

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF- M'SILA
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
كلية العلوم
قسم الفيزياء

Support de cours du module

Physique des RX

Présenté par : Bounab Sabrina

Destiné Aux Etudiants Master 2

Physique Médicale

Chapitre 1 Production des rayons X

1.1 Généralités

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique, au même titre que la lumière visible, l'ultra-violet, l'infra-rouge, les micro-ondes, les ondes radio ou les rayons gamma.

Une onde électromagnétique est due à un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires oscillants en phase (figure 1). Elle se propage dans le vide à la vitesse de la lumière ($c = 299792458 \text{ m/s}$). Dans le cas d'une onde sinusoïdale ou monochromatique, elle a une fréquence ν définie et une période $T = 1/\nu$. La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde en une période, soit $\lambda = cT = c/\nu$.

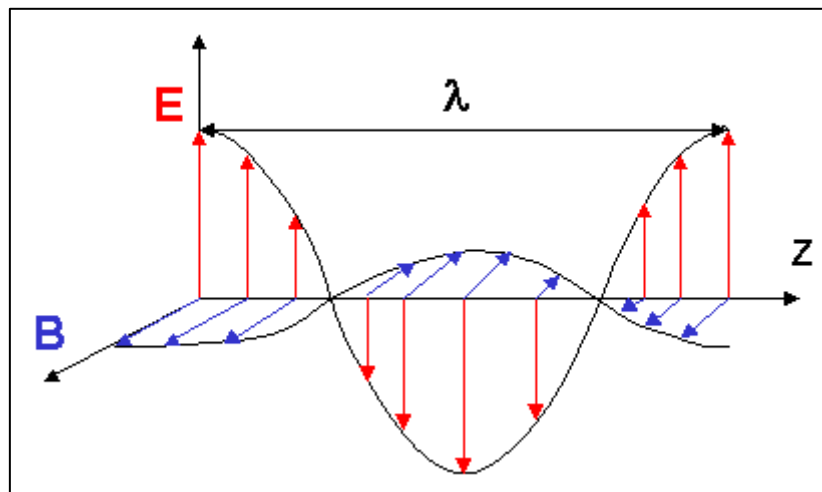


Figure 1.1 : Onde électromagnétique

(Structure à un instant donné des champs électriques et magnétiques, E et B , de l'onde se propageant dans la direction z).

Une onde électromagnétique réelle est généralement constituée d'une superposition d'ondes de fréquences différentes. La répartition quantitative de la puissance propagée selon la fréquence est appelée le « spectre » de l'onde.

Le modèle corpusculaire du rayonnement électromagnétique est mieux adapté aux rayonnements de hautes fréquences : on considère qu'un faisceau est constitué de photons, des particules sans

masse qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Chaque photon transporte une quantité d'énergie E proportionnelle à la fréquence de l'onde $E = h \nu$, où h est la constante de Planck.

Les ondes électromagnétiques sont classées et nommées en fonction de leur domaine de fréquence (figure 2). Bien que de même nature, les ondes d'un domaine de fréquence à l'autre correspondent à des mécanismes d'émission différents et exigent des techniques différentes de détection.

- On appelle rayons X les ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre **10^{16} Hz et 10^{20} Hz** . Les longueurs d'ondes sont de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-12} m , et les énergies des photons X sont comprises entre **40 et $4 \times 10^5 \text{ eV}$** (1 eV correspond à $1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, c'est l'énergie d'un photon dans l'infra-rouge). Ces énergies sont de l'ordre de grandeur des énergies de liaison des électrons des couches internes des atomes (de l'ordre du keV). Le domaine des rayons X se situe entre l'ultra-violet et les rayons gamma.

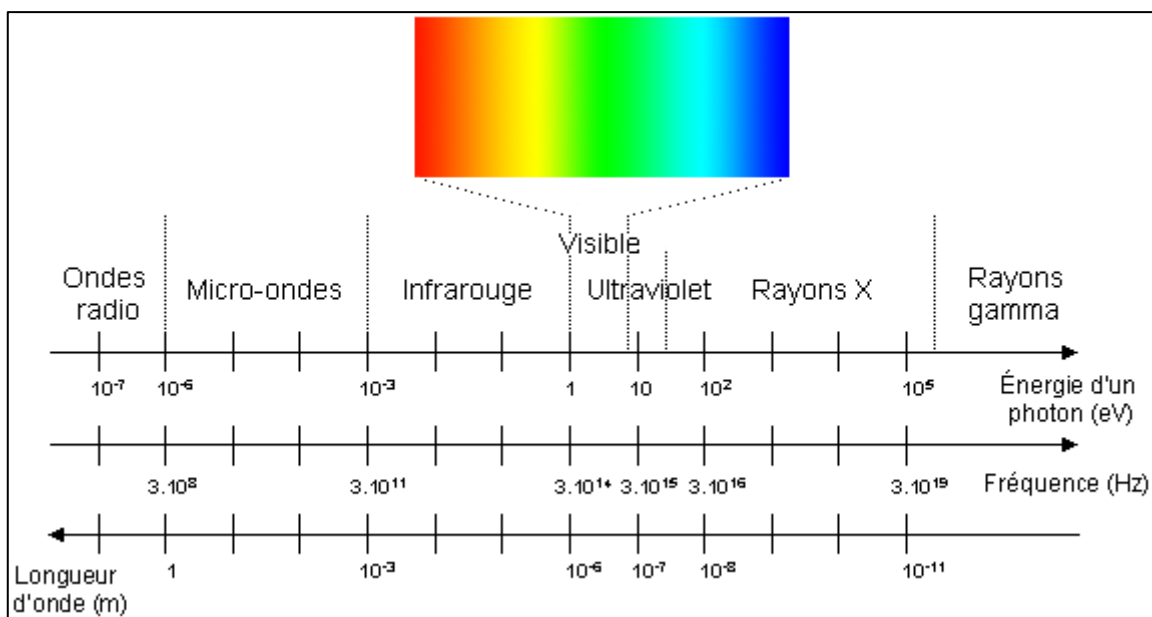


Figure 1.2 : Spectre électromagnétique

- Les Rayons X a été découvert en 1895 par le physicien allemand **Wilhelm Röntgen**, qui a reçu pour cela le premier prix Nobel de physique ; il lui donna le nom habituel de l'inconnue en mathématiques, X. Ils sont naturels (cosmologie, astronomie) ou artificiels (radiologie) et alors résultent du bombardement d'électrons sur une cible généralement en tungstène. La principale propriété des rayons X est de traverser la matière en étant partiellement absorbés en fonction de la densité de celle-ci et de l'énergie du rayonnement, ce qui permet d'avoir une information sur l'intérieur des objets qu'ils traversent.

- Les rayons X sont une des modalités principales de l'imagerie médicale et du contrôle non destructif. Ils sont également utilisés en cristallographie. En astrophysique contemporaine, on mesure les rayonnements X de l'espace pour l'étudier.

1.2 Production De Rayons X

Les rayons X sont produits dans des tubes à rayons X également appelés tubes de Coolidge ou tubes à cathode chaude (figure 3). Le principe est le suivant : des électrons émis par une cathode (un filament, le plus souvent en tungstène, chauffé par le passage d'un courant électrique) sont accélérés par une différence de potentiel élevée (de 10 à 150 keV), dans une enceinte sous vide, en direction d'une cible constituée d'une anode en métal (en tungstène également).

Les rayons X sont émis par la cible selon deux mécanismes :

- le freinage des électrons par les atomes de la cible crée un rayonnement continu appelé rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung (Bremsstrahlung est un mot allemand signifiant freinage) dont une partie dans le domaine des rayons X ;
- les électrons accélérés ont une énergie suffisante pour exciter certains des atomes de la cible, en perturbant leurs couches électroniques internes. Ces atomes excités émettent des rayons X en retournant à leur état fondamental (**raies caractéristiques**).

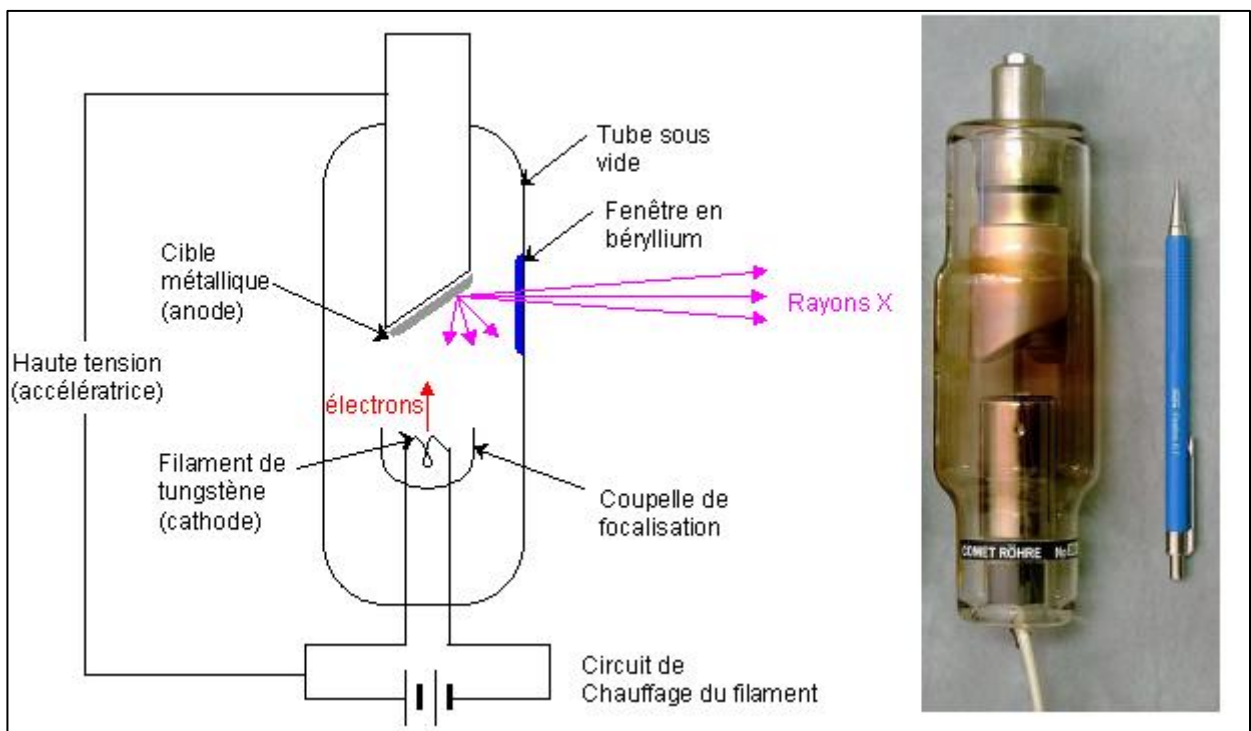


Figure 1.3 : Tube à rayons X

1.2.1 Spectre de Bremsstrahlung (freinage)

Le Bremsstrahlung est un mot allemand signifiant rayonnement de freinage. Il est un processus de collision radiative entre l'électron et un noyau dans la cible (Fig. 1.3). L'électron en passant près du noyau peut subir une déviation et une accélération soudaines sous l'action des forces d'attraction coulombiennes. En conséquence, les électrons peuvent perdre leur énergie cinétique, sous forme de rayons X de Bremsstrahlung. L'électron peut avoir une ou plusieurs de ces interactions, ce qui peut entraîner une perte d'énergie partielle ou totale.

La quantité de production de Bremsstrahlung est déterminée par la distance entre l'électron bombardant et le noyau. A très grande distance, la force coulombienne est faible, seuls des rayons X de faible énergie sont créés, mais ce processus a une probabilité plus élevée de se produire. Lorsque l'électron est très proche du noyau, la force coulombienne est forte, les électrons perdent plus de leurs énergies cinétiques, ce qui entraîne la production de rayons X de haute énergie. Si l'électron frappe directement le noyau, il perd toute son énergie cinétique, mais la probabilité de ce type d'interaction est très faible (5%). Pour conclure, les rayons X de faible énergie sont produits en plus grande abondance par rapport aux rayons X de haute énergie.

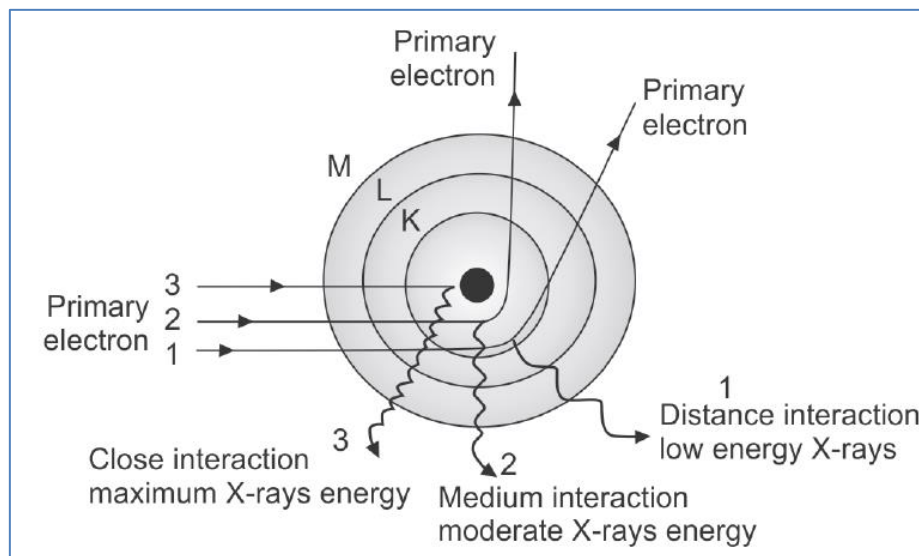


Figure 1.4 : Production de rayonnement de Bremsstrahlung

Ainsi, le rayonnement de Bremsstrahlung aura toute l'énergie possible de zéro au maximum. L'énergie maximale est déterminée par l'énergie cinétique maximale de l'électron incident. Aussi la direction d'émission des photons de Bremsstrahlung dépend de l'énergie de l'électron incident. À des énergies électroniques inférieures à 100 keV, les rayons X sont émis également dans toutes les directions. À mesure que l'énergie cinétique de l'électron augmente, la direction de l'émission

de rayons X. En radiologie diagnostique, il est techniquement avantageux d'obtenir le faisceau de rayons X sur le même côté de la cible, c'est-à-dire à 90° par rapport à la direction du faisceau d'électrons.

Dans les tubes à rayons X de diagnostic, des cibles plus épaisses sont utilisées pour arrêter le faisceau d'électrons. Par conséquent, les rayons X sont produits dans toutes les directions autour la cible. Les rayons X qui sont produits dans la direction avancée seront absorbés par la cible elle-même. Le terme efficacité de la production de rayons X est défini comme le rapport de l'énergie de sortie émise sous forme de rayons X à l'entrée énergie déposée par l'électron. On peut montrer que :

$$\text{efficacité} = 9 \times 10^{-10} \times Z \times V$$

Où, Z est le numéro atomique du matériau cible, V est la tension du tube en volts. Ainsi, la production de rayons X de Bremsstrahlung augmente avec l'accélération de la tension et le numéro atomique du matériau cible.

Alternativement, l'efficacité de production de rayons X peut être exprimée en termes de pertes radiatives et collisionnelles comme suit :

$$\frac{\text{Perte d'énergie collisionnelle}}{\text{Perte d'énergie radiative}} = \frac{E_k \times Z}{820000}$$

Où, E_k est l'énergie cinétique de l'électron incident.

La Perte de rayonnement est due à la production de Bremsstrahlung, alors que la perte collisionnelle est due à l'excitation et à l'ionisation. Si un électron d'énergie de 100 keV interagit avec une cible en tungstène ($Z = 74$), puis le rapport ci-dessus = $(100 \times 72)/820000 = 0,9\%$. Ainsi, l'efficacité de la cible de tungstène est trouvée pour être inférieure à 1% et le reste de l'énergie d'entrée, > 99% apparaît comme chaleur. Plus l'énergie des photons est élevée, plus l'efficacité de la production de rayons X est élevée, et moindre production de chaleur. L'efficacité de production de rayons X est supérieure à 50 % pour un électron de 6 MV $\left(\frac{6000 \times 72}{820000} \cong 0.50 = 50\%\right)$, donc le problème de la chaleur excessive devient moins à des énergies plus élevées.

1.2.2 Spectre caractéristiques des rayons X

Chaque électron de l'atome cible possède une énergie de liaison qui dépend de la couche dans laquelle il réside. Les plus proches du noyau se trouvent deux électrons de la couche K, qui possède l'énergie de liaison la plus élevée. La couche L, avec huit électrons, possède la deuxième énergie de liaison la plus élevée, et ainsi de suite. Le tableau 5-1 répertorie les matériaux cibles courants et les énergies de liaison correspondantes de leurs couches électroniques K, L et M. Quand l'énergie d'un électron incident sur la cible dépasse l'énergie de liaison d'un électron d'un atome cible, il est énergétiquement possible qu'une interaction de collision éjecte l'électron et ionise l'atome. La couche non remplie est énergétiquement instable et un électron de la couche externe avec moins d'énergie de liaison comblera le vide. Lorsque cet électron passe à un état d'énergie inférieur, l'énergie excédentaire peut être libérée sous la forme d'un photon X caractéristique avec une énergie égale à la différence entre les énergies de liaison des couches électroniques (Fig. 1.5). Les énergies de liaison sont uniques à un élément donné, tout comme leurs différences; par conséquent, les rayons X émis ont des énergies discrètes caractéristiques de cet élément. Si des électrons appartenant à la couche $K(n = 1)$ sont arrachés, des électrons appartenant à des états d'énergie plus élevée chutant sur la couche K émettant une série de raie, notées $K_\alpha, K_\beta, K_\gamma \dots$ etc en notation RX. Si ce sont des électrons de la couche $L(n = 2)$ une autre série, la série L, des raies est émise. De même, pour des transitions vers couche $M(n=3)$, on a la série M.

TABLEAU 1.1 : ÉNERGIES DE LIAISON DES ÉLECTRONS (KeV) DES MATÉRIAUX CIBLES DES TUBES À RAYONS X COMMUNS

Couche-électronique	Tungstène (Z=74)	molybdène (Z=42)	Rhodium (Z=45)
K	69.5	20.0	23.2
L	12.1/11.5/10.2	2.8/2.6/2.5	3.4/3.1/3.0
M	2.8-1.9	0.5-0.4	0.6-0.2

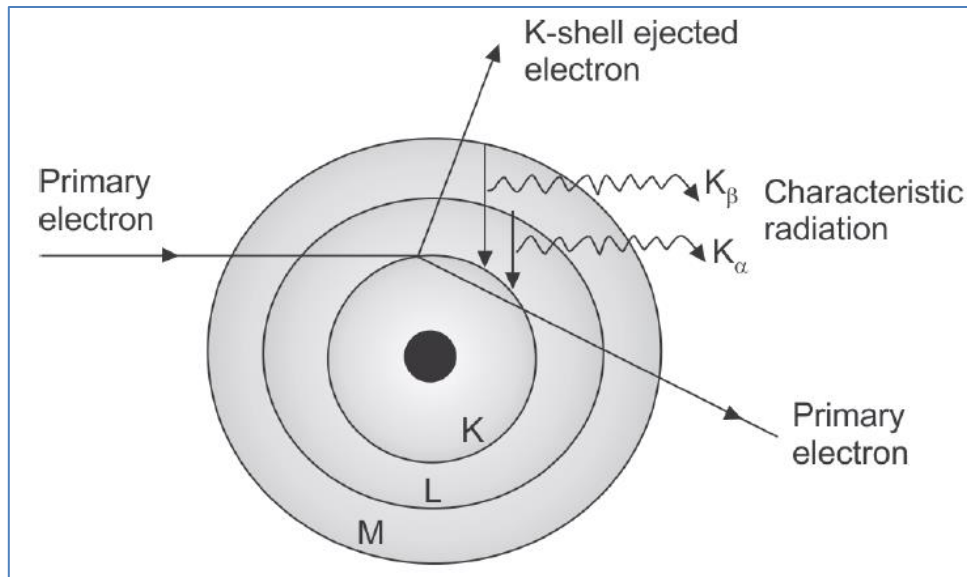


Figure 1.5 : Production de rayonnement de Bremsstrahlung

Si la transition impliquait un électron de la couche L à la couche K d'une cible en tungstène par exemple, alors le photon émis aura de l'énergie :

$$\begin{aligned}
 hv &= E_k - E_L \\
 &= 69.5 \text{ keV} - 10.2 \text{ keV} \\
 &= 59.3 \text{ keV}
 \end{aligned}$$

Où E_k et E_L sont les énergies de liaisons des couches K et L de l'atome de tungstène respectivement.

Les transitions d'énergie sont désignées par la couche capturant l'électron avec un indice de α ou β . L'indice α se réfère à une transition de couche adjacente, par exemple : la transition $L \rightarrow K$ est désignée comme K_α X-Rays. L'indice β fait référence à une transition d'une couche non adjacente, par exemple : La transition $M \rightarrow K$ est notée K_β X-Rays. Ainsi, la transition entraîne une fine division de l'énergie des rayons X caractéristiques, due aux sous-couches de l'orbite donnée (sauf la couche K). Seules les rayons caractéristiques K sont très importantes en radiologie diagnostique (transitions $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ et $K_{\beta 1}$).

Les autres rayons X caractéristiques que les transitions K ne sont pas important, car ils sont entièrement atténués par la fenêtre du tube et les filtres. Les rayons X caractéristiques de la couche K pour divers atomes cibles sont donnés dans le tableau 1.2.

Les rayons X caractéristiques K ne sont émis que si les électrons incidents ont des énergies supérieures à l'énergie de liaison de l'électron de la couche K. Par conséquent, le kilovoltage appliqué doit être supérieur à 69,5 keV pour le tungstène, 20 keV pour le molybdène et 23,2 keV pour les cibles de rhodium respectivement, ce qui est appelé comme énergie de seuil. Le nombre de rayons X caractéristiques par rapport aux rayons X Bremsstrahlung augmente avec les énergies électroniques de bombardement au-dessus de l'énergie seuil pour la production caractéristique de rayons X. Par exemple, à 80 keV, environ 5 % de la sortie totale de rayons X dans un tube d'anode en tungstène est composé de rayonnement caractéristique, alors qu'à 100 keV, il augmente à environ 10 %. Figure 1.6 montre un spectre avec un rayonnement de Bremsstrahlung et caractéristique.

TABLEAU 1.2 : Rayons X caractéristiques de la couche K (keV) et matériaux cibles des tubes à rayons x communs

Transition	Tungstène (Z=74)	molybdène (Z=42)	rhodium (Z=45)
$K_{\alpha 1}$	59.32	17.48	20.22
$K_{\alpha 2}$	57.98	17.37	20.07
$K_{\beta 1}$	67.24	19.61	22.72

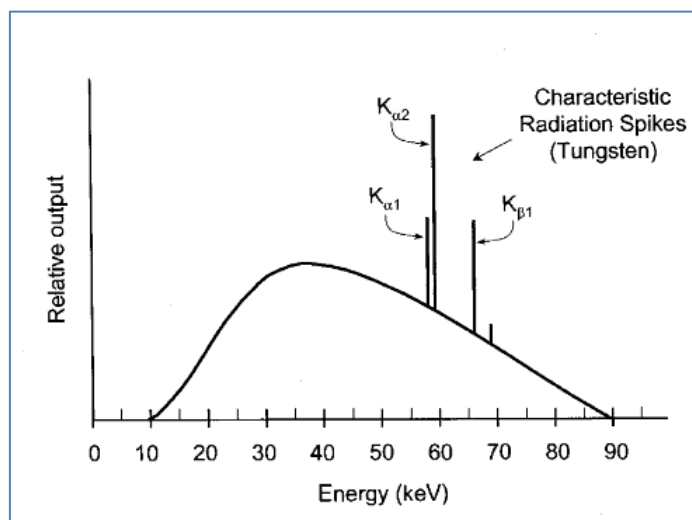


Figure 1.6 : Le spectre total : rayonnement de freinage + raies caractéristiques

1.2.3 La Relation De MOSELEY

H. Moseley a trouvé, en 1913, que les fréquences ν observées pour les séries RX, K et L satisfaisaient la relation

$$\nu^{\frac{1}{2}} = A(Z - Z_0)$$

Où Z est le numéro atomique du matériau de la cible et A, Z_0 des constantes qui dépendent de la transition observée. Pour la série K, on a trouvé expérimentalement que $Z_0 = 1$ et la valeur de A change légèrement, selon la transition observée K_α, K_β etc. pour la série L, $Z_0 = 7.4$, de nouveau A varie légèrement, selon la transition observée L_α, L_β etc.

Des calculs théoriques à partir du modèle de type de Bohr donnent les valeurs de A comme suite :

$$A_{K_\alpha} = 4.97 \times 10^7 \text{ Hz}^{1/2}$$

$$A_{L_\alpha} = 2.14 \times 10^7 \text{ Hz}^{1/2}$$

Ces valeurs sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

1.3 Conception De Tube À Rayons X

La production de rayons X nécessite les éléments suivants :

- (1) source d'électrons (cathode)
- (2) cible pour arrêter les électrons (anode)
- (3) alimentation haute tension pour accélérer les électrons
- (4) le vide
- (5) enveloppe en verre (ou en métal).

L'électron peut être produit par ionisation dans le gaz ou par émission thermoionique. La source d'électrons agit comme une cathode et la cible agit comme anode. La haute tension est appliquée entre la cathode et l'anode. Cette tension accélère les électrons à une vitesse plus élevée; en conséquence l'électron possédera une énergie cinétique élevée. Lorsque les électrons sont arrêtés par une cible, l'énergie cinétique des électrons est convertie en énergie de rayons X et donc des rayons X sont produits. L'équipement ayant toutes les exigences ci-dessus est appelé tube à rayons X.

Le courant du tube est le taux de flux d'électrons de la cathode à l'anode, mesuré en milliampères (mA), où $1 \text{ mA} = 6,24 \times 10^{15}$ électrons/second.

Pour la fluoroscopie continue, le courant du tube est généralement de 1 à 5 mA, et pour la

radiographie par projection, des courants de tube de 100 à 1 000 mA sont utilisés avec des temps d'exposition courts (moins de 100 ms). Le kVp, le mA et le temps d'exposition sont les trois principaux paramètres sélectionnables sur le panneau de commande du générateur de rayons X qui déterminent les caractéristiques du faisceau de rayons X (qualité et quantité). Ces paramètres sont discutés plus en détail dans les sections suivantes.

1.3.1 Cathode

Le pôle négatif du tube à rayons X constitue la cathode. En matière de tube à rayons X, les termes de cathode et de filament peuvent être employés de façon interchangeable. En plus du filament qui est la source des électrons pour le tube à rayons X, la cathode comporte deux autres éléments : les fils de connexion du courant de chauffage du filament (courant de bas voltage, de l'ordre de 10 V, et d'intensité élevée, entre 3 et 5 A) et la pièce de concentration.

Le nombre de photons X produits dépend totalement du nombre d'électrons qui traversent le tube, du filament à la cible (anode). L'intensité du courant-tube, mesurée en milliampères (mA), traduit le nombre d'électrons traversant le tube, à chaque seconde. Il est important de comprendre d'où viennent ces électrons et de se souvenir que le nombre d'électrons détermine l'intensité du courant-tube. Par exemple, dans une unité de temps donnée, un courant-tube de 200 mA est produit par deux fois plus d'électrons qu'un courant de 100 mA et un courant-tube de 200 mA produit deux fois plus de rayons X qu'un courant-tube de 100 mA.

1.3.1.1 Filament

Le filament est constitué d'un fil de tungstène d'environ 0,2 mm de diamètre, enroulé pour former une spirale verticale d'environ 0,2 cm de diamètre et 1 cm de longueur. Le format de la bobine offre une grande surface d'émission d'électrons. Le tungstène est utilisé comme filament en raison de son point de fusion élevé (3370 C°), de sa faible pression de vapeur, de sa bonne ductilité (facilement étirée en fil fin) et faible fonction de travail (4,5 eV). Le tungstène présente une émission thermo-ionique bien en dessous de son point de fusion. Lorsqu'un métal est chauffé, ses atomes absorbent l'énergie thermique et certains de ses électrons (les plus périphériques, dont l'énergie de liaison est la plus faible) acquièrent suffisamment d'énergie pour leur permettre de se déplacer à une petite distance de la surface du métal (normalement les électrons peuvent se déplacer à l'intérieur du métal mais ne peuvent pas s'en échapper). L'échappement de ces électrons correspond au processus d'émission thermo-ionique qui peut être défini comme l'émission d'électrons résultant d'une absorption d'énergie thermique. Le nuage électronique entourant le filament produit par émission thermo-ionique a été appelé « effet Edison ».

Le filament est constitué d'un fil de tungstène, d'environ 0,2 mm de diamètre, torsadé en une hélice verticale d'environ 0,2 cm de diamètre et 1 cm ou moins de longueur. Quand le courant de chauffage traverse ce fil de tungstène (Fig. 3), il provoque son élévation thermique. Lorsqu'un métal est chauffé, ses atomes absorbent l'énergie thermique et certains de ses électrons (les plus périphériques, dont l'énergie de liaison est la plus faible) acquièrent suffisamment d'énergie pour leur permettre de se déplacer à une petite distance de la surface du métal (normalement les électrons peuvent se déplacer à l'intérieur du métal mais ne peuvent pas s'en échapper). L'échappement de ces électrons correspond au processus d'émission thermo-ionique qui peut être défini comme l'émission d'électrons résultant d'une absorption d'énergie thermique. Le nuage électronique entourant le filament produit par émission thermo-ionique a été appelé « effet Edison ». Le circuit du filament fournit une tension de 8 à 12 V et un courant de filament sélectionnable de 3 à 7 ampères. La résistance électrique à l'écoulement d'électron chauffe le filament à la température très élevée, libérant l'électron extérieur par le processus d'émission thermo-ionique. Le taux d'émission dépend de la température et il peut être ajusté par le courant du filament. Une trace de thorium dans le filament augmente non seulement l'efficacité, mais prolonge également la durée de vie du filament. Si la tension appliquée entre l'anode et la cathode est nulle, les électrons forment un nuage près de la cathode, qui est appelé charge spatiale. Comme la tension appliquée augmente, les électrons sont accélérés vers l'anode, ce qui favorise la production des RX.

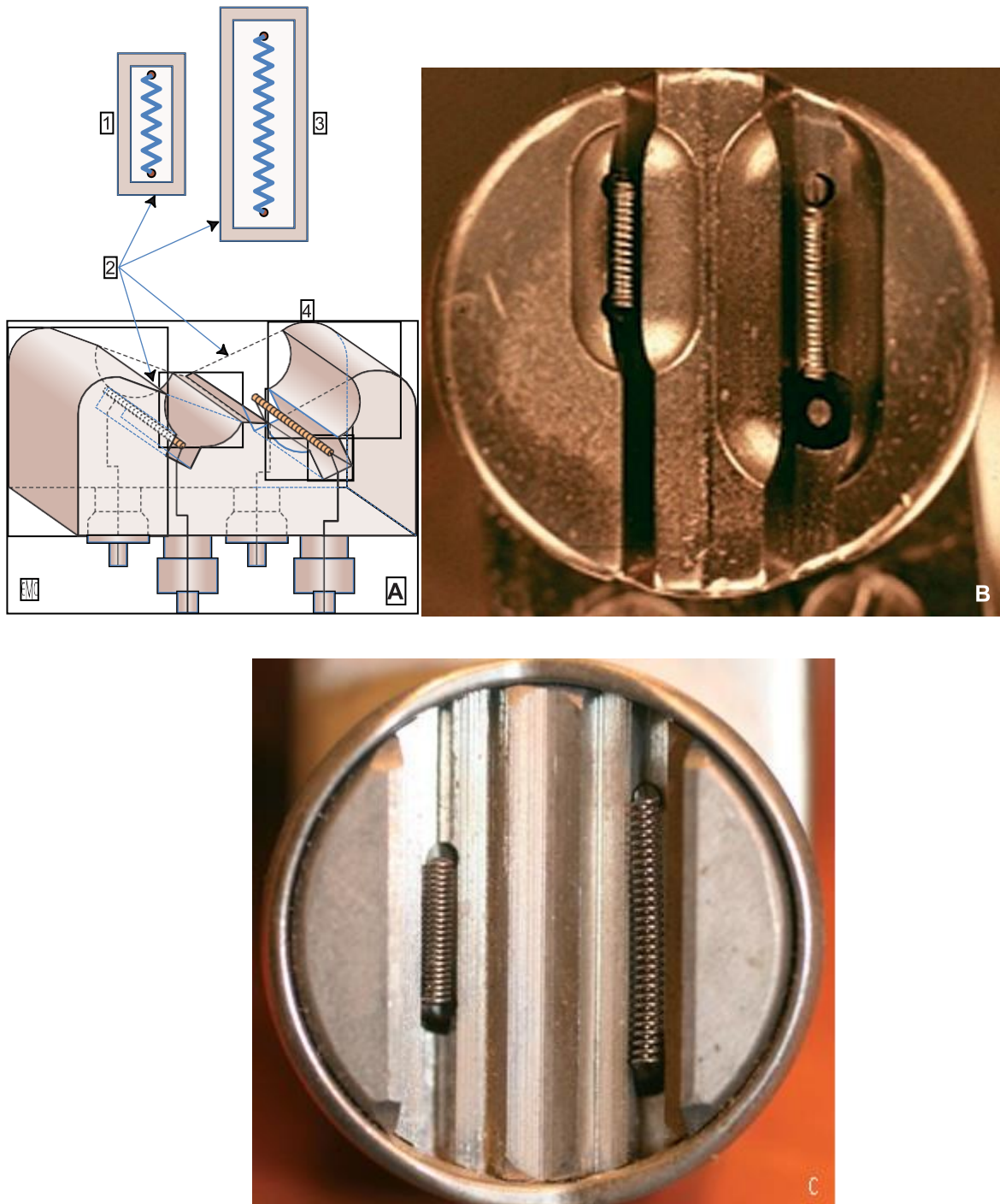


Figure 1.7 : Filaments et pièce de concentration (A à C). Il existe généralement deux filaments de tailles différentes, correspondant au petit et au grand foyer du tube à RX. Les deux filaments sont placés au sein de la pièce de concentration ou pièce de focalisation, qui assure le calibrage précis en hauteur et en largeur du faisceau électronique émis. 1. Filament du petit foyer ; 2. pièces de focalisation ; 3. filament du gros foyer ; 4. bloc cathodique.

1.3.1.2 Pièce de concentration ou pièce de focalisation

En raison des forces de répulsion mutuelles et du grand nombre d'électrons, le flux électronique à

une tendance à s'étaler et à s'élargir ce qui entraîne le bombardement d'une surface de taille inacceptable sur l'anode du tube à rayons X. La structure qui empêche ce phénomène est appelée pièce de concentration ou pièce de focalisation de la cathode (également appelée bloc cathodique); elle entoure le filament. Lorsqu'un tube à rayons X fonctionne, la pièce de focalisation est maintenue au même potentiel négatif que le filament. La pièce de concentration est usinée de telle sorte que les faisceaux électroniques émis par le filament convergent sur la cible anodique avec une taille et une forme parfaitement définies. La pièce de concentration est généralement constituée de nickel. Elle peut être portée à un potentiel plus négatif que celui du filament ; elle est alors dite « biaisée » et permet de diminuer la taille du foyer thermique.

1.3.1.2 Effet De Charge D'espace (Courant de saturation)

Lorsque le filament d'un tube à rayons X est chauffé, il se constitue une charge d'espace. Lorsque la différence de potentiel est appliquée entre la cathode et l'anode, le flux électronique du filament vers l'anode produit le courant-tube. Si la différence de potentiel appliquée est insuffisante pour que la majeure partie des électrons soit arrachée du filament au moment où ils sont émis, une charge d'espace résiduelle va persister autour du filament. Cette charge d'espace résiduelle limite le nombre des électrons disponibles et limite donc l'intensité du courant traversant le tube à rayons X. Au-dessus de 40 kV, une augmentation supplémentaire du kilovoltage produit peu de modifications dans l'intensité du courant-tube ; on peut donc considérer que la différence de potentiel de 40 kV définit la position du point de saturation du tube à rayons X. En dessous de 40 kV, le courant-tube est limité par les effets de la charge d'espace. Au-dessus de 40 kV (voltage de saturation), l'effet de la charge d'espace n'a théoriquement plus d'influence sur l'intensité du courant dans le tube à rayons X. Dans cette zone, l'intensité du courant est déterminée par le nombre d'électrons rendus disponibles par le chauffage du filament.

Jusqu'à environ 40 kV, l'augmentation du kilovoltage produit une augmentation significative de l'intensité du courant-tube, même si la température de chauffage du filament demeure constante.

En pratique, une élévation continue du courant au-delà de 40 kV s'accompagne d'une légère augmentation du courant-tube en raison d'un petit effet de charge d'espace résiduel. Dans les systèmes modernes de production des rayons X, cette discrète élévation du milli-ampérage accompagnant l'élévation du kilovoltage n'est pas souhaitable car l'intensité du courant-tube doit être contrôlée de façon très précise. En utilisant des circuits de compensation automatiques qui produisent une légère diminution dans le chauffage du filament lorsque le kilovoltage est augmenté, on supprime cet effet. Il faut remarquer que des tubes à rayons X différents ont un

courant de saturation et un voltage de saturation différents et nécessitent des compensations de charge d'espace différentes.

1.3.2 Anode

L'anode est une électrode cible métallique maintenue à une différence de potentiel positive par rapport à la cathode. Les électrons frappant l'anode déposent la majeure partie de leur énergie sous forme de chaleur, une petite fraction étant émise sous forme de rayons X. Par conséquent, la production de rayons X, en quantités nécessaires pour une qualité d'image acceptable, génère une grande quantité de chaleur dans l'anode. Pour éviter d'endommager le tube à rayons X par la chaleur, le taux de production de rayons X doit être limité.

Le matériau cible doit posséder les propriétés suivantes :

- (i) point de fusion élevé pour résister à des températures élevées
- (ii) numéro atomique élevé pour augmenter l'efficacité de la production de rayons X
- (iii) conductivité thermique élevée pour dissiper rapidement la chaleur
- (iv) faible pression de vapeur à haute température pour empêcher l'évaporation du matériau cible
- (v) facilement usiné pour créer une surface lisse.

Le tungstène (W) est le métal largement utilisé comme cible en raison de sa haute point de fusion, 3 387 °C et numéro atomique élevé ($Z=74$). Cependant, sa conductivité thermique est faible ($174 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) et le tungstène est donc intégré sur un épais bloc de cuivre. La conductivité thermique du cuivre est de $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, de sorte que la chaleur sera évacuée très rapidement vers l'environnement. La pression de vapeur du tungstène est de 5 000 kPa, ce qui est faible, ce qui signifie qu'il libère moins de vapeur dans le vide. Dans l'anode fixe, le tungstène est une plaque carrée ou rectangulaire de 2 ou 3 mm d'épaisseur et de dimension supérieure à 1 cm. Cependant, la conception à anode rotative utilise un disque de 75 à 200 mm de diamètre, avec des bords biseautés.

L'anode a tendance à se fissurer sous l'effet de fortes contraintes causées par chauffage. Par conséquent, l'alliage tungstène-rhénium (90 % tungstène + 10 %rhénium) est toujours utilisé, ce qui rend la cible plus résistante et réduit les piqûres de surface. Le molybdène (Mo, $Z = 42$) et le rhodium (Rh, $Z = 45$) sont couramment utilisés comme matériaux d'anode pour les tubes à rayons X mammographies. Ces cibles sont capables de donner des rayons X caractéristiques, adaptés aux études de contraste des tissus mous.

Pour résumer, le numéro atomique du matériel constituant la cible détermine la quantité (nombre de photons) du rayonnement produit par freinage et la qualité (énergie des photons) du

rayonnement caractéristique.

1.3.2.1 Configurations d'anodes

Les tubes à rayons X ont des configurations d'anodes fixes et rotatives. Le type de tube à rayons X le plus simple possède une anode stationnaire (c'est-à-dire fixe). Il s'agit d'un insert en tungstène noyé dans un bloc de cuivre (Fig. 1.9). Le cuivre joue un double rôle : il soutient la cible en tungstène et il élimine efficacement la chaleur de la cible en tungstène. Malheureusement, la petite surface cible limite le taux de dissipation thermique et limite par conséquent le courant maximal du tube et donc le flux de rayons X. De nombreux appareils de radiographie dentaire, appareils de radiographie portables et systèmes de fluoroscopie portables utilisent des tubes à rayons X à anode fixe.

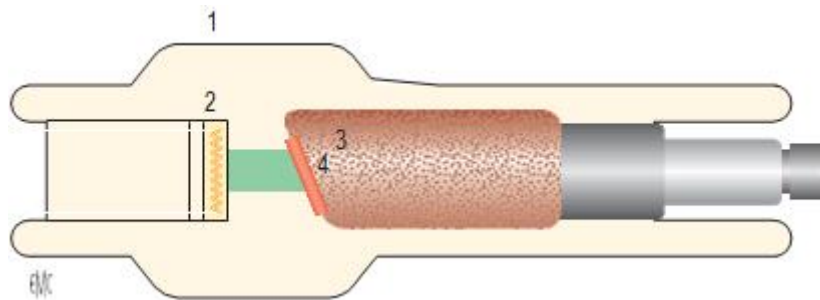


Figure 1.9: Schéma d'un tube radiogène à anode fixe. Le faisceau électronique calibré par la pièce de concentration frappe la cible (plaque de tungstène, bon pouvoir de rayonnement de la chaleur et point de fusion élevé : 3370 °C) qui est sertie dans un gros bloc de cuivre (bon conducteur de la chaleur mais point de fusion 1070 °C). 1. Enceinte (ampoule) de verre ; 2. Cathode (filament) ; 3. Anode en cuivre ; 4. Cible en tungstène $W = 74$.

Avec le développement de générateurs capables de délivrer des puissances plus importantes, le facteur limitant est devenu le tube à rayons X. La possibilité pour le tube radiogène d'atteindre des débits élevés de photons X est limitée par la quantité de chaleur générée au niveau de l'anode. L'objectif de l'anode tournante est d'accroître la capacité du tube à résister à la chaleur engendrée par les expositions longues.

L'anode du tube à anode tournante est constituée d'un gros disque de tungstène ou d'un alliage de tungstène, qui tourne théoriquement à une vitesse de 3000 tr/min lorsqu'une exposition est réalisée. En pratique l'anode n'atteint jamais une telle vitesse de rotation car il y a des contraintes mécaniques entre le rotor et les roulements à billes qui font que la vitesse réellement atteinte est de l'ordre de 2600 tr/min. Le disque de tungstène est biseauté et l'angle de ce biseau varie de 6° (mammographes, scanners) à 20° (tables multiusages). Le biseautage permet

d'appliquer le principe du foyer linéaire. L'objectif de l'anode tournante est d'étaler la chaleur produite pendant l'exposition sur une zone plus étendue que la simple cible anodique (Fig. 1.10).

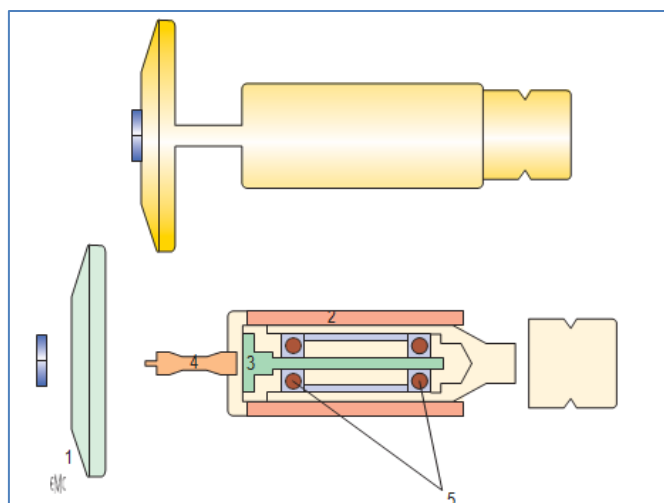


Figure 1.10: Schéma de l'anode d'un tube à rayons X à anode rotative comprend un disque de tungstène monté sur un ensemble rotor supporté par un roulement. Le rotor est constitué d'un noyau laminé de cuivre et de fer et fait partie d'un moteur à induction. Une tige en molybdène (le molybdène est un mauvais conducteur de chaleur) relie le rotor à l'anode pour réduire le transfert de chaleur vers le rotor roulements. (1. Disque anodique ; 2. rotor ; 3. axe de rotation de l'anode ; 4. segment d'axe intermédiaire en molybdène ; 5. roulements à billes ou cylindres de glissement à rainure hélicoïdale)

1.3.2.2 Angle d'anode et taille du point focal

Le foyer thermique correspond à la surface de la cible anodique qui est soumise au bombardement des électrons issus de la cathode et à la profondeur de pénétration des électrons dans cette cible anodique. La majeure partie de l'énergie cinétique de ces électrons est convertie en chaleur, avec moins de 1 % convertie en rayons X. Comme la chaleur est répartie de façon uniforme sur toute la surface du foyer thermique, un grand foyer permet l'accumulation de quantités de chaleur plus importantes avant qu'un risque d'endommager la cible anodique ne survienne. Le point de fusion du tungstène par exemple est d'environ 3370 C° mais il est préférable de rester à une température inférieure à 3000 C°. La nécessité d'un gros foyer thermique pour autoriser une plus importante charge thermique est en contradiction avec la nécessité d'un petit foyer optique pour fournir des images radiographiques détaillées. Cette difficulté a été résolue par le développement dès 1918 du principe du foyer linéaire (Fig. 1.11). La

taille et la forme du foyer thermique sont déterminées par la taille et la forme du faisceau électronique lorsqu'il frappe l'anode. La taille et la forme du faisceau électronique sont définies par :

- Les dimensions (diamètre et longueur) de l'hélice du filament de tungstène ;
- La qualité de la pièce de concentration ainsi que par la position du filament dans cette pièce.

Le faisceau électronique bombarde la cible dont la surface est inclinée de telle sorte qu'elle forme un angle θ avec le plan perpendiculaire au faisceau incident, appelé « angle d'anode ». Cet angle d'anode varie, en fonction de la destination du tube, entre 6 et 20° (voire 0°, en mammographie). L'angle d'anode détermine la surface du foyer thermique lorsqu'on l'observe dans la direction de l'axe de sortie du faisceau de photons X émergeant du tube ; cette projection du foyer thermique dans l'axe de sortie du faisceau émergeant constitue le foyer optique dont les dimensions déterminent directement l'importance du flou géométrique

La taille du point focal est définie de deux manières. La taille réelle du point focal est la zone de l'anode qui est frappée par les électrons, et elle est principalement déterminée par la longueur du filament cathodique et la largeur de la fente de la coupelle de focalisation. La taille effective du point focal correspond à la longueur et à la largeur du point focal projeté vers le bas du rayon central dans le champ des rayons X. La largeur effective du point focal est égale à la largeur réelle du point focal et n'est donc pas affectée par l'angle de l'anode. Cependant, l'angle de l'anode fait que la distance focale effective est plus petite que la distance focale réelle. Les distances focales effectives et réelles sont liées comme suit :

$$\text{Distance focale effective} = \text{Distance focale réelle} \times \sin \theta$$

où θ est l'angle de l'anode. Cette réduction de la longueur du foyer, vue vers le bas du rayon central, est appelée le principe de mise au point en ligne.

Il y a trois compromis majeurs à prendre en compte pour le choix de l'angle d'anode. Un angle d'anode plus petit fournit un point focal effectif plus petit pour la même zone focale réelle. (Une taille de point focal efficace plus petite offre une meilleure résolution spatiale) Cependant, un petit angle d'anode limite la taille du champ de rayons X utilisable en raison de la coupure du faisceau. La couverture du champ est moindre pour les courtes distances foyer-détecteur. L'angle d'anode optimal dépend de l'application d'imagerie clinique. Un petit angle d'anode (environ 7 à 9 degrés) est souhaitable pour les récepteurs d'images à petit champ de vision, tels que les équipements

cinéangiographiques et neuroangiographiques, où la couverture du champ est limitée par le diamètre de l'intensificateur d'image. Des angles d'anode plus grands (environ 12 à 15 degrés) sont nécessaires pour les travaux radiographiques généraux afin d'obtenir une couverture de champ étendue à de courtes distances foyer-image.

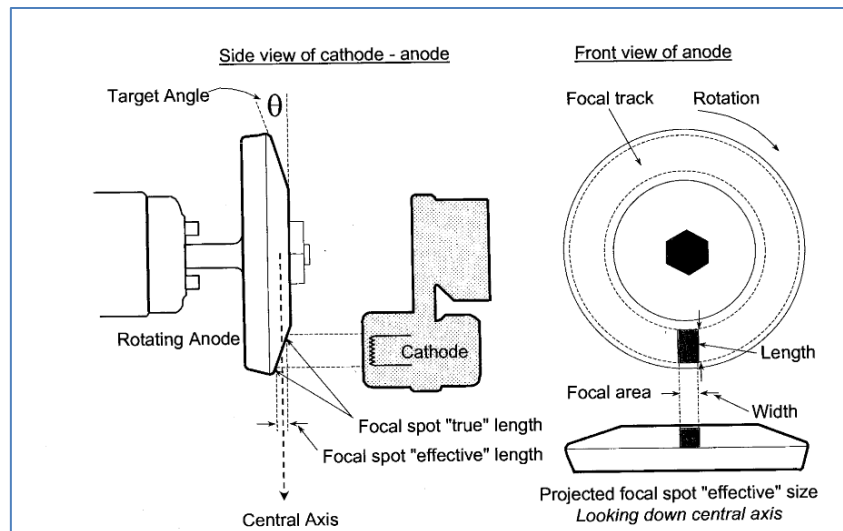


Figure 1.11: L'angle anodique (cible), θ , est défini comme l'angle de la surface cible par rapport au rayon central. La distance focale, telle que projetée sur l'axe central, est raccourcie, selon le principe de mise au point de la ligne (en bas à droite).

1.3.3 Insert De Tube À Rayons X, Boîtier De Tube, Filtration Et Collimation

1.3.3.1 Insert De Tube À Rayons X

L'insert du tube ou enveloppe est constitué de verre borosilicaté (Pyrex). Le verre pyrex peut résister à des températures élevées et agir également comme isolant électrique. Il contient du vide qui supporte les électrodes.

L'insert de tube (i) absorbe les rayons X émergent dans des directions indésirables, (ii) maintient le vide requis, (iii) agit comme un isolant électrique et (iv) contient également le système de refroidissement qui élimine la chaleur de la cible. Le verre n'est pas un insert idéal pour les tubes à rayons X car la vapeur de tungstène se condense et forme une fine couche conductrice d'électricité. Cela peut entraîner la formation d'arcs électriques et une perte de vide due à la perforation du verre. Le verre est également susceptible d'être endommagé par le bombardement électronique. Ainsi, des enveloppes métalliques ont été développées avec une fenêtre en béryllium à faible atténuation ($Z = 4$), pour la transmission des rayons X. Cependant, le métal peut court-circuiter la cathode et l'anode en raison de sa conductivité. Pour éliminer cela, des isolations en

céramique ou en verre sont réalisées à l'extrémité du tube. Ce type d'enveloppe est appelé conception en métacéramique ou en verre métallique.

Un vide poussé est maintenu entre l'anode et la cathode. Ceci est nécessaire (i) pour éviter la collision entre les électrons et les molécules de gaz, qui provoque une ionisation qui réduit l'énergie cinétique des électrons, (ii) pour empêcher l'oxydation des électrodes et (iii) pour agir comme un isolant électrique. Le vide requis est inférieur à 10 à 5 mm Hg.

1.3.3.2 Boîtier De Tube

Le boîtier du tube à rayons X soutient, isole et protège l'insert du tube à rayons X de l'environnement. L'insert du tube à rayons X baigne dans une huile spéciale, contenue dans le boîtier, qui assure la conduction thermique et l'isolation électrique. Un boîtier typique de tube à rayons X contient un soufflet pour permettre l'expansion de l'huile car elle absorbe la chaleur pendant le fonctionnement. Si l'huile chauffe excessivement, le soufflet en expansion active un micro-interrupteur qui arrête le système jusqu'à ce que le tube refroidisse.

Le boîtier du tube est protégé intérieurement par du plomb pour atténuer les rayons X émis dans d'autres directions, sauf à travers la fenêtre. Le boîtier en acier est doublé de plomb pour empêcher les radiations d'émerger dans toutes les directions.

1.3.3.3 Filtration

Un filtre est une feuille métallique introduite sur le trajet des rayons X, afin de réduire la dose administrée au patient. Les rayons X de diagnostic comprennent à la fois des rayons X à faible énergie et à haute énergie. Lorsque les rayons X traversent un patient, seuls les rayons X de haute énergie pénètrent à travers le patient et forment l'image radiologique. Tandis que les rayons X de faible énergie sont absorbés dans les premiers centimètres du tissu, augmentant ainsi la dose de rayonnement. L'introduction de filtres absorbe ces rayons X de faible énergie et réduit la dose administrée au patient. Ce processus d'élimination des rayons X de faible énergie, en introduisant des feuilles métalliques, est appelé filtration.

La filtration comporte deux éléments, à savoir

- (i) la filtration inhérente et ;
- (ii) la filtration additionnelle.

La filtration résultant de l'absorption des rayons X par le tube à rayons X et son boîtier est appelée filtration inhérente. La filtration inhérente inclut l'épaisseur (de 1 à 2 mm) de l'insert en verre ou en métal au niveau de l'orifice du tube à rayons X. L'élimination par la filtration

additionnelle des photons X de faible énergie du spectre de freinage est un élément essentiel, tant pour la radioprotection des patients que pour la qualité de l'image. Elle est obtenue par l'interposition d'un assemblage de filtres métalliques sur la fenêtre de sortie des photons X, au niveau de boîtier du tube à rayons X. Elle doit être adaptée à l'énergie des photons X utilisés.

La filtration du faisceau recommandée est la suivante :

(A) Radiographie générale

- 1,5 mm Al en dessous de 70 kVp
- 2,0 mm Al entre 70 et 100 kVp
- 2,5 mm Al au dessus de 100 kVp

(B) Mammographie

- 1 mm Be + Mo 0,03 mm (cible Mo)
- 1 mm Be + Rh 0,025 mm (Rh cible)

En mammographie, la cible Mo avec filtre Rh est couramment utilisée. Cependant, Mo ne peut pas être utilisé comme filtre dans les tubes à rayons X de mammographie avec cibles Rh.

1.3.3.4 Collimation

Les collimateurs définissent la taille et la forme du faisceau de rayons X qui émerge de la fenêtre de sortie du tube. Le collimateur type est constitué d'un assemblage de volets métalliques plombés mobilisables deux à deux et disposés dans des directions orthogonales. Ces volets plombés absorbent totalement les photons X, permettant ainsi de définir de façon précise la zone irradiée sur le patient.

Pour aider les manipulateurs dans le positionnement des volets des diaphragmes, une source de lumière est placée dans le collimateur, à la même distance que le foyer du tube d'un miroir peu atténuant placé sur l'axe du rayon principal du faisceau X.

Le collimateur du tube à rayons X est fixé à la gaine au niveau du port du tube, généralement sur un collier permettant un positionnement en rotation. Une source lumineuse, positionnée à un emplacement de foyer virtuel, éclaire le champ à partir d'un miroir d'angle de 45 degrés. La lumière réfléchiée par le miroir éclaire de façon précise la surface du champ irradié. Les lames de collimateur en plomb définissent les champs de rayonnement et de lumière (Fig. 1.12).

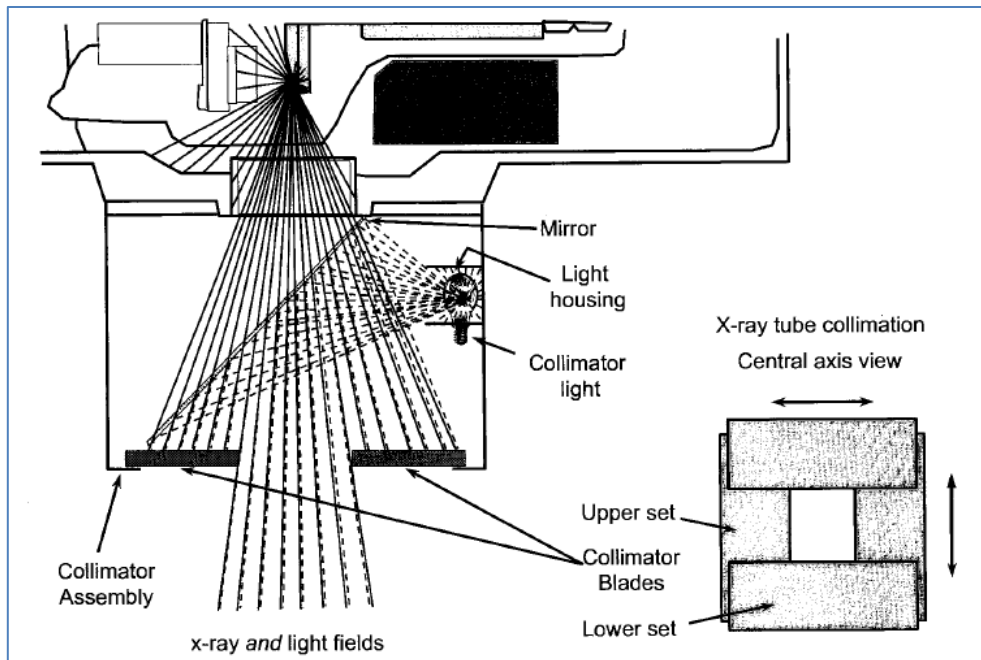


Figure 1.12: collimateur du tube à rayons X

1.3.4 Kilovoltage appliqué aux bornes du tube (kVp)

L'énergie des photons émis par le tube à rayons X dépend de l'énergie cinétique des électrons dans le faisceau électronique qui bombarde la cible du tube radiogène. L'énergie des électrons est elle-même déterminée par le kilovoltage maximal utilisé (kVp). Donc le kilovoltage maximal détermine l'énergie maximale (qualité) des photons X produits. De plus les techniques utilisant les kilovoltages les plus élevés vont également augmenter la quantité de rayons X produite. La quantité de radiations produite augmente comme le carré du kilovoltage ; l'intensité du faisceau de rayons X est également proportionnelle au milliampérage.

La longueur d'onde du rayonnement caractéristique (spectre de raies) produit par la cible n'est pas modifiée par des modifications du kilovoltage maximal. Naturellement, le kilovoltage appliqué doit être suffisamment élevé pour provoquer l'émission de rayonnement caractéristique. Par exemple, avec une cible de tungstène, il faut une différence de potentiel d'au moins 70 kVp pour provoquer l'apparition de rayonnement caractéristique de la couche K.