

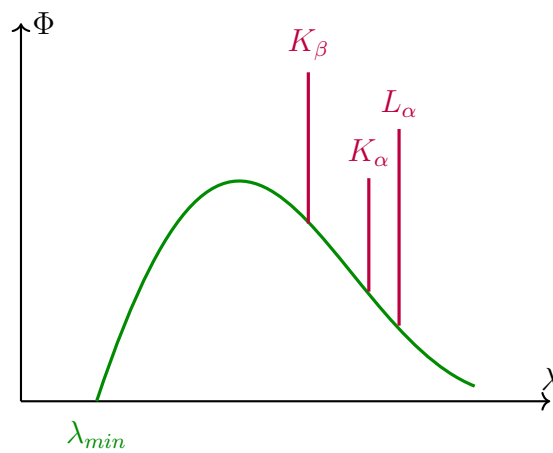
U.E 3.2
PHYSIQUE APPLIQUÉE

SEMESTRE 1

Production de rayons X

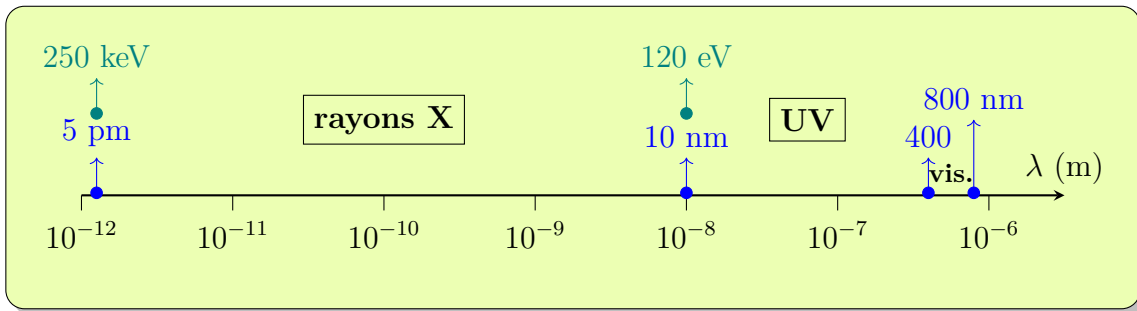
David ALBERTO
david.alberto@ac-normandie.fr

DTS I.M.R.T
2020 / 2021



Dans ce chapitre ...

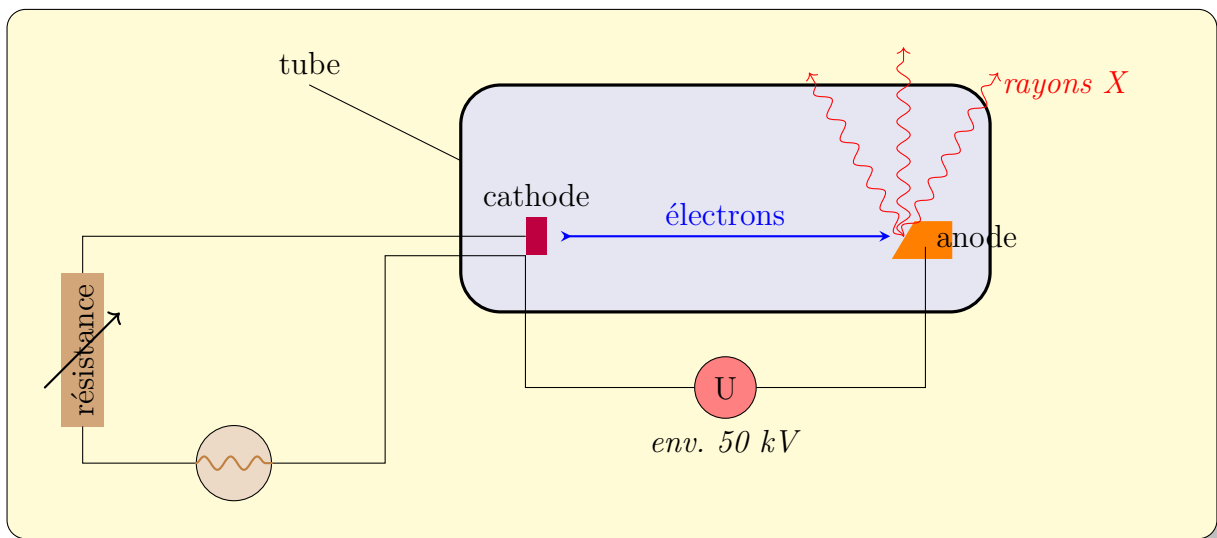
I.	Description du tube à rayons X	1
II.	Spectre d'émission de rayons X	2
	II.1 ◦ Intensité du courant à travers le tube	2
	II.2 ◦ Allure du spectre	2
	II.3 ◦ Interprétation du spectre continu	3
	II.4 ◦ Interprétation du spectre de raies	5
III.	Bilan de puissance dans le tube à rayons X	6
	III.1 ◦ Expression du rendement	6
	III.2 ◦ Application numérique	6



I. DESCRIPTION DU TUBE À RAYONS X

Les rayons X ont été découverts par l'allemand Wilhelm Roentgen, en 1895.

Plusieurs technologies de tube se sont succédé depuis. Les tubes actuels sont toujours basés sur le modèle du *tube de Coolidge* (1913).



- un premier circuit électrique, alimenté en tension alternative, qui sert à chauffer la cathode, et permet l'émission d'électrons par effet thermoélectronique.
- un deuxième circuit, qui maintient une tension continue (de l'ordre de quelques dizaines de kV) entre l'anode et la cathode.
- les électrons issus de la cathode sont accélérés vers l'anode.
- en arrivant sur l'anode, les électrons interagissent avec les atomes de l'anode. Ces interactions donnent lieu à l'émission de rayons X.

II. SPECTRE D'ÉMISSION DE RAYONS X

II.1 ○ Intensité du courant à travers le tube

La circulation des électrons de la cathode vers l'anode constitue un courant électrique, d'intensité I . De la même façon, un courant électrique dans un fil est un flux d'électrons à l'intérieur du fil.

Par définition, l'intensité d'un courant est la quantité de charges électriques circulant par unité de temps :

$$I = \frac{Q}{\Delta t} \quad Q \text{ étant la charge totale transportée par les électrons (en coulomb C)}$$

On peut aussi exprimer Q en fonction du nombre d'électrons N_e :

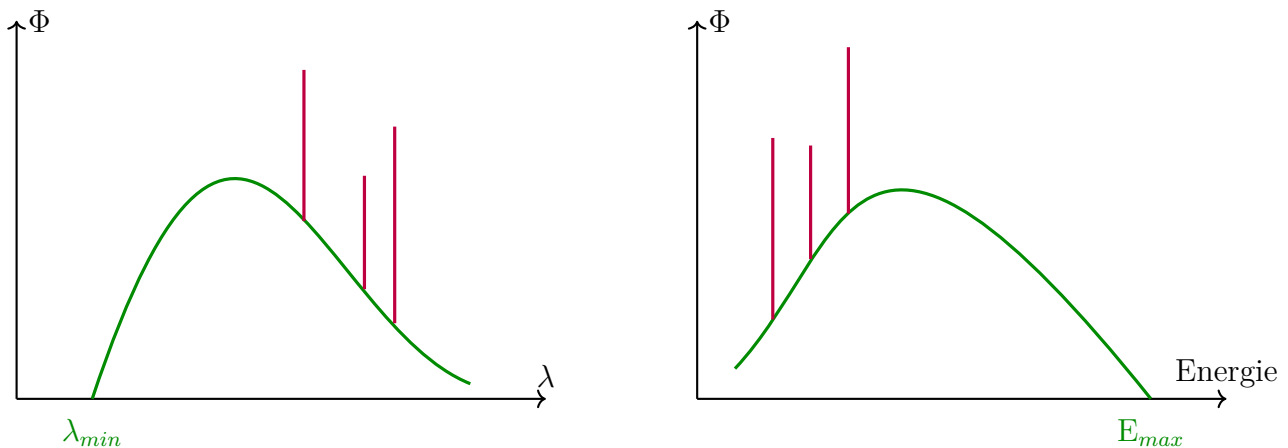
$$Q = N_e \cdot e \quad (e : \text{charge élémentaire})$$

$$I = \frac{N_e \cdot e}{\Delta t} = \Phi \cdot e \quad \text{si on note } \Phi \text{ le flux d'électrons (nombre d'électrons par seconde)}$$

$$I = \Phi \cdot e$$

Le flux d'électrons est proportionnel à l'intensité du courant à travers le tube.

II.2 ○ Allure du spectre



Le spectre de rayons X est constitué d'un **spectre continu** et d'un **spectre de raies**.

On repère plusieurs grandeurs remarquables :

- la longueur d'onde λ_{min} correspondant à la longueur d'onde minimale des photons X émis.
- pour le spectre de raies, des longueurs d'onde caractéristiques du matériau de l'anode.
- sur le spectre en énergie : une énergie maximale E_{max} des les photons émis.

Les deux parties du spectre correspondent à des phénomènes différents, au niveau de l'anode, et seront interprétés séparément.

II.3 ○ Interprétation du spectre continu

a. rayonnement de freinage

En passant à proximité du noyau chargé positivement, l'électron chargé négativement est soumis à une force d'attraction électrostatique qui le *dévie* de sa trajectoire, en le *freinant*.

Il perd alors une partie de son *énergie cinétique*, convertie en *rayonnement* sous forme de photons X :

c'est le **rayonnement de freinage**.

Ainsi le bilan énergétique s'écrit :

$$E_C \text{ é. incid.} = E_C \text{ é. émergent} + E_{\text{photon}}$$

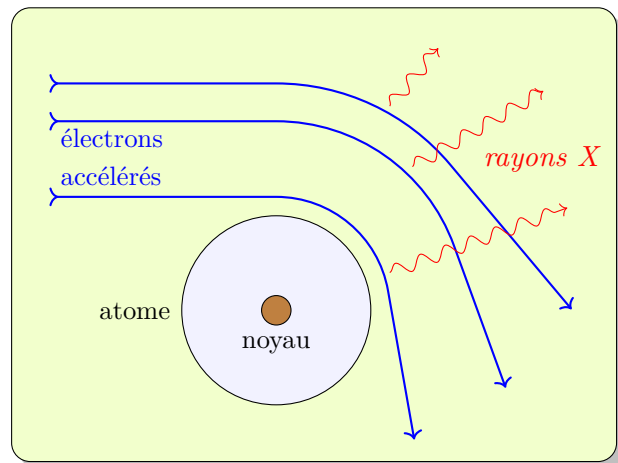


FIGURE 1 – Rayonnement de freinage.
La déviation - et donc l'échange d'énergie - dépend de la distance au noyau.

Plus l'électron passe près du noyau, plus il perd d'énergie et plus le rayonnement émis est énergétique.

Comme la distance entre l'électron et le noyau est une grandeur *continue*, les valeurs d'énergies possibles des photons émis sont *continues*, ce qui explique la présence du spectre continu.

b. Énergie cinétique acquise par les électrons

Entre la cathode et l'anode, les électrons sont soumis à une force électrostatique, dont l'expression est :

$$F_e = q \cdot E$$

E est la valeur du champ électrique qui règne entre la cathode et l'anode, du fait de la présence d'une tension alternative U.

$$E = \frac{U}{d}$$

Pendant le trajet des électrons entre la cathode et l'anode, ils subissent la force F_e qui a pour effet de les accélérer.

$$W = F_e \cdot d$$

Pour chiffrer l'énergie acquise lors de l'accélération, on a besoin d'exprimer le travail de la force électrostatique durant le mouvement :

$$W = q \cdot E \cdot d$$

$$W = q \cdot \frac{U}{d} \cdot d$$

$$W = q \cdot U$$

D'après le *théorème de l'énergie cinétique*, la variation d'énergie cinétique au cours du mouvement est égale au travail de la force électrique (on néglige le poids des électrons, très inférieur à la valeur de F).

$$\Delta E_c = W_{(F)}$$

$$\Delta E_c = q \cdot U$$

Si on néglige l'énergie cinétique initiale :

$$E_c = q \cdot U$$

ou, pour des électrons :

$$E_c = e \cdot U$$

Commentaires :

- le gain en énergie ne dépend finalement que de la charge des électrons, et de la tension accélératrice.
- l'énergie cinétique finale ne dépend pas des dimensions du tube.
- l'énergie cinétique finale est proportionnelle à la tension accélératrice.

Application numérique :

Des électrons sont soumis à une tension accélératrice $U = 5,0 \text{ kV}$.

Calculer leur énergie cinétique en arrivant sur l'anode.

Exprimer cette énergie en J puis en eV. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Que remarque-t-on ?

Remarque sur ce calcul :

La valeur de l'énergie cinétique finale, *exprimée en eV*, est égale à la valeur de la tension accélératrice, *exprimée en V*.

Cette particularité est due à la **définition de l'électronvolt** :

1 eV est l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré sous une tension de 1 V.

c. *Énergie maximale des photons produits*

En arrivant sur l'anode, tous les électrons possèdent à peu près la même énergie cinétique. Ceux qui vont perdre la totalité de cette énergie vont produire les photons d'énergie maximale (et donc de longueur d'onde minimale) :

E_{photon} est maximale lorsque $E_{\text{photon}} = E_c = e \cdot U$ donc $E_{\text{max}} = e \cdot U$

et

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{h \cdot c}{E_{\text{photon}}} \quad \text{soit :} \quad \lambda_{\text{min}} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$$

d. *Comment modifier le spectre continu ?*

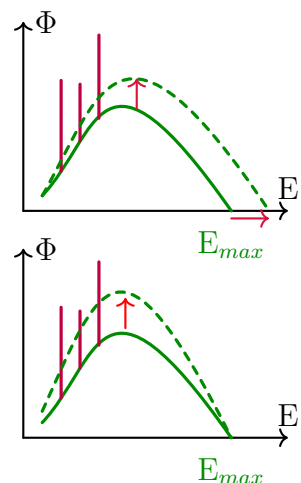
En augmentant la tension accélératrice, on augmente l'énergie des photons, et donc la valeur de E_{max} .

On augmente aussi **le flux de photons**.

Cela ne modifie pas la position des raies.

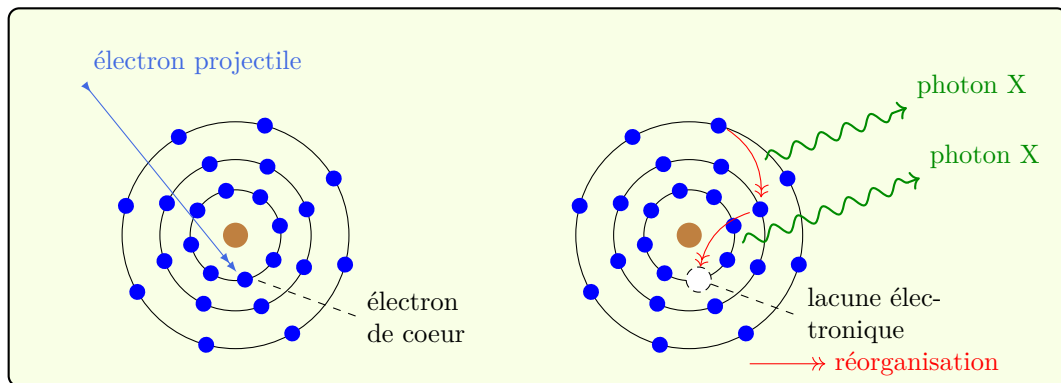
En augmentant l'intensité dans le tube, on augmente le flux d'électrons, et donc le flux de photons sortant du tube..

Par conséquent, le flux de photons émis augmente, sans changer leur énergie. Le réglage correspondant est noté « mAs ».



II.4 ○ Interprétation du spectre de raies

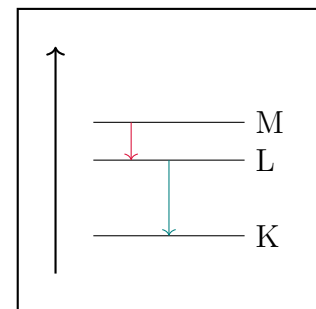
a. Interaction électron projectile/électron cible



Si la tension d'accélération est suffisante, les électrons projectiles peuvent ioniser des atomes cibles : sous l'effet du choc d'un électron projectile avec un atome cible, un électron de cœur est arraché, laissant une *lacune* sur une couche interne.

Un électron d'une couche périphérique vient alors combler la place laissée vacante par l'électron arraché et perd de l'énergie qui est libérée sous forme d'un photon X de fluorescence.

En fonction de la couche de l'électron arraché, et de la provenance de l'électron qui le remplace, on aura une raie K_{α} , L_{β} , etc. Il peut se produire une *réorganisation en cascade*, c'est-à-dire provoquant plusieurs raies.



b. Comment modifier le spectre de raies ?

Le spectre de raies est caractéristique des niveaux d'énergie des atomes de l'anode. La seule possibilité de modifier le spectre de raies est donc de **changer le métal de l'anode**.

Pour les métaux, les niveaux d'énergie sont parfois espacés de plusieurs keV, c'est donc l'ordre de grandeur des raies présentes sur les spectres.

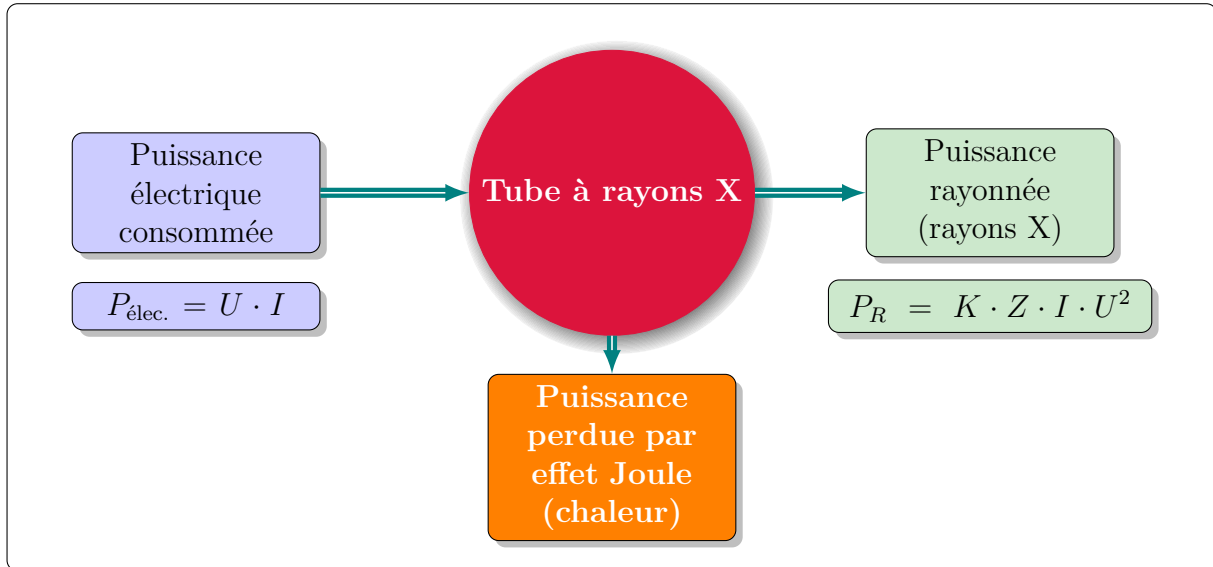
Il est possible de faire disparaître les raies les plus énergétiques, en réduisant la valeur de la tension accélératrice.

Par exemple, si l'énergie de liaison des électrons K est de 25 keV, on peut supprimer toutes les raies K en réduisant la tension accélératrice U à une valeur inférieure à 25 kV.

En effet, avec une énergie inférieure à 25 keV, les électrons projectiles ne seront pas capables d'extraire des électrons cibles de la couche K. Il n'y aura donc pas de réorganisation pour combler la couche K.

III. BILAN DE PUISSANCE DANS LE TUBE À RAYONS X

III.1 ○ Expression du rendement



On définit le rendement du tube par :

$$r = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{consommée}}} = \frac{P_R}{P_{\text{élec.}}} = \frac{K \cdot Z \cdot I \cdot U^2}{U \cdot I} = K \cdot Z \cdot U \quad \boxed{r = K \cdot Z \cdot U}$$

Le rendement du tube est proportionnel :

- à la tension accélératrice U
- au numéro atomique Z du matériau de l'anode
- à une constante K qui dépend de la forme de l'anode

La puissance P_J dissipée par effet Joule se calcule par conservation de l'énergie (ou puissance) :

$$P_{\text{élec.}} = P_R + P_J$$

III.2 ○ Application numérique

Calcul d'un rendement, avec les données :

- $P_{\text{élec.}} = 10 \text{ kW}$
- $P_R = 50 \text{ W}$

Calculer aussi P_J .

Conclusions :

- le rendement d'un tube à rayons X est très faible, même avec une tension très élevée.
- la puissance thermique est très importante, donc échauffement important : le métal risque de fondre. Par conséquent, on choisit un métal à la température de fusion élevée et de numéro atomique élevé.

Le tungstène combine ces deux avantages. ($Z = 74$, $T_{\text{fusion}} = 3400 \text{ °C}$)