



Production et Émission des Rayons X : Interaction avec la Matière

Module de Radiologie Dentaire

Université des sciences de la santé

Faculté de Médecine dentaire

Dr. M. Maamria

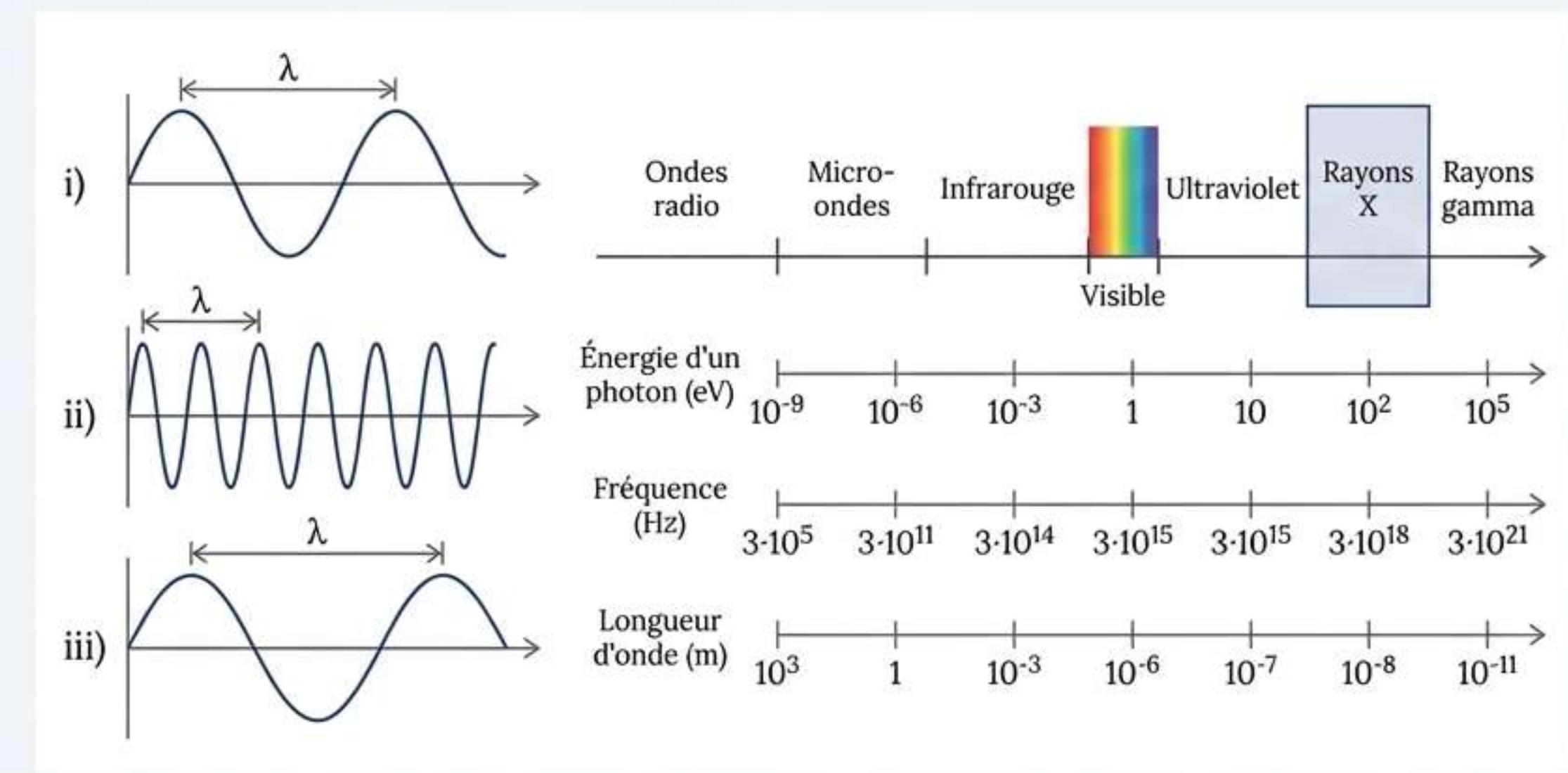
Cours : 3ème année

Année universitaire 2025-2026

Qu'est-ce qu'un Rayon X ?

Introduction: Les rayons X, découverts en 1895 par Wilhelm Röntgen, sont une forme de rayonnement électromagnétique. Leur capacité à être absorbés différemment par la matière (atténuation) est le principe fondamental de la radiographie.

Définition clé: Les rayons X sont des ondes électromagnétiques [Q1.B] utilisées dans de nombreuses applications, dont l'imagerie médicale. Ils font partie du spectre électromagnétique, tout comme la lumière visible.



Représentation de différentes longueurs d'onde.

Le spectre électromagnétique, montrant la position des Rayons X.

Les Caractéristiques Fondamentales des Rayons X

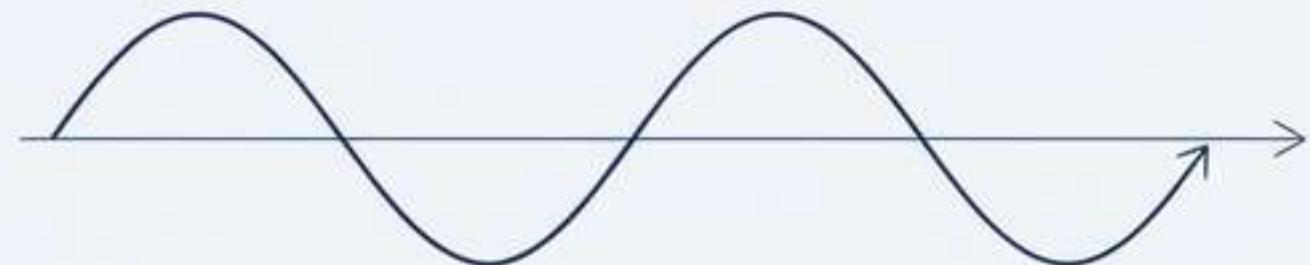
Longueur d'onde (λ):

- C'est la distance entre deux points d'une onde séparés par un cycle complet.
- Les rayons X ont une longueur d'onde très courte, située entre 0,01 nanomètre et 10 nanomètres. Notre œil ne peut pas les percevoir.

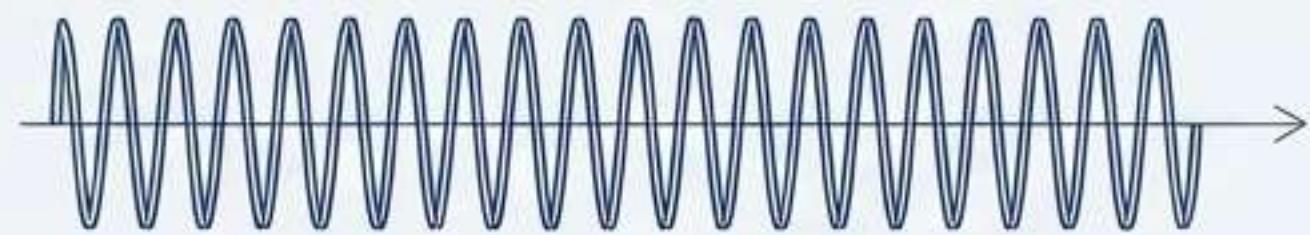
Fréquence (ν):

- C'est le nombre de cycles par unité de temps (Hertz, Hz).
- Les rayons X ont une très haute fréquence, de 3×10^{17} Hz à 3×10^{19} Hz. C'est cette haute fréquence (et donc haute énergie) qui les rend plus dangereux que la lumière visible.

Relation Inverse: La fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Plus la fréquence est grande, plus la longueur d'onde est petite.



Basse fréquence (ν), Grande longueur d'onde (λ)



Haute fréquence (ν), Petite longueur d'onde (λ)

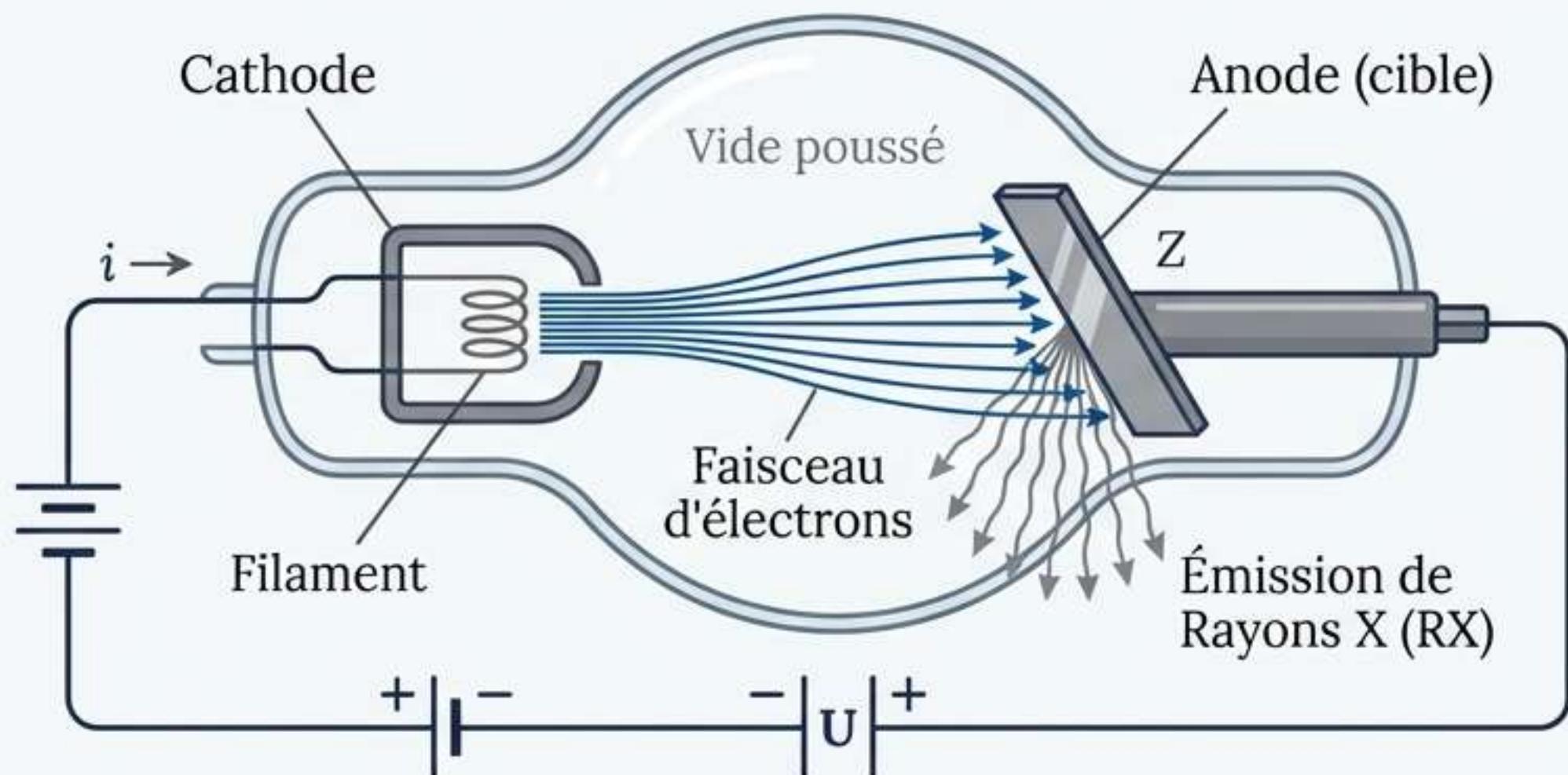
Formule Clé

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

où c = vitesse de la lumière (3×10^8 m/s)

Le Lieu de Naissance : Le Tube de Coolidge

Texte principal : La source usuelle des rayons X est le tube de Coolidge [Q2.B]. Il s'agit d'une ampoule en verre où règne un vide poussé, et dans laquelle se trouvent deux électrodes : la cathode (-) et l'anode (+) [Q2.D].



Processus global:

1. Le filament de la **cathode** est chauffé, libérant des électrons.
2. Une haute tension (U) est appliquée, accélérant ces électrons vers l'**anode**.
3. En frappant la cible métallique de l'anode, l'énergie cinétique des électrons est convertie en chaleur (~99%) et en rayons X (~1%).

Les Acteurs Clés : Cathode et Anode



La Cathode (Pôle Négatif)

Rôle: Responsable de l'émission des électrons [Q3.B].

Composition : Constituée d'un filament de tungstène.

Mécanisme: Le chauffage du filament provoque l'émission d'électrons par effet thermoélectronique (ou thermo-ionique) [Q5].



L'Anode (Pôle Positif)

Rôle: C'est la cible des électrons et la source de production des rayons X [Q4.A]. Appelée aussi **anticathode** ou **cible** [Q4.B].

Composition : Une plaque de tungstène [Q3.C] (numéro atomique élevé, Z=74) insérée dans un bloc de cuivre pour dissiper la chaleur intense.

Facteur de contrôle: Lorsque le voltage (tension U) augmente, l'énergie des électrons augmente [Q6.D]. Lorsque le courant (intensité i) augmente, la quantité de photons émis augmente [Q6.C].

Puissance et Rendement : L'Énergie de la Création

Puissance du Générateur

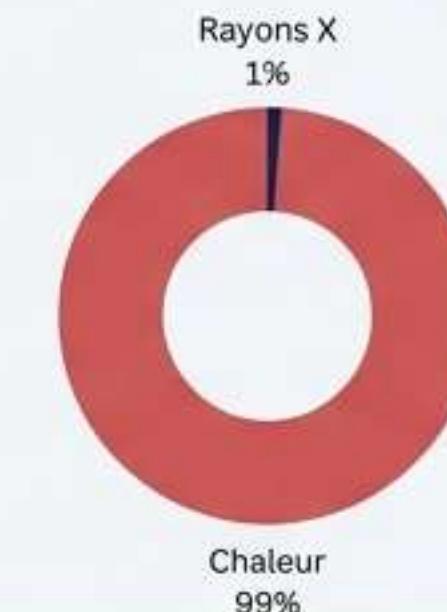
L'énergie électrique consommée par le tube est donnée par :

$$P \text{ (watts)} = U \text{ (kV)} \cdot i \text{ (mA)}$$

Où U est la tension accélératrice et i est l'intensité du courant.

Un Rendement Très Faible

Seule une très faible fraction (environ 1%) de cette puissance est convertie en rayons X. Les 99% restants sont dissipés sous forme de chaleur au niveau de l'anode.



Formule du Rendement Énergétique (R)

Le rendement mesure l'efficacité de la production de rayons X. Il est directement proportionnel à la tension et au numéro atomique de la cible.

$$R = k \cdot U \cdot Z$$

k : coefficient de proportionnalité (10^{-10})

U : tension accélératrice (en volts)

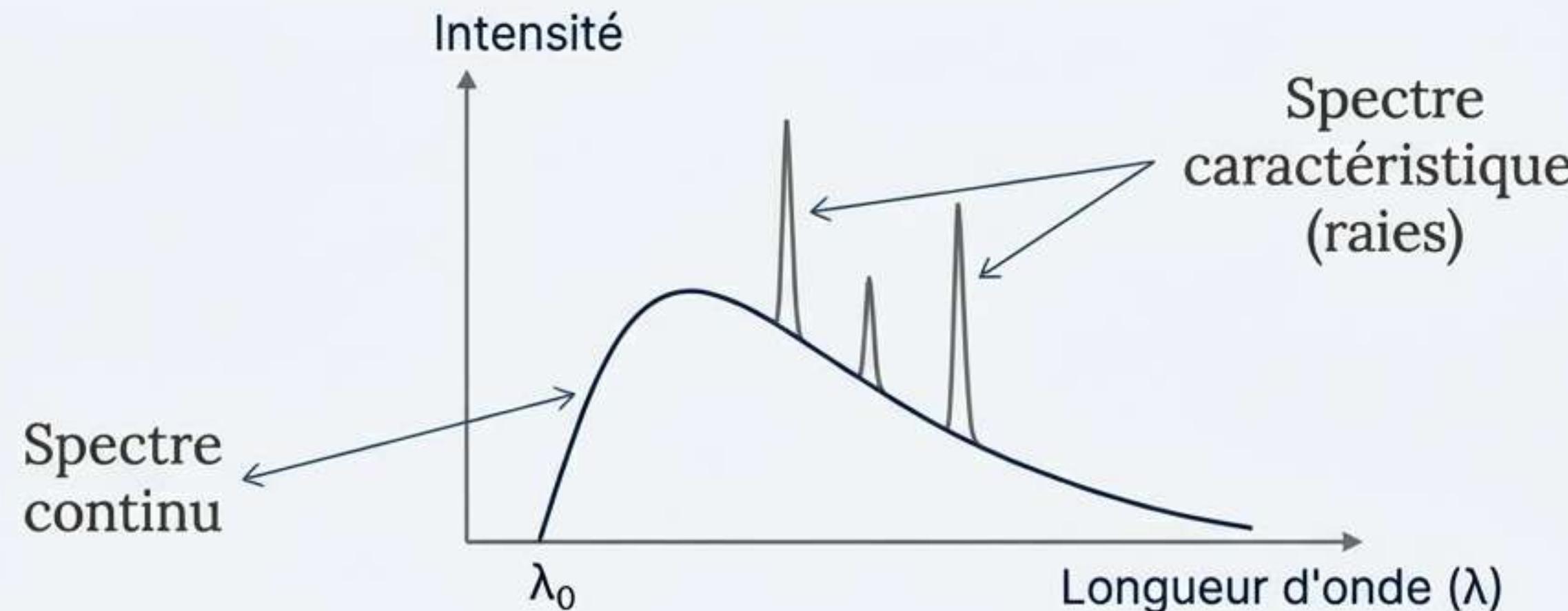
Z : numéro atomique de la cible (ex: Tungstène $Z=74$)

Application Clinique

- ~50 kV en radioscopie
- ~100 kV en radiographie
- ~200 kV en radiothérapie

Les Deux Mécanismes de Production des Rayons X

Vue d'ensemble: L'étude spectrale du rayonnement X montre qu'il est composé de deux spectres superposés, issus de deux interactions atomiques distinctes.



Les deux mécanismes:

1. **Interaction Électron - Noyau:** Crée un **spectre continu**, aussi appelé **Rayonnement de Freinage (Bremsstrahlung)**.
2. **Interaction Électron - Électron (atomique):** Crée un **spectre de raies**, aussi appelé **Rayonnement Caractéristique**.

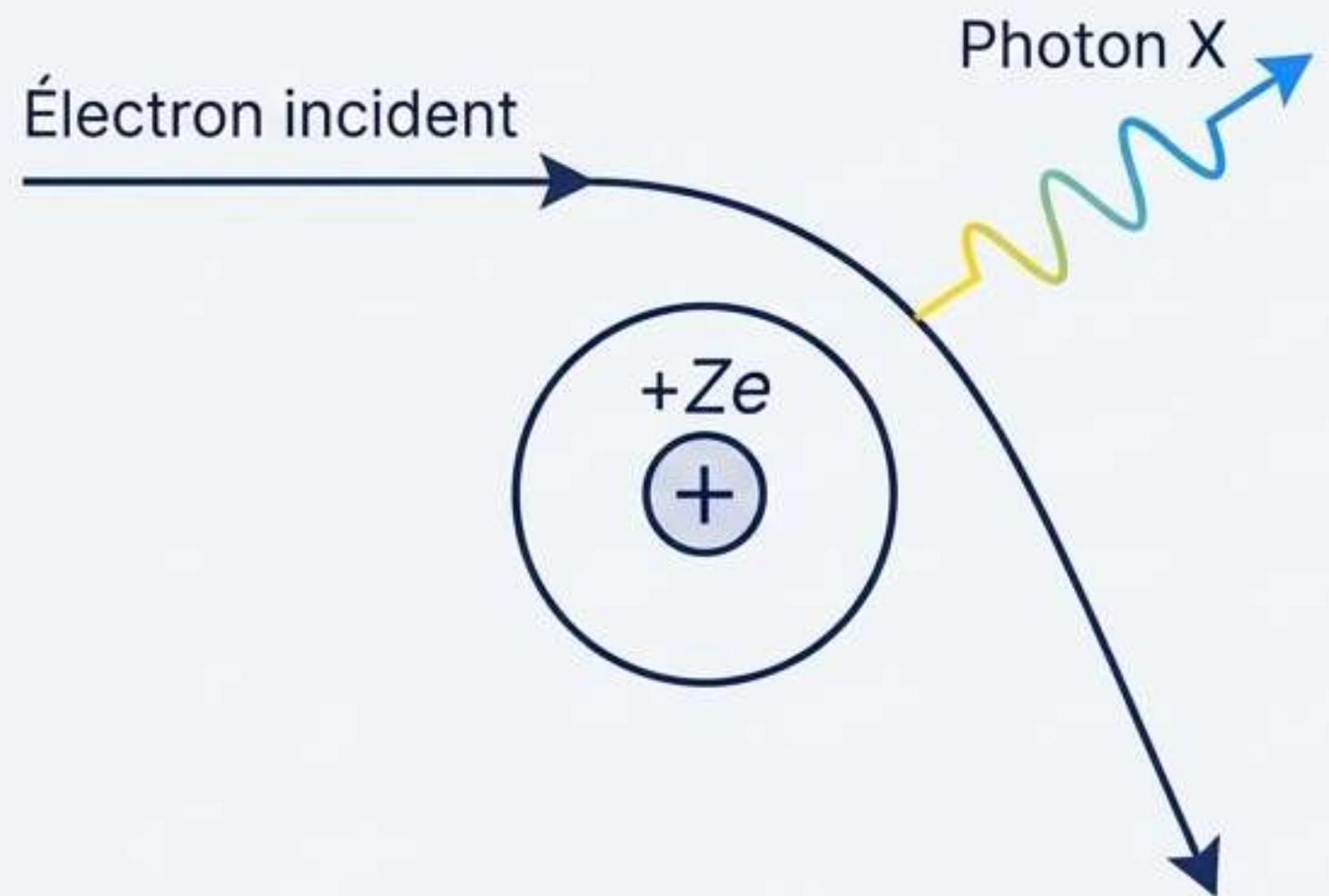
Mécanisme 1 : Le Rayonnement de Freinage (Bremsstrahlung)

Définition: Un électron incident, accéléré à haute énergie, passe à proximité du noyau d'un atome de la cible. L'attraction électrostatique du noyau ($+Ze$) dévie et ralentit ("freine") l'électron.

Conséquence: Cette perte d'énergie cinétique par l'électron est émise sous la forme d'un photon de rayon X.

Le Spectre Continu: Ce processus peut se produire à différents degrés de freinage, créant des photons de toutes les énergies (jusqu'à un maximum), ce qui forme un spectre continu continu.

Nom du Spectre: Ce spectre continu de rayons X est appelé le rayonnement de freinage [Q7.B], ou Bremsstrahlung en allemand.

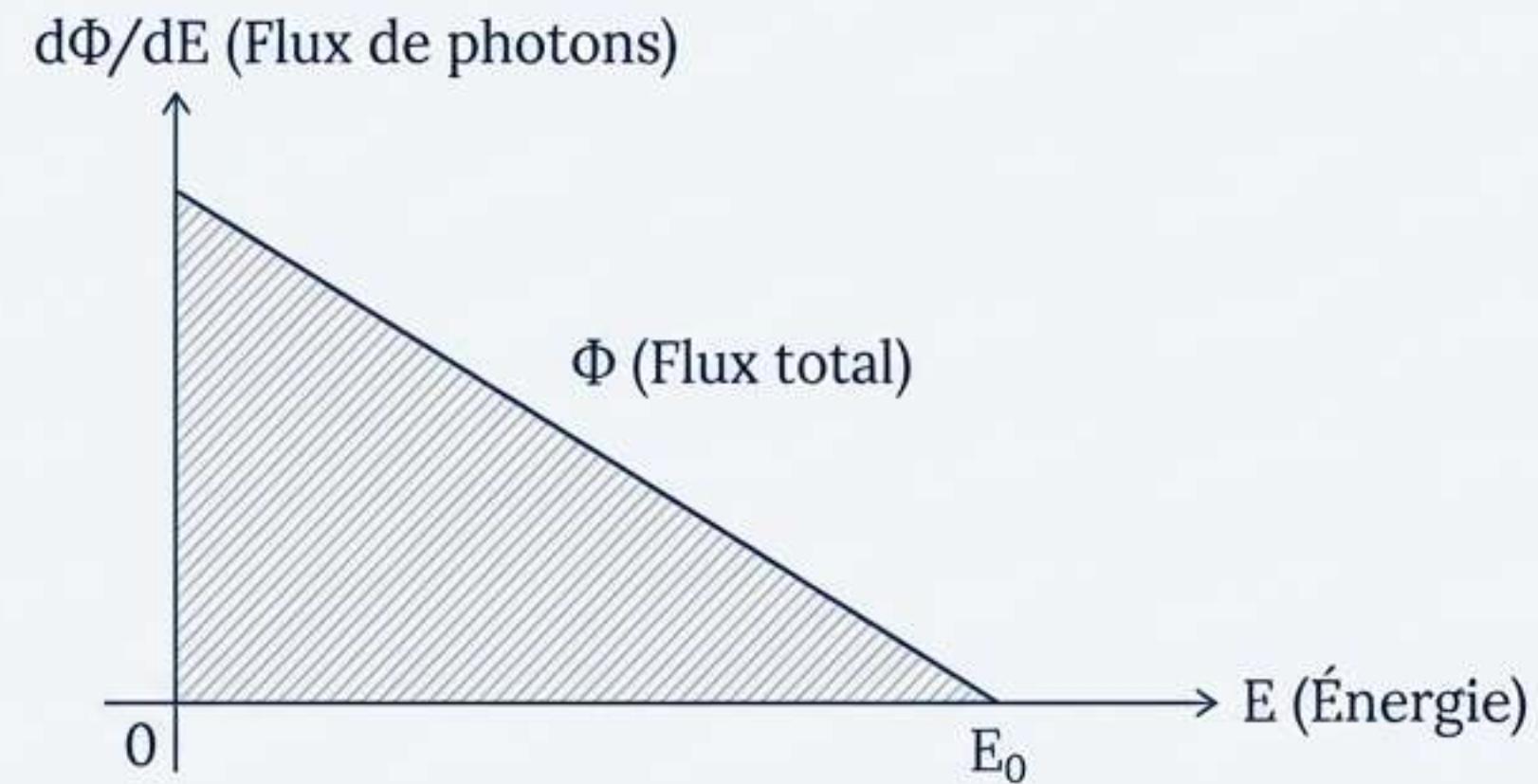


La Limite du Spectre Continu : La Longueur d'Onde Minimale (λ_{\min})

Le Scénario Limite: La longueur d'onde la plus courte (et donc l'énergie la plus élevée) est produite lors d'une collision frontale où un électron incident **perd toute** son énergie cinétique initiale (E_0 ou E_{\max}) en une seule interaction.

Le Seuil: Il existe une longueur d'onde de seuil (λ_{\min}) en dessous de laquelle le spectre continu n'existe pas.

Propriété importante: La longueur d'onde de seuil est totalement indépendante du matériau de la cible. Elle ne dépend que de la tension d'accélération.



Formule Fondamentale:

$$E_{\max} = h \cdot c / \lambda_{\min}$$

$$\text{donc, } \lambda_{\min} = h \cdot c / E_{\max}$$

où E_{\max} est l'énergie cinétique maximale des électrons (déterminée par la tension U).

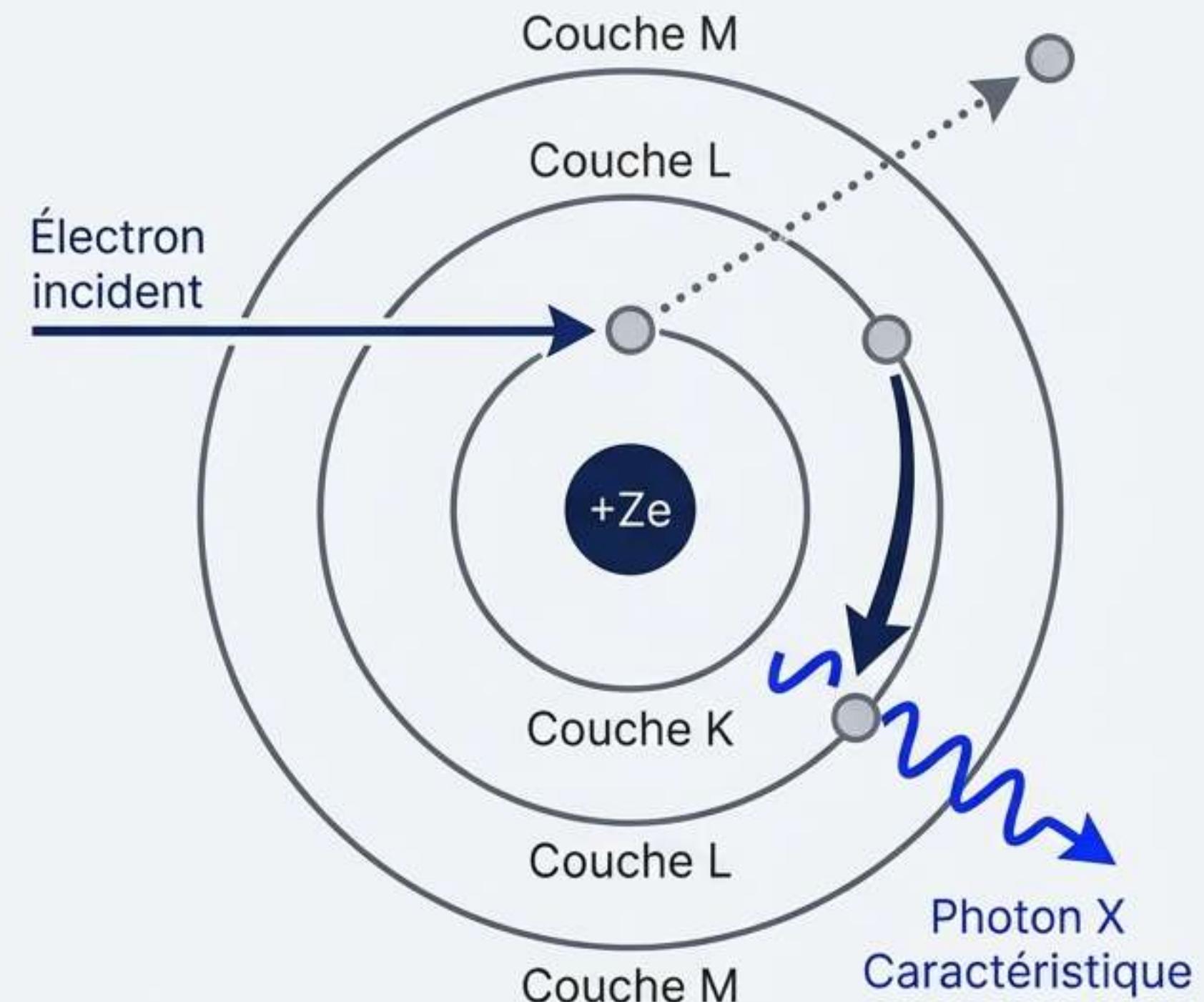
Mécanisme 2 : Le Rayonnement Caractéristique

Le Processus en Deux Étapes:

1. **Ionisation**: Un électron incident, suffisamment énergétique, entre en collision avec un électron d'une couche interne (profonde) de l'atome cible (ex: couche K) et l'éjecte de l'atome. Cela crée un "trou" ou une vacance.
2. **Réarrangement**: L'atome est maintenant dans un état instable et excité. Pour retrouver sa stabilité, un électron d'une couche plus externe (ex: L ou M) "tombe" pour combler le trou.

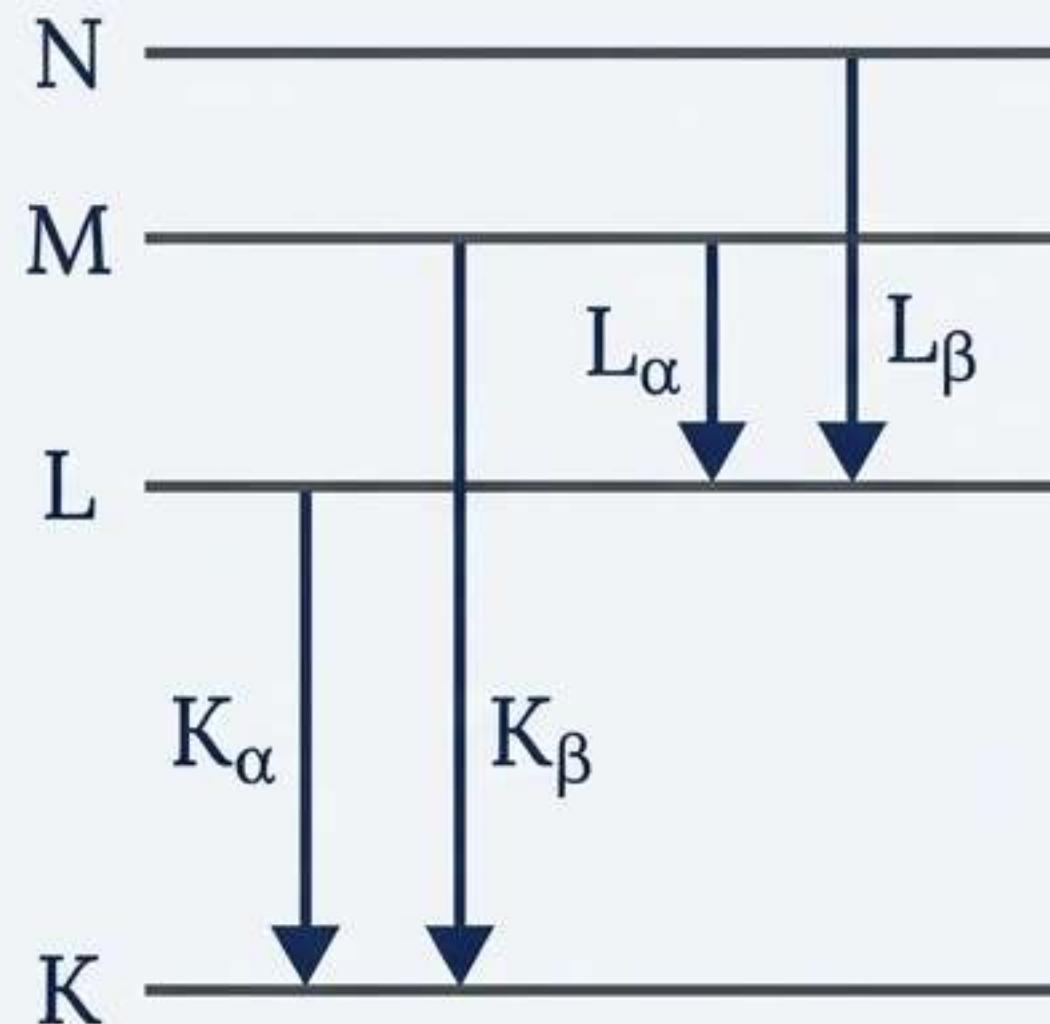
L'Émission: Cette transition d'un niveau d'énergie supérieur à un niveau inférieur libère la différence d'énergie sous la forme d'un photon de rayon X.

Énergie "Caractéristique": L'énergie de ce photon est discrète et précise. Elle correspond à la différence d'énergie entre les deux couches électroniques et est donc **caractéristique** de l'atome cible (ex: Tungstène).



Le Spectre de Raies et sa Nomenclature

Des Énergies Discrètes:
Contrairement au spectre continu, le rayonnement caractéristique n'est émis qu'à des énergies (ou longueurs d'onde) spécifiques, créant des pics nets appelés "raies" sur le spectre global.



Nomenclature des Raies: Le nom de la raie indique les couches de départ et d'arrivée de l'électron.

- **Lettre Latine (K, L, M...):** Désigne la couche d'**arrivée** de l'électron (où se trouvait le trou).

- **Lettre Grecque (α , β , γ ...):** Désigne la couche de **provenance**.

α : Couche immédiatement supérieure.

β : Deux couches au-dessus.

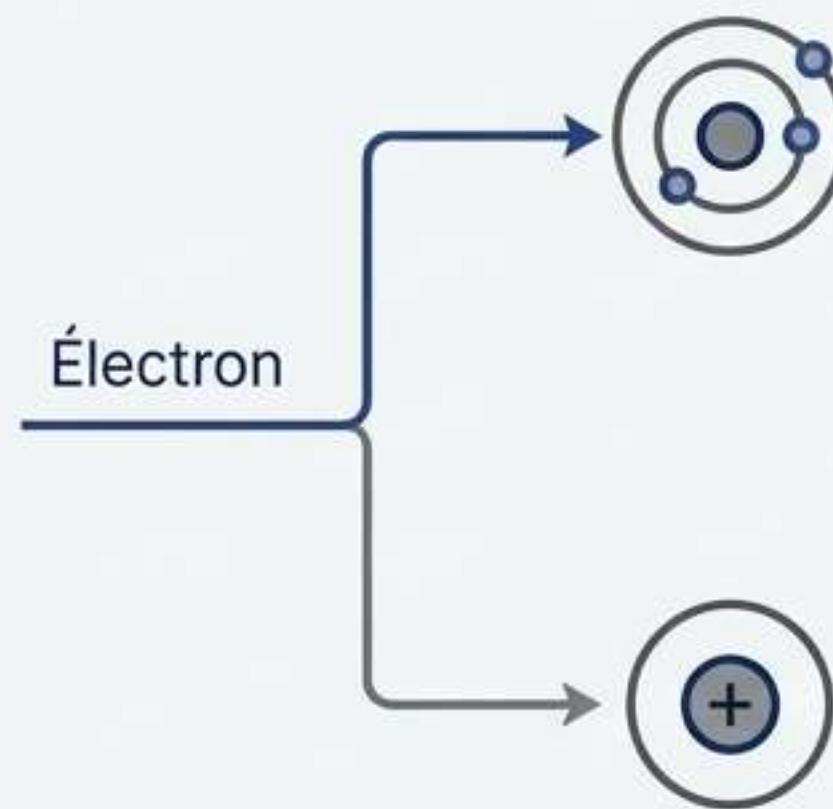
Exemples:

- **Raie K α :** Un électron de la couche L (n=2) comble un trou dans la couche K (n=1).
- **Raie K β :** Un électron de la couche M (n=3) comble un trou dans la couche K (n=1).
- **Raie L α :** Un électron de la couche M (n=3) comble un trou dans la couche L (n=2).

L'Interaction des Rayonnements avec la Matière

Introduction: Une fois produits, les électrons et les photons X traversent un milieu et perdent leur énergie. Ce ralentissement et cette absorption sont le résultat de deux types d'interactions fondamentales.

Interaction des Électrons



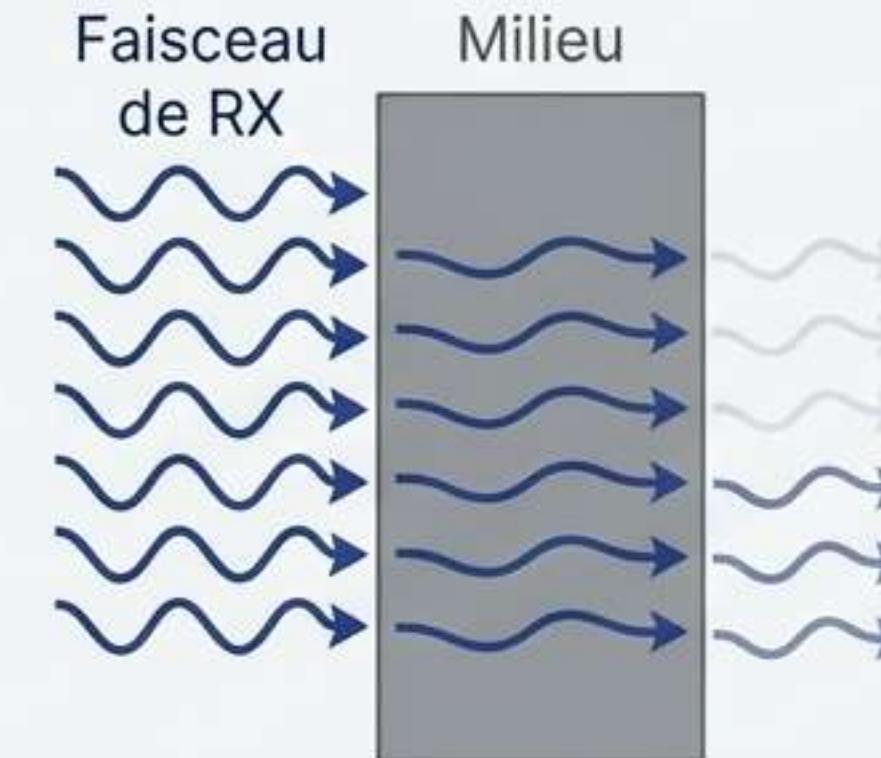
Interaction avec un électron atomique:

Appelée **collision** [Q8.D]. Elle provoque une ionisation ou une excitation du milieu.

Interaction avec un noyau:

Appelée **freinage**. C'est le mécanisme à l'origine de la production des rayons X de freinage.

Interaction des Photons X



Lorsqu'un faisceau de RX pénètre un milieu, il subit une **atténuation**.

Cette atténuation progressive du faisceau est ce qui permet la formation de l'image radiologique [Q10.C].

Le Pouvoir d'Arrêt : Mesurer la Perte d'Énergie

Définition: Le pouvoir d'arrêt (S) d'un milieu représente l'énergie cinétique (Ec) perdue par une particule par unité de distance (x).

$$S = S_c + S_f$$

Pouvoir d'arrêt par Collision (S_c):

$$S_c = \frac{\Delta E_c}{\Delta x} \text{ (perte d'énergie par collision)}$$

C'est le mécanisme le plus important pour le ralentissement des électrons dans la matière.

Pouvoir d'arrêt par Freinage (S_f):

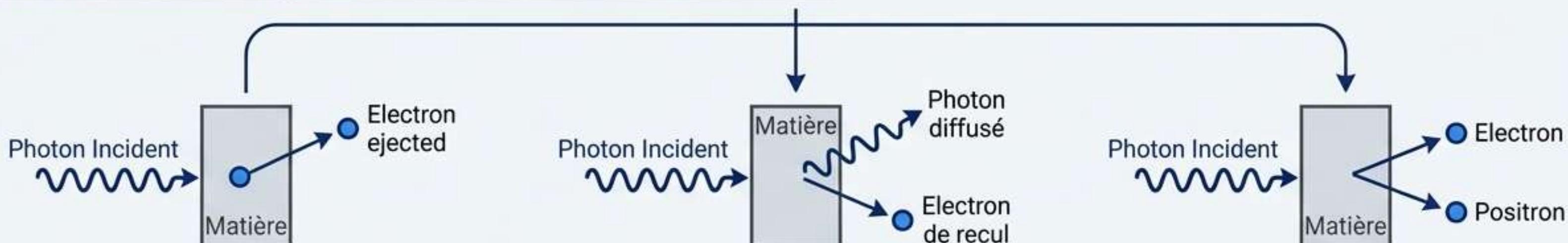
$$S_f = \frac{\Delta E_c}{\Delta x} \text{ (perte d'énergie par émission de rayonnement de freinage)}$$

S_f est proportionnel à l'énergie de l'électron et au numéro atomique (Z) du milieu.

Ce phénomène est surtout important pour les électrons de très forte énergie traversant des milieux denses (atomes lourds, comme le plomb) [Q11.A].

Le Destin du Photon : Absorption et Diffusion

- **Principe de l'Atténuation:** Lorsqu'un faisceau de RX traverse un matériau, son intensité diminue. Cette atténuation peut se produire par **absorption** (le photon disparaît) ou par **diffusion** (le photon est dévié).
- **Facteurs d'Influence:** L'importance relative de chaque mécanisme dépend de :
 - L'énergie du photon incident.
 - La nature du matériau absorbant (densité et numéro atomique [Q9.C]).
- **Les Trois Mécanismes Fondamentaux:** L'absorption et la diffusion des photons X se font essentiellement par trois mécanismes distincts :



L'Effet Photoélectrique
(absorption dominante à basse énergie, clé du diagnostic)

L'Effet Compton
(diffusion dominante à plus haute énergie)

La Créditation de Paires
(uniquement à très haute énergie, >1.02 MeV, non pertinent pour le diagnostic dentaire)

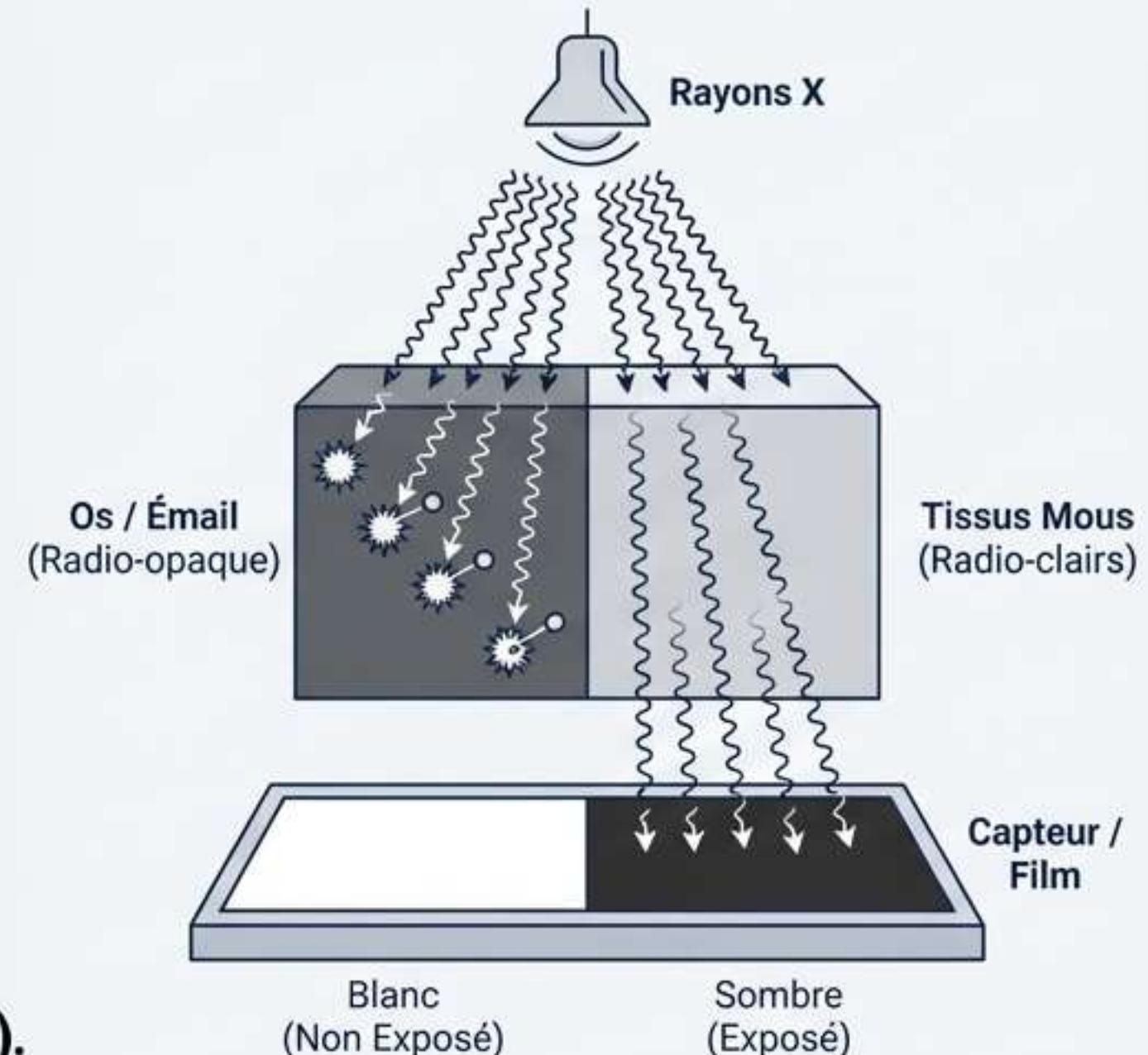
De l'Interaction à l'Image : La Naissance du Contraste Radiologique

Le Rôle Clé de l'Effet Photoélectrique:

- Dans ce processus, la totalité de l'énergie du photon incident est transférée à un électron atomique, qui est éjecté. Le photon est complètement absorbé.
- C'est un processus d'**absorption vraie**.

La Formation de l'Image:

- L'image radiologique est essentiellement une "carte" de l'atténuation des rayons X à travers le corps.
- Les structures denses et à Z élevé (os, émail) absorbent plus de photons (principalement par effet photoélectrique) et apparaissent blanches (**radio-opaques**).
- Les structures molles absorbent moins de photons, qui atteignent le capteur, et apparaissent sombres (**radio-claires**).



Conclusion: La compréhension du voyage du photon – de sa création dans le tube de Coolidge à son absorption différentielle dans les tissus – est la base de toute l'imagerie radiologique. Cette absorption mène à la formation d'une image latente [Q12.C] qui sera ensuite révélée.