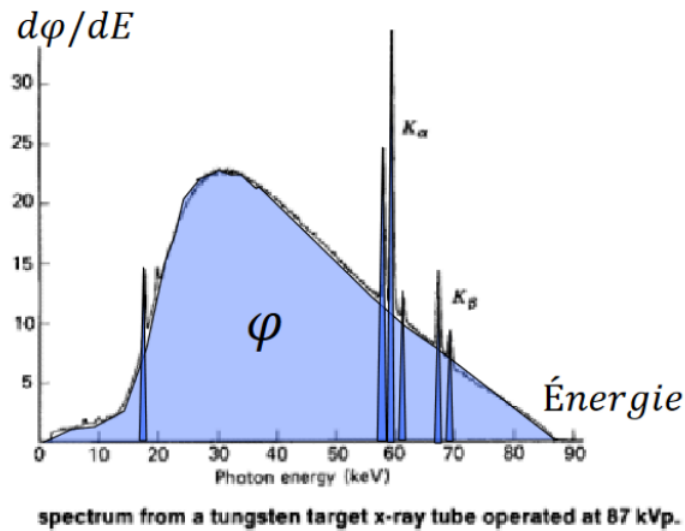
Notion de spectre énergétique : c'est une représentation graphique de la distribution énergétique d'un rayonnement.

- 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**

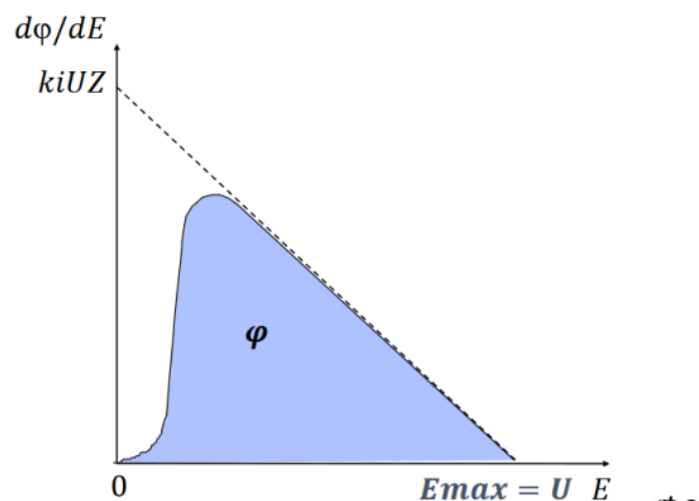
La surface sous cette courbe est égale à la valeur du **flux énergétique  $\varphi$** , qui donne en quelques sortes l'intensité de ce flux de rayons X.



## B. EXPLICATION DE LA COMPOSANTE CONTINUE

Cette composante **continue** est due à la production des rayons X qui se fait par 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.

Le spectre théorique correspondant à ce phénomène serait triangulaire, et représenté en pointillés sur le schéma. Le spectre réel lui est représenté par la courbe (du fait des phénomènes d'auto-absorption).



L'énergie maximum des rayons X produits (en eV) est numériquement égale à la haute tension du tube (en V).

Le flux énergétique  $\varphi$  (puissance énergétique émise par le tube) est égal à :

$$\varphi = \underset{\substack{\text{Facteur de proportionnalité} \\ \text{Intensité anodique}}}{kiZU} \times \underset{\substack{\text{Haute tension} \\ \text{Numéro atomique}}}{E_{max}} = \frac{kiZU^2}{2}$$

### C. EXPLICATION DE LA COMPOSANTE DE RAIE

Cette composante de **raies** est due à l'**ionisation** ou à l'**excitation** d'un électron des atomes de la cible, qui va donner des réarrangements et des **photons de fluorescence**. Les raies sont dues aux interactions par **collision des électrons avec la matière**.

Exemple : après ionisation d'un électron de la couche K du Tungstène (74W), quels sont les X caractéristiques qu'il est possible d'observer ?

NB : Modèle de Bohr-Sommerfeld

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
<b>Raies</b>			$K - L_{II}$	$K - L_{III}$		$K - M_{II}$	$K - M_{III}$	$K - N_{III}$	K

Sur la première ligne nous avons l'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.

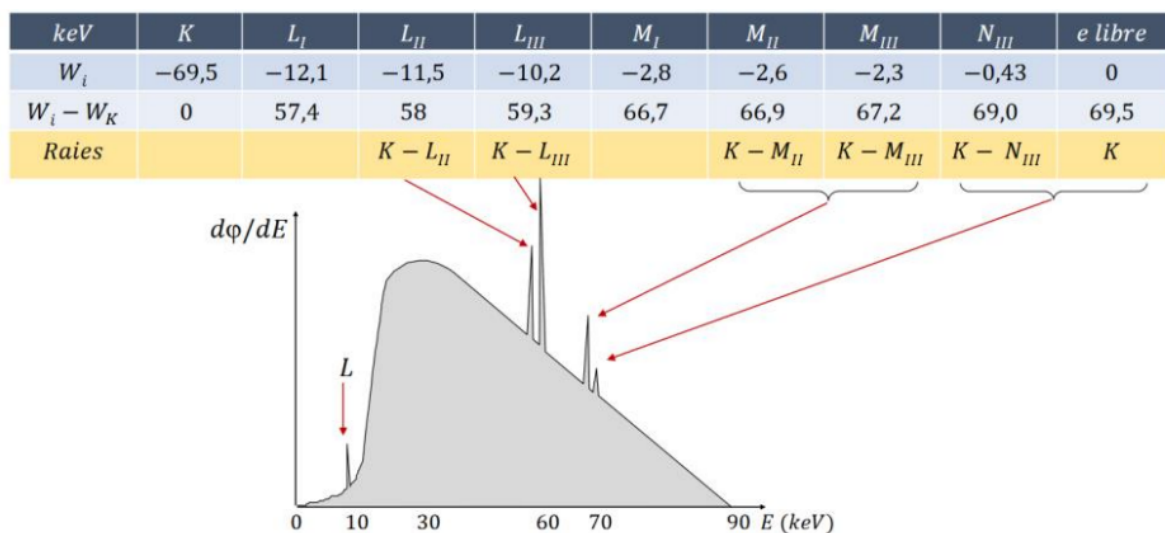
La deuxième ligne c'est la différence d'énergie qui règne entre la couche K et une des couches. Lorsqu'on a ionisé un électron de la couche K, un autre électron va venir combler cette vacance électronique et il va venir de l'une de ces couches. En fonction de la couche de laquelle il vient, il va générer 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, **seules quelques raies** sont visibles, indiquées sur la dernière ligne du tableau.

#### D. SPECTRE RÉÉL COMPLET : CONTINUE + RAIE



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.

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.

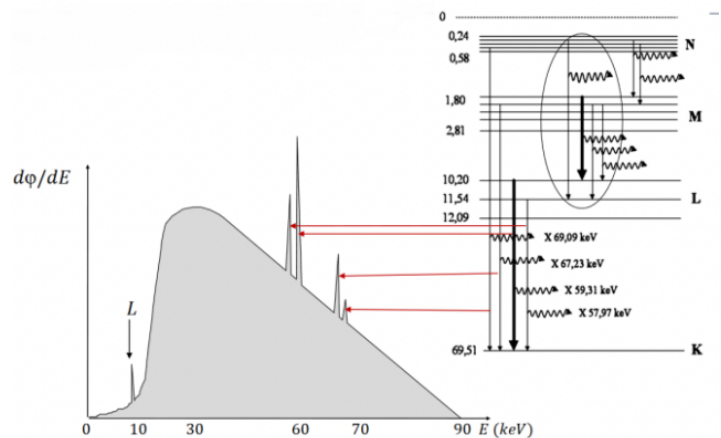
Ensuite, on a une raie autour de 59 keV qui correspond au réarrangement lorsque l'électron vient de la couche L3, puis une raie à 58 keV lorsque l'électron vient de la couche L2.

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.

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.



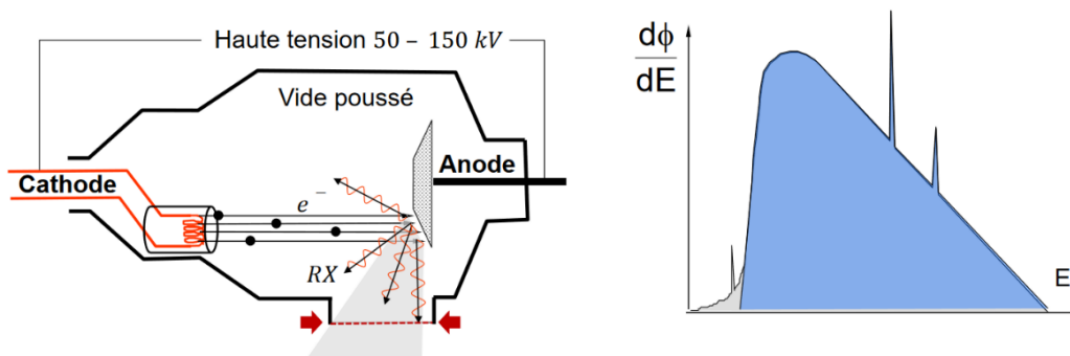
*Ces exemples ne sont pas à apprendre par cœur, c'est juste pour illustrer.*

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. CARACTÉRISTIQUE 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 RAYON X

---

Le plus important, c'est de voir quel est le **rendement** d'un tube à RX. Le rendement c'est **ce qui est produit par rapport à ce qui est consommé**.

→ Ce qui est consommé c'est la « Puissance consommée  $P$  » :

$$P = Ui$$

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

C'est la puissance qui a été consommée pour communiquer une énergie cinétique  $U$  aux électrons.

Ce qui est produit c'est les **photons**, donc la puissance rayonnée  $\varphi$ , le flux énergétique de RX.

$$\varphi = \frac{kizU^2}{2} = KiZU^2 \quad \text{avec } K = k/2$$

*Attention :  $K$  remplace la constante  $k$  divisée par 2.*

Donc si on établit le rendement  $r$  d'un tube à RX :

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

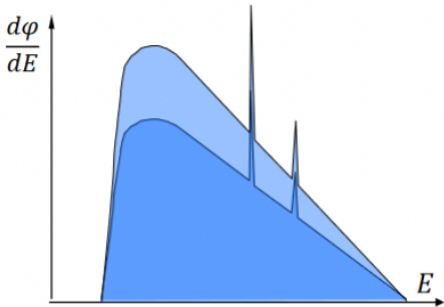
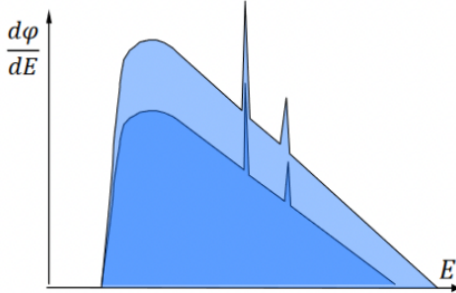
Le rendement dépend de  $Z$  : on utilise donc des anodes avec un  **$Z$  élevé** (d'où l'utilisation du tungstène par exemple 74W).

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. PARAMÈTRE DU TUBE

Le « milliampérage »  $i$  et le « kilovoltage »  $U$  :

Le radiologue va pouvoir régler son tube à RX avec 2 paramètres :

Le milliampérage $i$	Le kilovoltage $U$
C'est le courant anodique	C'est la valeur de la haute tension
<p>Si on augmente <math>i</math> on augmente <math>\varphi</math> :</p> <p><math>\varphi = KiZU^2</math></p>  <p>Le flux de RX <u>augmente</u> sans modification des caractéristiques énergétiques.</p> <p>On va avoir un spectre sous lequel la <u>surface</u> est plus <u>importante</u>. Cependant, ses caractéristiques énergétiques ne sont <b>pas</b> modifiées : la valeur maximale du spectre n'est pas modifiée, ni ses <b>raies caractéristiques</b>. En effet, la valeur maximale est liée à la haute tension, qui elle ne <b>change pas</b>. Les raies sont caractéristiques de la cible.</p>	<p>Si on augmente <math>U</math> on augmente :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\varphi</math></li> <li>- <math>E_{\max}</math> (<math>E_{\max} = U</math>)</li> </ul>  <p>Les RX sont dits plus pénétrants.</p> <p>On <u>augmente</u> <math>\varphi</math> car proportionnelle à <math>U</math> et <math>E_{\max}</math> car l'<u>énergie cinétique</u> maximale des électrons, et donc des photons produits, dépend de la <u>haute tension</u>.</p> <p>On va donc avoir plus de photons, mais aussi des photons <u>plus énergétiques</u>, donc dits <b>plus pénétrants</b>.</p>

## IV. CONCLUSION

---

♥ Les rayons X associent deux types de photons :

- Rayonnement de freinage → spectre continu
- Raies caractéristiques de la cible → spectre de raies

♥ Avec une cible (anode) donnée, le réglage du tube à rayons X :

- 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