

Rayon x

Salut l'équipe, on se retrouve pour un cours assez important qui précède celui de l'application aux rayons X. Le prof a fait ce cours en présentiel donc le cours est complet (il ne change absolument pas de l'année dernière) si vous êtes chaud on attaque !

1. Production des 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 interactions 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)**.

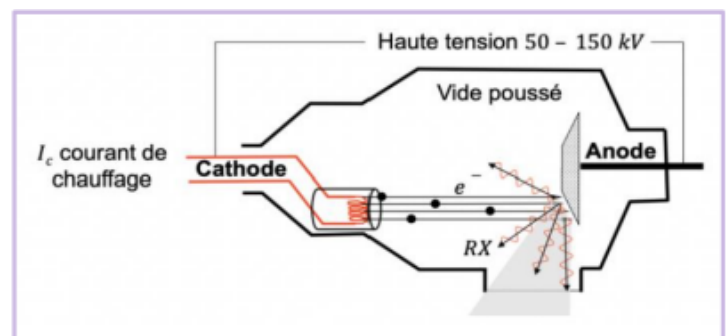
Par freinage : **Soit les rayons X produits spécifiquement par freinage** : par l'incurvation de la trajectoire des électrons lorsqu'ils passent à proximité du noyau.

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

A) Le tube à RX

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.

- L'anode :

L'anode est une cible et quand les électrons vont la percuter il va y avoir une interaction du flux de d'électrons (de la cathode) avec l'anode. Ceci 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. ++

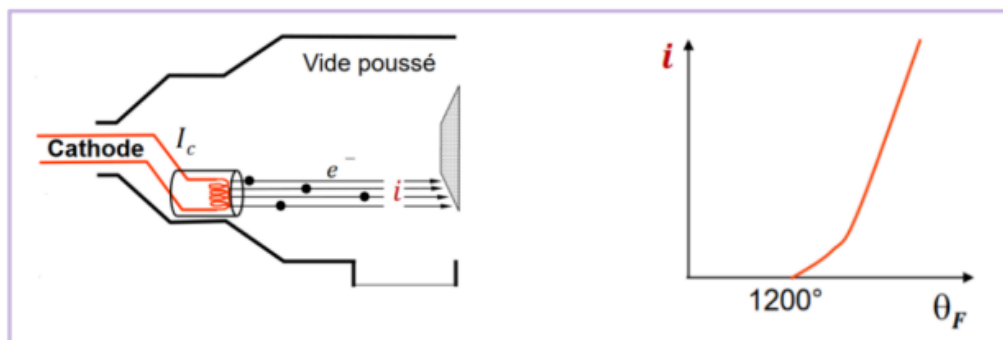
ATTENTION : ne pas confondre avec le courant de chauffage I_c : le flux d'électrons va vers l'anode donc courant anodique :

- **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.**



En gros vous augmenter I_c donc vous augmenter la capacité d'arracher des électrons en augmentant la température donc le flux i est plus fort

C) Haute tension accélératrice des électrons (U)

On va un peu faire une liste de course pour parler des caractéristiques mais si jamais il y a dans la fiche de l'année dernière une carte mentale qui reprend ces points

- 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.
- Elle est **responsable de l'énergie cinétique T des électrons** (logique car on a dit qu'elle accélère les 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, mais en **eV**

Définition 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 :**

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

Le prof a insisté dessus en cours, La tension U et l'énergie cinétique T ne sont pas égales, mais leur valeur le sont. Exemple pour U = 100kV on a T = 100keV

Il peut faire tomber ce piège donc faites bien la différence entre les 2

D) L'anode = cible

L'anode **est la cible** (je crois que vous avez compris) 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. (Le but c'est de créer un max d'interaction entre les électrons qui viennent du flux de la cathode et ceux de la matière (anode) c'est pour ça qu'on choisit une cible riche en électrons pour maximiser nos chances de créer des interactions)

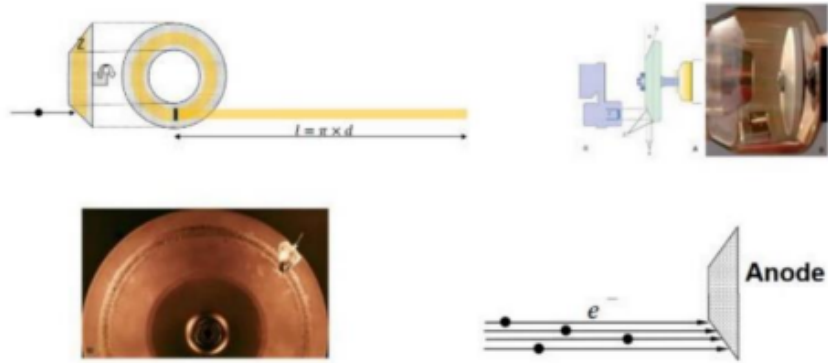
Il y a beaucoup d'interactions qui vont produire de la chaleur donc il va y avoir **un problème important de dégagement** de chaleur au niveau de l'anode

Ceci à 2 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.

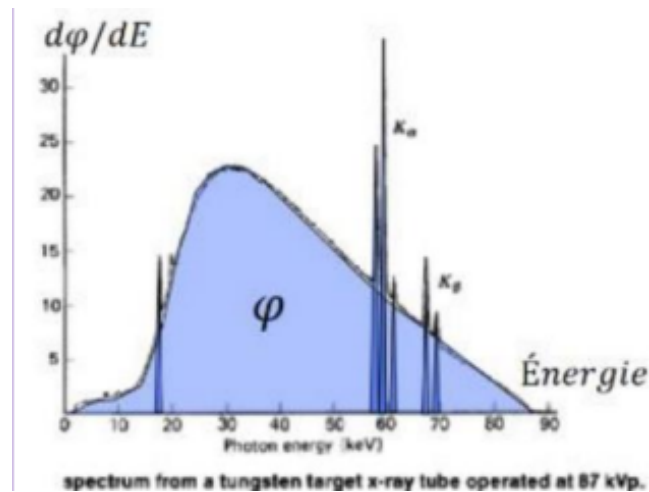
On a sur la photo du dessus à gauche une anode tournante, où on voit la trace de l'impact du courant anodique. On voit aussi qu'elle a été endommagée (en haut à droite) parce qu'à un moment ou à un autre, le système de rotation n'a plus fonctionné et donc le flux d'électrons a percuté profondément la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



2. Spectre des rayons X

A) Description

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



- 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.
- En abscisse : **Energie** du rayonnement, exprimée en général en **keV** pour un spectre de rayons de X

Le spectre de rayon X possède 2 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.

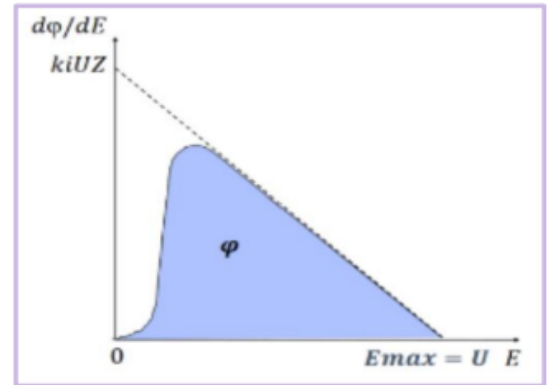
B) La composante continue

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. (Il faut en quelque sorte un seuil d'énergie pour que ça marche)



Flux énergétique φ (puissance émise par le tube) :

$$\varphi = \frac{\text{Facteur de proportionnalité} \times \text{Courant anodique} \times \text{Numéro atomique} \times E_{max}}{2} = \frac{kiZU^2}{2}$$

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

Vous commencez à connaître le prof il aime mettre des formules sans trop expliqué mais reprenez bien les composantes de la formule c'est important

C) La composante de raie

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 ?

Le prof a précisé en cours que nous utiliseront pour ce cours le modèle de Bohr-Sommerfeld un petit peu plus évolué que le modèle classique de Bohr car il a des sous-couches. Ici U = 90kV

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

Ligne 1 :

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.

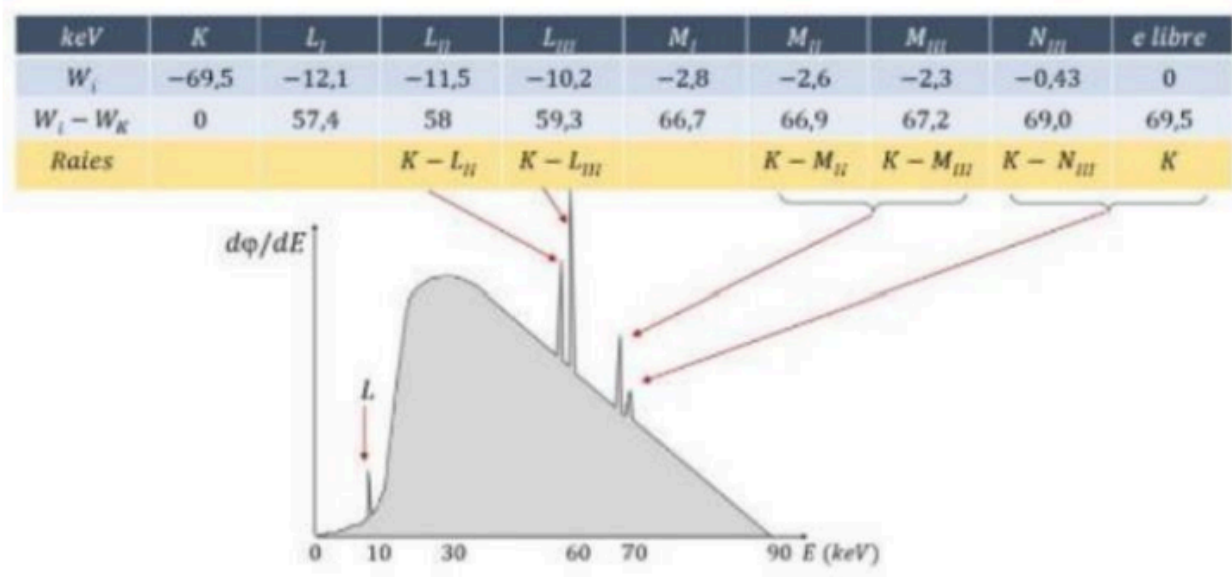
Ligne 2

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 58keV 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.

On récapitule (et on rappelle) :

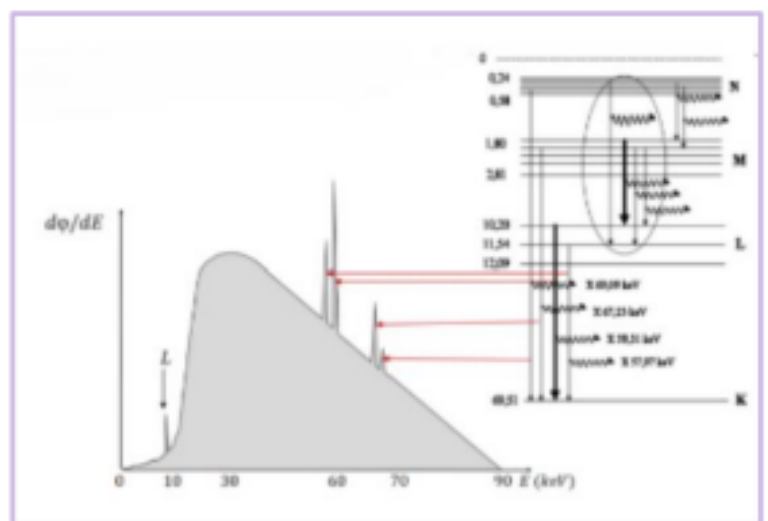
- Composante continue → **Rayonnement par freinage**
- Composante de raies → **interaction électron-électron avec les réarrangements et l'émission des photons de fluorescence**

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.

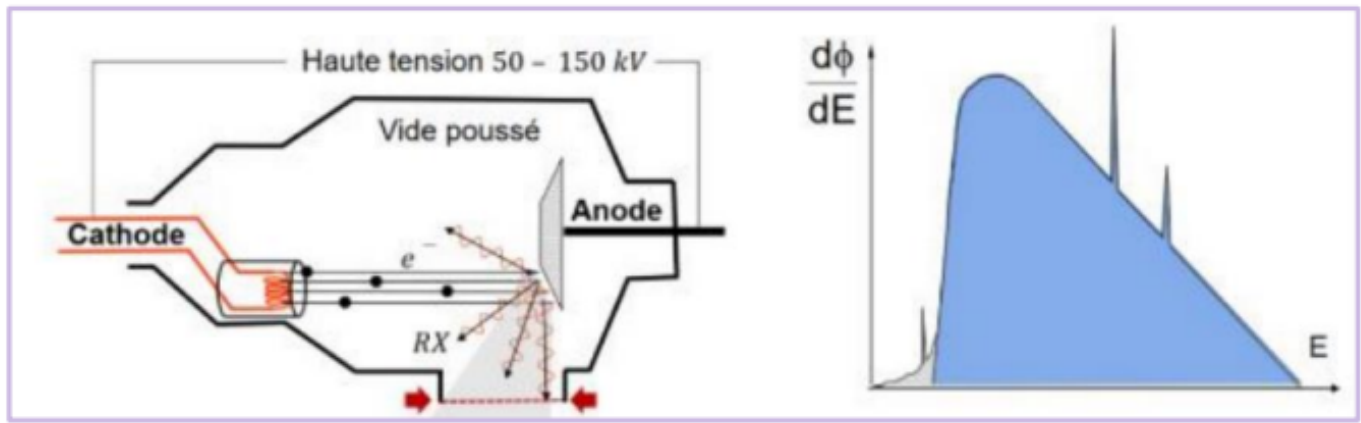
Voilà pour **le spectre rayons X**, qui est **composé d'une partie continue liée à l'interaction des électrons avec le noyau**, et **une partie avec des raies qui sont liées aux réarrangements** lorsqu'il y a eu une interaction par **collision au niveau des atomes de la cible**.



3. CARACTERISTIQUES D'EXPOSITION

A) Filtre métallique

À 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 consommé P : c'est ce qui est consommée pour mettre en mouvement les électrons et créer le courant anodique :

$P = U * i \rightarrow$ Elle est fonction de **la haute tension U** et du **courant anodique i**

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

Elle se calcule de la manière suivante : $\varphi = \frac{kiZU^2}{2} = KiZU^2$

Avec $K = k/2$ (c'est pour ça que le 2 au dénominateur a disparu faites attention le différence entre K majuscule et k minuscule est pas très visible mais les 2 sont des constantes)

On peut donc établir le rendement r : $r = \frac{\varphi}{P} = \frac{KiZU^2}{Ui} = KZU$


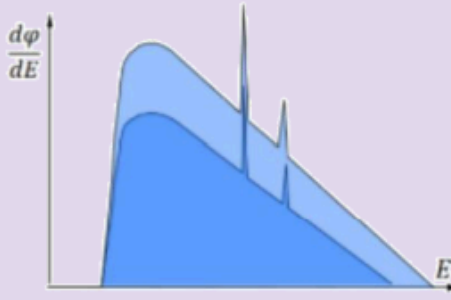
Retenez bien ces formules il a dit que c'était important.

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**.

Ok la team on arrive sur une partie courte mais importante et pour ça je vais reprendre simplement le tableau de l'ancienne tutrice qui résume parfaitement le point. Son tableau est très beau et je ferais pas mieux donc merci à elle.

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 <u>Z</u> 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 <u>plus pénétrants</u>.</p> <p>On a une <u>augmentation</u> de la <u>surface</u> sous la <u>courbe</u> et une <u>augmentation</u> de l'<u>énergie maximale</u> des RX.</p> <p>On <u>augmente</u> φ car <u>proportionnelle à U</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 <u>plus de photons</u>, mais aussi des photons <u>plus énergétiques</u>, donc dits <u>plus pénétrants</u>.</p>

Conclusion:

- **Les rayons X associent 2 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

Voilà c'est la fin du cours, il a fait des qcm en cours je vous conseille d'aller voir la ronéo

Aujourd'hui ça sera des dédis culinaire :

Dédis au fromage et à tout plats à base de fromage

Dédis au saumon (et je parle pas de votre ex)

Dédis aux sauces (je préfère les sauces à mes potes sachez-le)

Dédis pâtes la base mais toujours excellent

Dédis aux sushis même si on doit vendre son âme pour en manger

Dédis au barbecue bordel ça me manque déjà

Dédis à vous surtout (je veux pas vous manger la team hein)