

Production des rayons X en imagerie par projection et en scanographie

D. Régent, D. Mandry, V. Croise-Laurent, A. Oliver, F. Jausset, V. Lombard

Le tube radiogène reste le facteur limitant dans les techniques d'imagerie roentgénienne exigeantes : angiographies et radiologie interventionnelle, scanographie avec rapport signal sur bruit (résolution en contraste) élevé, en particulier chez les sujets en surpoids. L'optimisation de la qualité d'image et la réduction des doses « dans les limites du raisonnable » nécessitent une bonne compréhension du rôle des différents paramètres : intensité du courant-tube (mA), différence de potentiel aux bornes du tube (kVp), durée des expositions (s) dans les composants géométriques (flous géométrique, cinétique, de détection, morphologique) et photographiques (contraste, densité) de l'image, en scanner comme en radiographie par projection. La technologie des tubes radiogènes a beaucoup évolué, dans la discrétion médiatique, au cours des dernières décennies, en particulier pour répondre aux exigences croissantes du scanner (acquisitions multiphasiques avec reconstruction « en temps réel », ou presque, etc. ; grandes longueurs des segments explorés). Les caractéristiques significatives des tubes se sont modifiées ; la capacité de dissipation calorifique de l'ensemble tube-gaine est beaucoup plus importante en scanographie que la puissance des foyers du tube ; les technologies utilisées (diamètre, masse et composition de l'anode, enceintes métal-céramique, modalités de dissipation thermique par rayonnement et par convection, etc.) sont devenues des critères essentiels de choix car la performance des machines, au quotidien, est sous leur totale dépendance. Il faut donc que les radiologues fassent l'effort de s'investir dans ces domaines techniques s'ils veulent rester des interlocuteurs crédibles, capables d'argumenter des choix de matériel sur des bases médicotéchniques plutôt que médicoéconomiques (trop souvent devenues purement économiques).

© 2013 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Rayons X ; Tubes à rayons X ; Scanographie–technique ; Radiographie par projection–technique

Plan

■ Généralités	1
■ Bases physiques de la production des rayons X en radiodiagnostic	2
■ Tubes radiogènes – Caractères généraux	2
Enceinte ou ampoule de verre	3
Cathode	6
Principe du foyer linéaire	7
Anode	11
Tubes à effet de grille	11
Courant de saturation	11
Effet de talon de l'anode	12
Gaine et câbles haute tension	13
Caractéristiques et abaques de charges des tubes à rayons X	14
Tubes à rayons X métal/céramique	14
Rayonnement extrafocal	14
Allongement de la durée de vie des tubes radiogènes et accroissement de la capacité calorifique maximale des tubes radiogènes	14
Intensité du faisceau de rayons X	16
Filtration additionnelle des tubes radiogènes	16
Collimation du faisceau de rayons X	16

■ Tubes radiogènes en scanographie	16
Capacité calorifique maximale des tubes en scanographie	18
Capacité de dissipation thermique maximale des ensembles gaine-tube-système de refroidissement en scanographie	18
■ Conclusion	20

■ Généralités

La production des rayons X reste un sujet technologique de la plus haute importance dans les deux grands domaines d'application de la radiologie « roentgénienne » que sont :

- l'imagerie par projection, qu'elle soit radiographique (clichés standard), radioscopique télévisée (en particulier pour les gestes radioguidés en radiologie et en cardiologie interventionnelle) ou sériographique (angiographie numérisée et imagerie volumique par acquisition rotatoire). À l'heure actuelle, toutes ces techniques sont totalement numérisées, quel que soit le système de détection (écrans radioluminescents à mémoire [ERLM] ou « plaques phosphore » ; amplificateurs de luminance de plus en plus remplacés par les capteurs plans dynamiques), mais la qualité d'image reste totalement dépendante de la

maîtrise du contraste par le choix judicieux des paramètres d'exposition (en particulier le kilovoltage mais aussi la limitation du rayonnement diffusé) et de la résolution spatiale par l'utilisation adéquate du petit foyer des tubes radiogènes, lorsque cela est possible. La radioprotection est également directement dépendante d'une utilisation rationnelle et raisonnée des paramètres d'exposition, permettant de résoudre au mieux les compromis nécessaires entre dose délivrée et qualité d'image ;

- l'imagerie scanographique dans laquelle la production des rayons X reste le seul facteur limitant la longueur et/ou la répétition des séquences d'acquisition dans les explorations multiphasiques, en dépit de la réduction des doses nécessaires rendue possible par les techniques récentes et à venir de reconstruction par itérations. Il s'agit de limites physiques directement liées au mécanisme de production des rayons X et à l'inévitable production massive de chaleur qui lui est associée. C'est donc, à l'heure actuelle, la capacité de dissipation thermique de l'ensemble « tube radiogène-gaine-systèmes de refroidissement » qui définit les possibilités exactes d'acquisition scanographique dans les circonstances les plus exigeantes (explorations multiphasiques de segments corporels de grande longueur, même avec un pitch élevé ou plus encore explorations multiphasiques de segments corporels relativement courts mais avec des acquisitions « chevauchées » [pitch < 1] pour obtenir un rapport signal sur bruit élevé [explorations scanographiques cardiaques et coronaires en particulier]).

Les progrès réalisés dans les systèmes de détection, en particulier les ERLM et les capteurs plans pour l'imagerie par projection, l'amélioration des performances des cristaux des détecteurs et le développement d'algorithmes de reconstruction beaucoup plus performants (reconstruction itérative) en scanographie ont diminué, parfois de façon massive, les exigences en matière de radiations ionisantes tout en maintenant, lorsque l'on respecte des conditions de réalisation raisonnables des examens, une qualité d'image acceptable sur le plan diagnostique. Il n'en demeure pas moins que ces résultats optimisés et adaptés aux circonstances restent totalement dépendants d'une utilisation judicieuse des paramètres d'exposition qui nécessite donc une parfaite maîtrise des modalités de fonctionnement du tube radiogène et des dispositifs qui lui sont annexés.

La radioprotection est particulièrement importante lors des examens scanographiques chez l'enfant et l'adulte jeune, en particulier la femme en âge de procréer. L'adaptation des paramètres à la morphologie des patients (indice de masse corporelle++) et l'optimisation du rapport signal sur bruit en fonction du contraste propre des structures radiographiées sont les principes de base d'une adaptation judicieuse des paramètres de l'exposition sans compromettre la qualité diagnostique de l'examen.

■ Bases physiques de la production des rayons X en radiodiagnostic

La différence de potentiel entre cathode (filament) et anode est réglée par le choix du kilovoltage (kV). L'énergie cinétique acquise par les électrons dans le champ électrique cathode-anode correspond à $E = eV$ (e étant la charge électrique d'un électron qui est une constante, égale à $1,60 \times 10^{-19} \text{C}$ et V la différence de potentiel cathode-anode). Rappelons que, si la différence de potentiel cathode-anode est exprimée par la valeur de pic du kilovoltage (kVp) dans la réalité, le kilovoltage varie en fonction de la qualité du redressement du courant électrique alimentant le tube. Seule une petite fraction des électrons est accélérée par le champ électrique maximal ; pour celle-ci, l'énergie cinétique des électrons exprimée en keV est numériquement identique au kVp (pour une différence de potentiel [DDP] de 100 kVp, cette fraction des électrons acquiert une énergie cinétique de 100 keV) ; le reste des

électrons acquiert une énergie cinétique inférieure à 100 keV et l'énergie cinétique moyenne des électrons traversant le tube pour 1 kVp de 100 est de l'ordre de 70 keV.

Les photons X « utiles » pour le radiodiagnostic (radiographie par projection et scanographie) correspondent à des énergies s'étalant de 10 à 130 keV. Ils sont produits par deux mécanismes.

- Le mécanisme le plus important, quantitativement et qualitativement est le freinage (Bremstrahlung) qui correspond aux interactions entre les électrons accélérés par le champ électrique élevé créé entre le filament et l'anode et les noyaux des atomes du métal lourd constituant l'anode.
- Le second mécanisme de production des rayons X dans la cible anodique correspond au rayonnement dit « caractéristique » qui résulte d'interactions entre les électrons accélérés par le champ électrique créé entre cathode et anode et les électrons des couches orbitales des atomes du métal constituant l'anode. Ce second mécanisme de production des photons X est souvent désigné sous le terme de phénomène de collision.



■ Tubes radiogènes – Caractères généraux [1-3]

Les tubes radiogènes sont des convertisseurs d'énergie qui consomment de l'énergie électrique pour produire des radiations électromagnétiques de longueurs d'onde (et d'énergie) variées. Les plus énergétiques des rayonnements produits (rayons X) ne représentent que 1 % de l'énergie électrique consommée ; les 99 % restants sont des radiations de grande longueur, en quasi-totalité du rayonnement infrarouge, c'est-à-dire de la chaleur. Les rayons X sont produits par conversion d'énergie quand un faisceau d'électrons accélérés à grande vitesse dans un champ électrique est soudainement décéléré dans la cible inclinée, constituée de métal lourd (de numéro atomique Z élevé), d'un tube à rayons X.

Le tube à rayons X classique est constitué d'une enveloppe de verre Pyrex® à l'intérieur de laquelle est créé un vide le plus complet possible. Le tube contient deux électrodes (ce qui lui confère les propriétés d'une diode). Ces électrodes sont disposées de telle sorte que les électrons produits à la cathode (pôle négatif ou filament) peuvent être accélérés par une très haute différence de potentiel vers l'anode (électrode positive ou cible) (Fig. 1).

Enceinte ou ampoule de verre

Il est nécessaire de souder hermétiquement les électrodes métalliques à l'ampoule de verre du tube à rayons X et de préserver le vide, malgré les très importantes et rapides variations thermiques auxquelles ces matériaux sont soumis dans le tube en fonctionnement. Si du gaz pénétrait à l'intérieur du tube, les électrons accélérés vers l'anode (cible) entreraient en collision avec les molécules de ce gaz, ce qui leur ferait perdre de l'énergie cinétique et surtout provoquerait la formation d'électrons secondaires éjectés des molécules de gaz par ionisation. Par ce processus, des électrons supplémentaires seraient accélérés vers l'anode. Évidemment cette production d'électrons secondaires ne pourrait pas être contrôlée. Leur présence entraînerait des variations dans le nombre et, de façon plus déterminante, dans la vitesse des électrons parvenant sur la cible. Ceci causerait de grandes variations dans l'intensité du courant-tube et dans l'énergie des rayons X produits.

L'objectif du vide dans les tubes à rayons X est de permettre un contrôle précis et séparé du nombre et de la vitesse des électrons accélérés. La forme et la taille des tubes à rayons X sont spécialement déterminés pour empêcher la formation d'arcs électriques entre les électrodes.

Les fils de connexion doivent être soudés aux parois de l'ampoule en verre du tube. Pendant le fonctionnement du tube radiogène, le verre et les fils de connexion sont chauffés à des températures très élevées. En raison des différences de leur(s) coefficient(s) de dilatation linéaire, la plupart des métaux se dilatent plus que le verre lorsqu'ils sont chauffés. Ces différences dans les coefficients de dilatation linéaire pourraient entraîner la rupture des soudures verre-métal, ce qui détruirait le vide dans le tube, si

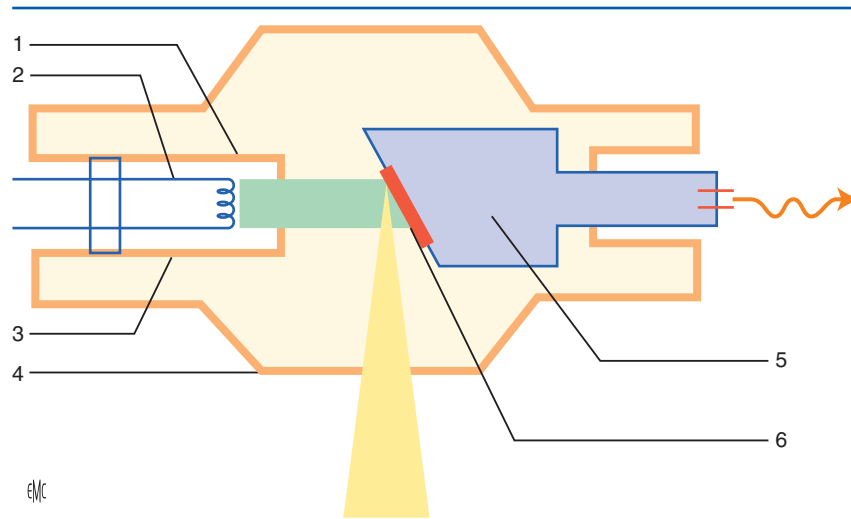


Figure 1. Tube radiogène à anode fixe. La différence de potentiel créée entre la cathode (filament + pièce de concentration) et l'anode accélère les électrons produits par effet thermo-ionique en chauffant le filament. Le faisceau électronique ainsi produit (coloré en vert) est freiné dans une cible de tungstène (colorée en rouge) sortie dans un bloc de cuivre (coloré en gris), qui permet d'évacuer la chaleur par conduction. 1. Pièce de concentration; 2. filament; 3. cathode; 4. tube; 5. anode (cuivre); 6. cible anodique tungstène W ($Z = 74$).



Figure 2. Tube radiogène à anode tournante de 140 mm de diamètre, en graphite. 1. Soudures verre-métal sur le versant cathodique; 2. cathode, ensemble filaments-pièce de concentration; 3. anode tournante dont la piste en tungstène (cible) est dépolie, sous l'action de bombardement électronique; 4. rotor situé à proximité immédiate de la paroi de verre au niveau du col de l'ampoule, pour limiter au maximum la distance séparant rotor et stator, favorisant ainsi l'application des champs électromagnétiques.

des précautions particulières n'étaient pas prises. Pour cette raison, on utilise généralement des alliages métalliques spéciaux ayant approximativement le même coefficient de dilatation thermique que le verre Pyrex® (Fig. 2).

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.

Filament

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 ». Un filament de tungstène pur doit être chauffé à une température d'au moins 2200 °C pour émettre un nombre suffisant d'électrons (thermions). Le tungstène n'est pas un matériau aussi efficace que d'autres constituants comme des alliages de tungstène utilisés dans certains tubes électroniques. Il est cependant choisi pour les tubes à rayons X car il peut être étiré en un fil fin mais solide; il a un point de fusion élevé (3370 °C) et n'a qu'une faible tendance à se vaporiser; ce qui confère au filament une durée de vie raisonnablement longue.

Les électrons émis par le filament de tungstène forment un petit nuage dans l'environnement immédiat du filament. Cet amas de charges négatives formé par les électrons est appelé charge d'espace. Ce nuage de charge négative tend à empêcher d'autres électrons d'être émis par le filament tant qu'ils n'ont pas acquis une énergie thermique suffisante pour surpasser les forces d'attraction du champ électrique créé par la charge d'espace. La tendance de la charge d'espace à limiter l'émission d'un plus grand nombre d'électrons par le filament est appelée « effet de charge d'espace ». Quand les électrons quittent le filament, la perte de ces charges négatives fait que le filament acquiert une charge positive. Le filament attire de ce fait quelques-uns des électrons émis qui reviennent alors vers leur origine. Lorsqu'un filament est chauffé à sa température d'émission, un état d'équilibre est rapidement atteint. À l'équilibre, le nombre d'électrons revenant au filament est égal au nombre d'électrons émis. En conséquence, le nombre d'électrons constituant la charge d'espace demeure constant, tandis que le nombre réel d'électrons émis est totalement déterminé par la température du filament.

Les intensités de courant-tube élevées qui peuvent être produites par l'émission thermo-ionique sont rendues possibles parce qu'un très grand nombre d'électrons peut être accéléré par le champ électrique créé entre la cathode (électrode négative) et l'anode (électrode positive) du tube à rayons X. Le nombre d'électrons intéressés est énorme. L'unité d'intensité du courant électrique est l'ampère (A) qui peut être défini comme le niveau de « flux » atteint lorsqu'une charge de 1 Coulomb d'électricité

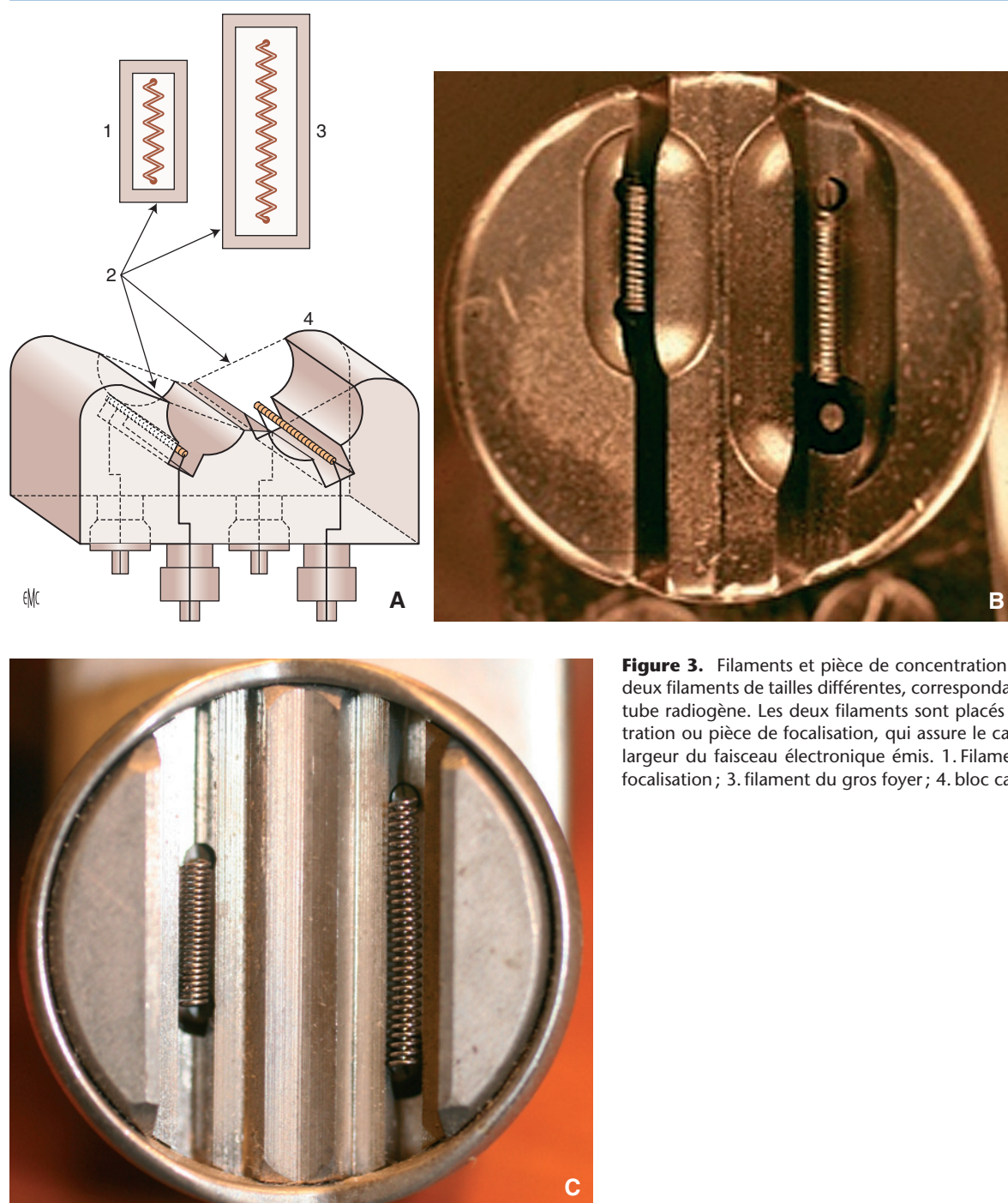


Figure 3. Filaments et pièce de concentration (A à C). Il existe généralement deux filaments de tailles différentes, correspondant au petit et au grand foyer du tube radiogène. Les deux filaments sont placés au sein de la pièce de concentration ou pièce de focalisation, qui assure le calibrage précis 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.

traverse un conducteur en 1 seconde. Le Coulomb est l'équivalent de la charge électrique transportée par $6,25 \cdot 10^{18}$ électrons traversant le tube, de la cathode à l'anode. Donc un courant-tube de 100 mA (0,1 A) peut être considéré comme un flux de $6,25 \cdot 10^{17}$ électrons passant de la cathode à l'anode en 1 seconde. Le courant électronique traversant le tube à rayons X est unidirectionnel (toujours de la cathode vers l'anode).

Pièce de concentration ou pièce de focalisation

En raison des forces de répulsion mutuelles et du grand nombre d'électrons, le flux électronique a 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 ; 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 (foyer variable) (Fig. 4).

Les tubes à rayons X classiques sont équipés d'un filament unique ou plus habituellement d'un double filament. Chaque filament est constitué d'une hélice de fil métallique ; ils sont installés soit côte à côte, soit l'un en dessous de l'autre, avec toujours un grand filament et un filament plus petit. Il est important de comprendre qu'on ne peut employer qu'un seul filament pour une exposition donnée ; le plus gros filament étant utilisé pour les expositions les plus importantes. Le filament chauffé est incandescent et peut être facilement observé en regardant la fenêtre de sortie d'un tube à rayons X, si l'on retire le filtre additionnel.

D'autres dispositions des filaments ont pu être employées dans des tubes à rayons X hautement spécialisés ; des tubes avec trois filaments (triple foyer) ou des tubes pour l'angiographie stéréoscopique dans lesquels on a eu recours à des filaments éloignés de plusieurs centimètres, ce qui permettait des expositions

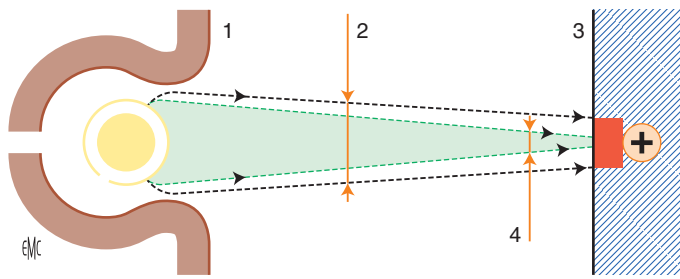


Figure 4. Modulation de la taille du foyer par la pièce de concentration. En portant la pièce de focalisation à un potentiel négatif, on diminue la relative dispersion des électrons émis par le filament et on peut ainsi moduler la taille de la surface bombardée sur la cible (foyer thermique). 1. Pièce de concentration ; 2. grand foyer ; 3. anode ; 4. petit foyer.

alternées séparées de $1/10^6$ de seconde avec chacun des deux filaments et l'acquisition d'images pouvant alors être utilisées en vision stéréoscopique.

La vaporisation du métal du filament, quand il est chauffé, raccourcit la durée de fonctionnement du tube à rayons X car le filament peut se rompre lorsqu'il est devenu trop fin. Il faut donc limiter au strict nécessaire la durée d'échauffement du filament. Il existe pour ce faire des dispositifs permettant de garder en *stand-by* l'intensité du courant de chauffage du filament à une valeur faible, de l'ordre de cinq mA ; lorsque les expositions nécessitant des courants-tubes plus élevés sont souhaitées, un dispositif automatique permet de *booster* le courant de chauffage du filament pour l'amener de la valeur du *stand-by* à la valeur requise pour la durée précise de l'exposition.

Le tungstène vaporisé à partir du filament (et à un moindre degré de l'anode) se dépose sous forme d'une couche extrêmement fine sur la surface interne de l'ampoule de verre du tube à rayons X. Cela provoque une coloration qui devient de plus en plus intense lorsque le tube vieillit ; il acquiert alors une teinte « bronzée » (Fig. 5A à C). Cette pellicule de tungstène a deux conséquences : elle entraîne une filtration du faisceau de rayons X produit, qui modifie progressivement sa qualité en le « durcissant ». D'autre part, la présence de métal sur le verre augmente le risque d'arc

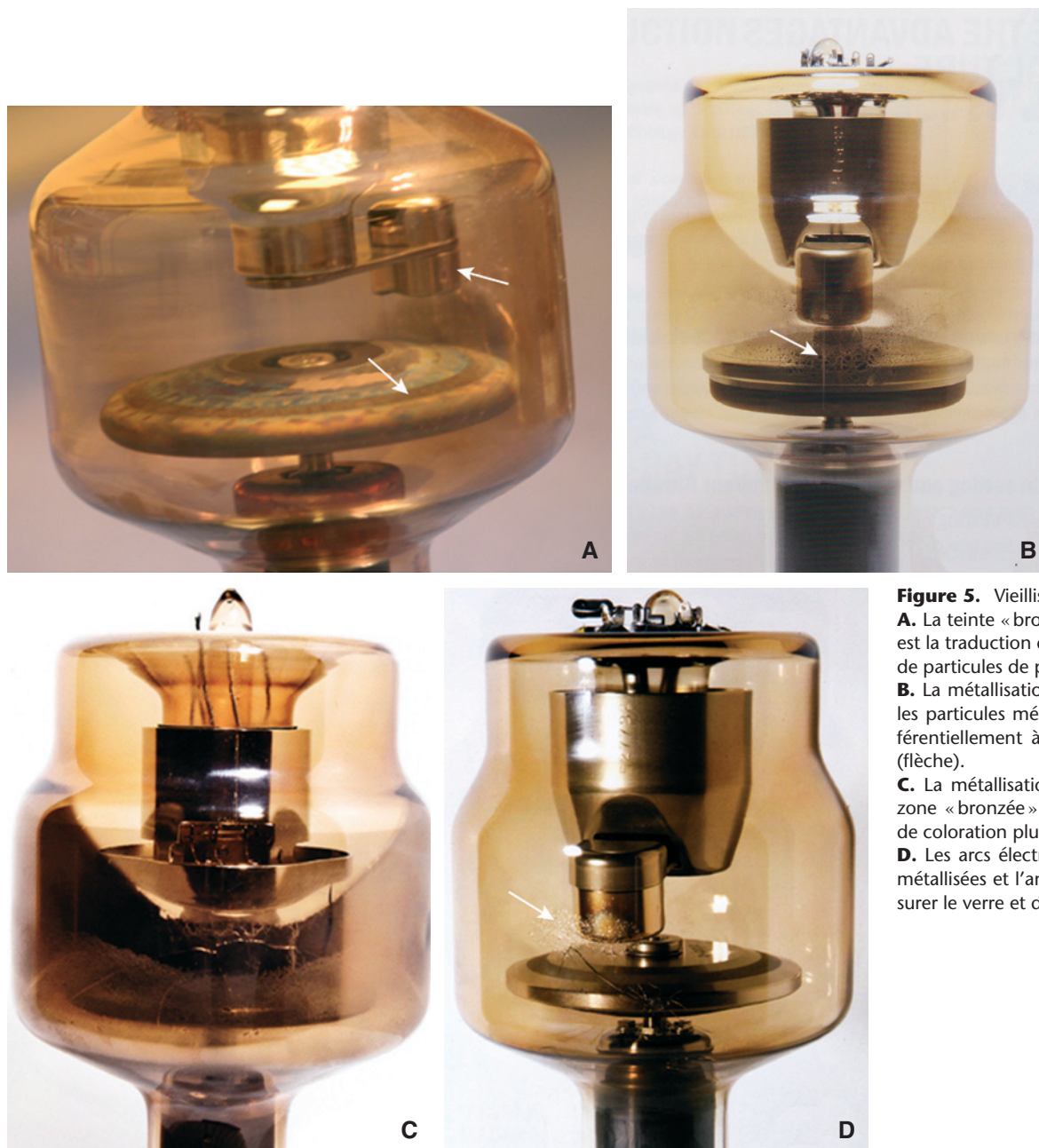


Figure 5. Vieillesse du tube à rayons X. **A.** La teinte « bronzée » de la paroi de l'ampoule est la traduction de sa « métallisation » par dépôt de particules de poudre de tungstène. **B.** La métallisation peut être due aux filaments ; les particules métalliques se déposent alors préférentiellement à l'aplomb du bloc cathodique (flèche). **C.** La métallisation peut être due à l'anode ; la zone « bronzée » est beaucoup plus étendue et de coloration plus dense. **D.** Les arcs électriques entre les parois de verre métallisées et l'anode ou le filament peuvent fissurer le verre et détruire le vide (flèche).

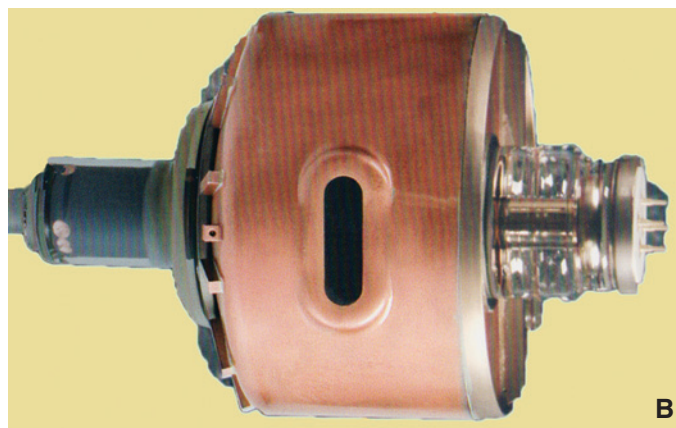


Figure 6. Les tubes à enceinte métallique et jonctions en céramique ont une durée de vie nettement plus longue, en limitant les dépôts métalliques sur les parois (A, B). Le faisceau de rayons X émis ne subit aucune modification (filtration et durcissement par la métallisation du verre de la fenêtre de sortie, avec les enceintes en verre).

électrique entre le verre « métallisé » et les électrodes, lorsqu'on utilise des kilovoltages élevés. Ceci peut entraîner une perforation du tube (Fig. 5D). Une des raisons pour lesquelles on a développé des tubes à rayons X avec des enceintes métalliques au lieu d'ampoules de verre a été la diminution des conséquences des dépôts de tungstène sur les parois du tube (Fig. 6).

Principe du foyer linéaire

Le foyer thermique correspond à la surface de la cible de tungstène 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 le tungstène de la cible anodique ne survienne. Le point de fusion du tungstène 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. 7). 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 α 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 émergent du tube ; cette projection du foyer thermique dans l'axe de sortie du faisceau émergent constitue le foyer optique dont les dimensions déterminent directement l'importance du flou géométrique

et donc la résolution spatiale des images. La taille du foyer optique est directement reliée au sinus de l'angle d'anode : puisque $\sin 20^\circ$ égale 0,342 et $\sin 16,5^\circ$ égale 0,284, un angle d'anode de 16,5° produit un plus petit foyer optique qu'un angle d'anode de 20°, pour un faisceau électronique de hauteur (correspondant à la longueur du filament) donnée. Donc plus l'angle d'anode est petit, plus la taille du foyer optique est réduite, ou, pour une taille de foyer optique (donc un niveau de résolution spatiale) donnée, le foyer thermique (donc la puissance disponible) est d'autant plus grand que l'angle d'anode est petit (Fig. 8, 9). Mais la réduction de l'angle d'anode réduit la surface du champ couvert à une distance focale (distance foyer optique du tube-plan du système de détection) donnée.

On peut fabriquer des tubes avec un foyer de 0,3 mm et un angle d'anode de seulement 6°, ce qui permet d'avoir un foyer de dissipation thermique de très grande taille pour un foyer optique de taille très réduite ; on peut alors produire des images de très haute résolution spatiale. De tels tubes peuvent être utilisés lorsque les champs explorés sont réduits, par exemple en mammographie, en angiographie cardiaque et coronaire et en scanographie.

Pour des raisons pratiques, sur des installations multiusages (tables télécommandées) travaillant avec des distances focales de l'ordre de 110 cm, et parce que l'on souhaite conserver des champs d'exploration de 36 × 43 cm, aussi bien pour le petit foyer que pour le grand foyer du tube, l'angle d'anode ne peut être réduit en deçà de 15°. Cette limitation du champ est dictée par l'effet de talon de l'anode qui définit le champ couvert maximal à une distance focale donnée.

La taille des foyers optiques couramment utilisés en radiographie par projection sur des installations multiusages est de l'ordre de 1,5 mm pour les gros foyers et 0,6 à 1 mm pour les petits foyers. Pour des installations dédiées, on peut adopter un petit foyer de 0,3 mm surtout si l'on veut réaliser des clichés en agrandissement (radiographies ostéoarticulaires des extrémités des membres, radiographies craniofaciales, en particulier en orthodontie). Il faut insister sur le fait que la radiographie en agrandissement impose le recours à un foyer de taille réduite (inférieure ou égale à 3 mm) en plus des modifications positionnelles du sujet par rapport à la distance foyer-système de détection. Le but de l'agrandissement est en effet non pas d'avoir des images agrandies mais d'accroître la visibilité des petits détails par l'augmentation de la résolution spatiale, ce qui ne peut être obtenu que par l'utilisation conjointe d'un petit foyer et d'un rapport d'agrandissement élevé.

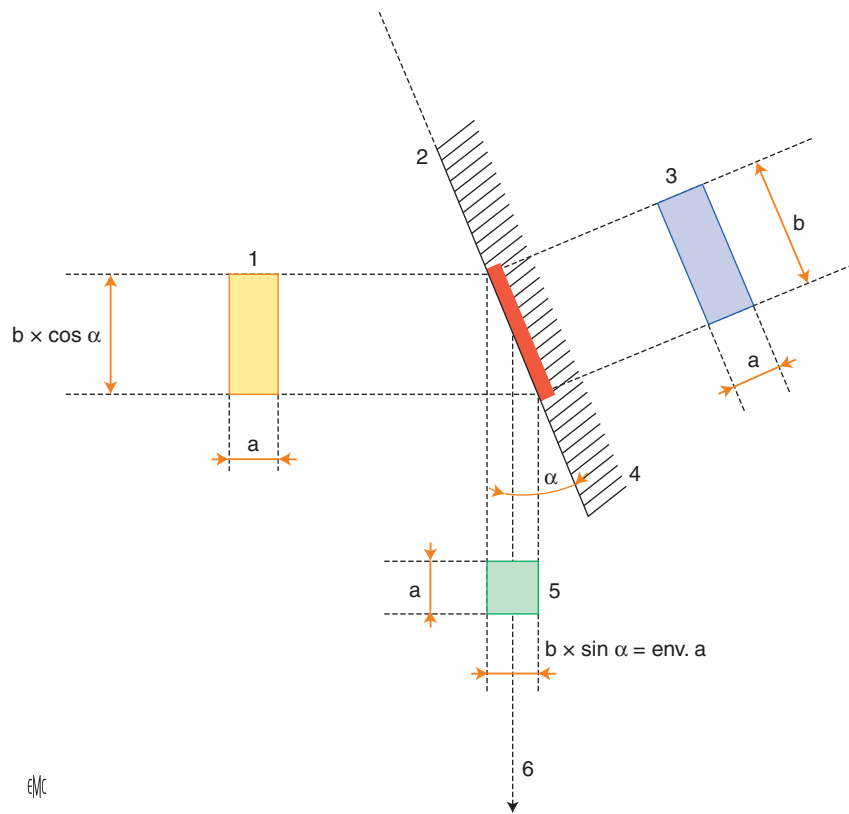


Figure 7. Principe du foyer linéaire. Le foyer thermique a pour surface la projection de la section du faisceau électronique (1) sur la piste anodique (foyer réel [3]). Sa troisième dimension est la profondeur de pénétration des électrons dans l'alliage tungstène-rhénium de la cible. Le foyer optique (5) est la projection du foyer thermique dans l'axe de sortie du faisceau (c'est-à-dire dans la direction du rayon central (6) ou rayon directeur). La taille du foyer optique est liée à la hauteur du faisceau électronique b par la relation $b \times \sin \alpha$ (α étant l'angle d'anode [4]) et $b \sim a$ (a étant le diamètre de l'hélice du filament). 2. Plan de l'anode.

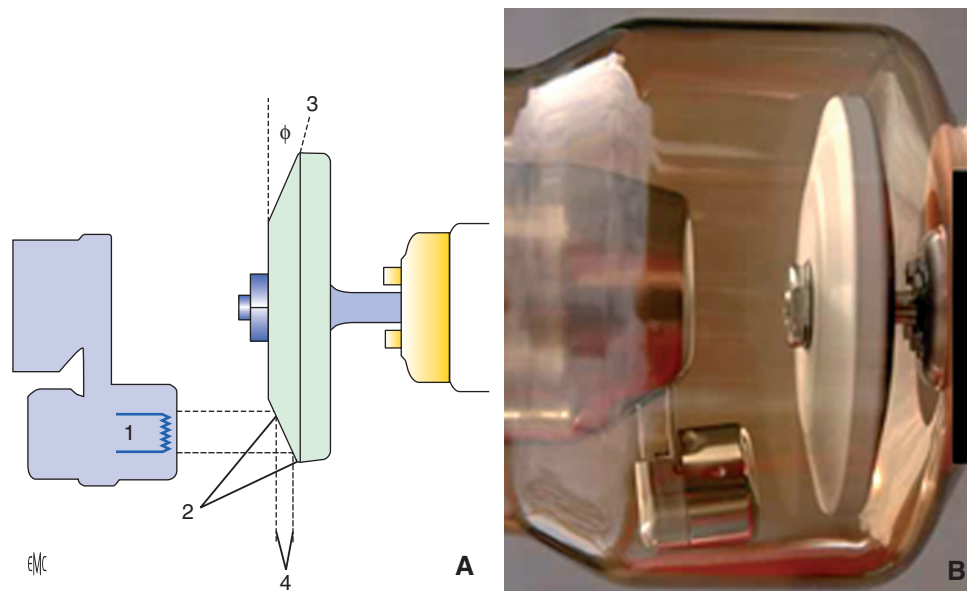


Figure 8. Principe du foyer linéaire appliqué à une anode tournante (A, B). L'anode est biseautée; l'angle du biseau (propre à chacun des foyers) détermine la taille du foyer thermique, donc la puissance de ce foyer, c'est-à-dire sa capacité à fournir des photons X par conversion d'énergie électrique dans un temps égal, par convention à 1/10^e de seconde. 1. Cathode; 2. longueur du foyer thermique; 3. angle d'anode; 4. longueur réelle du foyer optique.

Anode

On a utilisé deux types d'anode (électrode positive) dans l'évolution des tubes à rayons X : anode fixe et anode tournante.

Anodes fixes

L'anode fixe d'un tube radiogène est constituée d'une petite plaque de tungstène de 2 à 3 mm d'épaisseur, qui est sertie dans une grosse masse de cuivre. La plaque de tungstène est en forme de carré, d'un peu plus de 1 cm de côté. L'angle d'anode est généralement de 15 à 20° (Fig. 10).

Le tungstène est le métal choisi pour la cible pour plusieurs raisons. Il a un numéro atomique élevé ($Z=74$) qui le rend plus efficace pour la production des rayons X. De plus en raison de son

point de fusion très élevé, il peut supporter les élévations thermiques produites dans le tube en fonctionnement. La plupart des métaux fondent entre 300 et 1500 °C tandis que le tungstène ne fond qu'à 3370 °C. Le tungstène a une capacité d'absorption de la chaleur raisonnable et permet la dissipation rapide de la chaleur par rayonnement à partir du foyer thermique.

La plaque de tungstène, plutôt petite, doit être sertie dans une masse de cuivre plus volumineuse pour faciliter la dissipation de la chaleur par conduction. En dépit de ses bonnes caractéristiques thermiques, le tungstène ne peut pas supporter l'accumulation de chaleur due aux expositions répétées. Le cuivre est un meilleur conducteur de la chaleur que le tungstène; pour cette raison, la volumineuse masse de cuivre anodique a un rôle essentiel pour augmenter la capacité calorifique maximale de l'anode et pour accélérer sa vitesse de refroidissement.

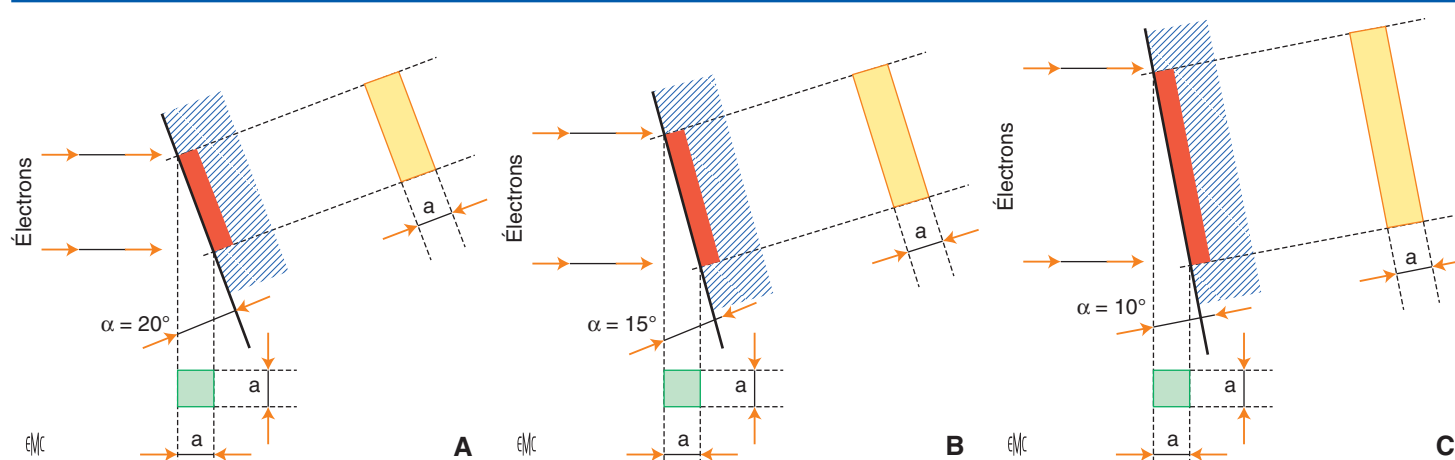


Figure 9. Relation entre l'angle d'anode, la taille du foyer thermique (puissance du foyer) et la taille du foyer optique (résolution spatiale). Un foyer optique de $1,5 \text{ mm}^2$ correspond à un foyer thermique de plus en plus étendu (et donc de plus en plus puissant, au fur et à mesure de la réduction de l'angle d'anode; la puissance double lorsqu'on passe de 20° à 10° pour l'angle d'anode. Mais avec un angle d'anode de 10° , on ne couvre plus un détecteur (film ou capteur plan) de 40 cm à une distance focale de 110 cm (distance focale habituelle sur les tables télécommandées multiusages).

A. Angle d'anode 20° ; $\sin 20^\circ = 0,34$.

B. Angle d'anode 16° ; $\sin 16^\circ = 0,26$.

C. Angle d'anode 10° ; $\sin 10^\circ = 0,17$.

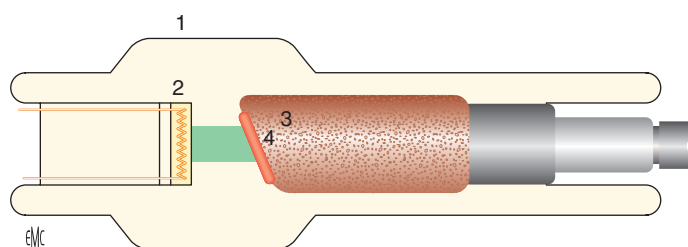


Figure 10. Schéma d'un tube radiogène à anode fixe. Le faisceau électronique calibré par la pièce de concentration frappe la cible (plaque de tungstène, bon pouvoir de rayonnement de la chaleur et point de fusion élevé: 3370°C) qui est sertie dans un gros bloc de cuivre (bon conducteur de la chaleur mais point de fusion 1070°C). 1. Enceinte (ampoule) de verre; 2. cathode (filament); 3. anode en cuivre; 4. cible en tungstène $W = 74$.

La surface de la plaque de tungstène est beaucoup plus étendue que la cible bombardée par le faisceau électronique. Ceci est nécessaire car le point de fusion du cuivre est relativement bas (1070°C). Une seule exposition pourrait élever la température de la zone bombardée de la cible de tungstène de 1000°C ou plus. Cette température est atteinte par tout métal situé dans l'environnement immédiat de la cible. Si la plaque de tungstène n'était pas suffisamment grande pour permettre un certain refroidissement autour de la cible, il se produirait une fusion du cuivre sur les bords de la plaque.

Tous les métaux se dilatent quand ils sont chauffés mais ils se dilatent de façon variable. La jonction entre la plaque de tungstène et l'anode de cuivre pose donc des problèmes puisque le tungstène et le cuivre ont les coefficients de dilatation linéaire différents. Si la soudure entre le cuivre et le tungstène n'est pas correctement faite, la pièce de tungstène peut se désolidariser du cuivre de l'anode.

NB: stricto sensu, il faudrait distinguer l'anode, pôle positif du champ électrique crée par la différence de potentiel entre elle-même et la cathode (filament), et l'anticathode, zone de métal lourd bombardée par le flux électronique

Anodes tournantes

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

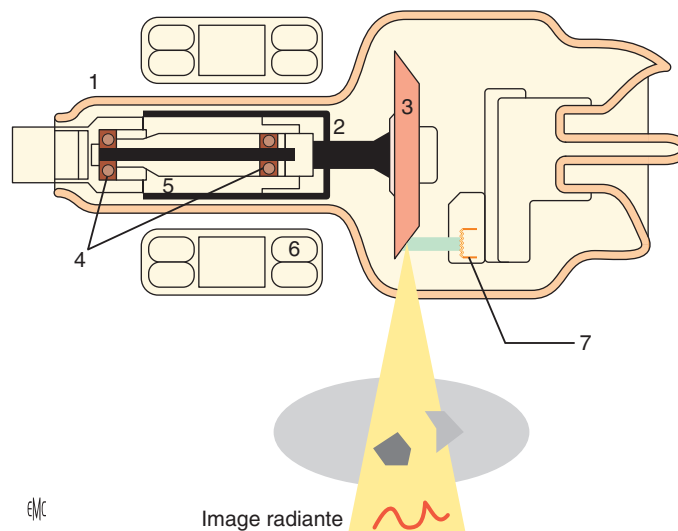


Figure 11. Schéma d'un tube radiogène à anode tournante. 1. Paroi du tube verre Pyrex®-métal (titane); 2. axe de rotation, anode en porte-à-faux; 3. anode « composite » ou céramique ou graphite; piste en alliage de tungstène+++; 4. roulements à billes ou lubrifiant métallique fluide; 5. stator; 6. rotor; 7. filament cathode.

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 . Cette vitesse de rotation est liée à la fréquence du courant alternatif et peut être plus élevée (3600 tr/min , lorsque le courant est délivré sous une fréquence de 60 Hz comme en Amérique du Nord) (Fig. 11).

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. 12). Si l'on suppose que le filament et la pièce de

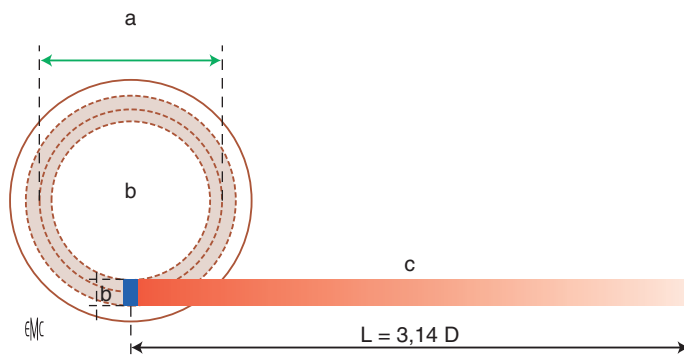


Figure 12. L'anode tournante augmente la surface du foyer thermique proportionnellement à la circonférence de la cible, donc au diamètre D (ou au rayon r) moyen de la piste bombardée (πD ou $2\pi r$). a : diamètre moyen de la piste D ; b : surface du foyer thermique S ; c : piste développée L.

concentration d'un tube à rayons X produisent un faisceau électronique calibré de 7 mm de hauteur (longueur du filament) et de 2 mm de largeur (diamètre de la spirale d'enroulement du filament), la zone bombardée par les électrons est représentée par un rectangle de 14 mm² (surface du foyer thermique). Si le biseautage est de 16,5°, la taille apparente du foyer dans l'axe du rayon directeur du faisceau de rayons X émis ou foyer optique est de $7 \times \sin 16,5^\circ = 2$ mm ; on a ainsi un foyer optique de 2×2 mm. Si l'anode était stationnaire, la charge thermique serait délivrée dans ce petit foyer de 14 mm² sur la cible. Si la cible est une anode tournante avec une vitesse de rotation de 3000 tr/min, les électrons vont bombarder une zone constamment différente de la cible. La surface totale de la zone de tungstène bombardée par le faisceau électronique est alors représentée par une bande de 7 mm de large, étendue sur toute la circonférence de la zone biseautée du disque de tungstène. La taille effective du foyer thermique va bien sûr rester la même que si l'anode était fixe. À une vitesse de 3000 tr/min, une zone donnée de la cible du disque de tungstène va se trouver soumise au flux électronique seulement une fois tous les 1/50^e de seconde et le reste du temps la chaleur engendrée pendant l'exposition peut être dissipée par rayonnement. Tous les 1/50^e de seconde, la circonférence complète de la cible a été exposée au flux électronique.

La comparaison entre la surface totale et la surface instantanée de la cible totale illustre les avantages majeurs offerts par l'anode tournante. À chaque instant une zone de 14 mm² est bombardée par le faisceau électronique dans l'exemple cité. Si on suppose que le rayon moyen de la zone bombardée du disque de tungstène est de 40 mm, ce qui représente une valeur classique, la circonférence du disque à ce rayon est de 251 mm ($c = 2\pi r = 2 \times 3,14 \times 40 = 251$). Le foyer thermique est alors représenté par le produit de la hauteur du faisceau électronique (7 mm) par le diamètre moyen du disque soit $7 \times 251 = 1757$ mm². Même si la zone totale de charge thermique a été multipliée par un facteur d'environ 125 (14 versus 1757 mm²), la taille apparente ou effective du foyer optique est demeurée la même.

Le diamètre du disque de tungstène détermine la longueur totale de la trace de la cible ; et cela affecte bien évidemment la charge thermique maximale permise sur l'anode. Les diamètres classiques des anodes sont de l'ordre de 75 à 100 ou à 125 mm, mais pour des applications particulières, on fabrique des tubes à anode de 150 et même 200 mm de diamètre, avec bien entendu la nécessité de prendre en charge les contraintes mécaniques ainsi créées.

Pour assurer la rotation de l'anode, certains problèmes mécaniques doivent en effet être résolus car l'anode est située à l'intérieur du vide du tube. L'énergie assurant la rotation de l'anode est fournie par le champ magnétique produit par un stator qui entoure le col du tube à rayons X, à l'extérieur de l'enveloppe. Le champ magnétique produit par les bobines du stator induit un courant dans les bobines de cuivre du rotor et ce courant induit fournit l'énergie pour faire tourner l'ensemble de l'anode. L'espace entre le rotor et le col du tube à rayons X doit être aussi réduit que possible pour assurer le maximum d'efficacité aux forces magné-

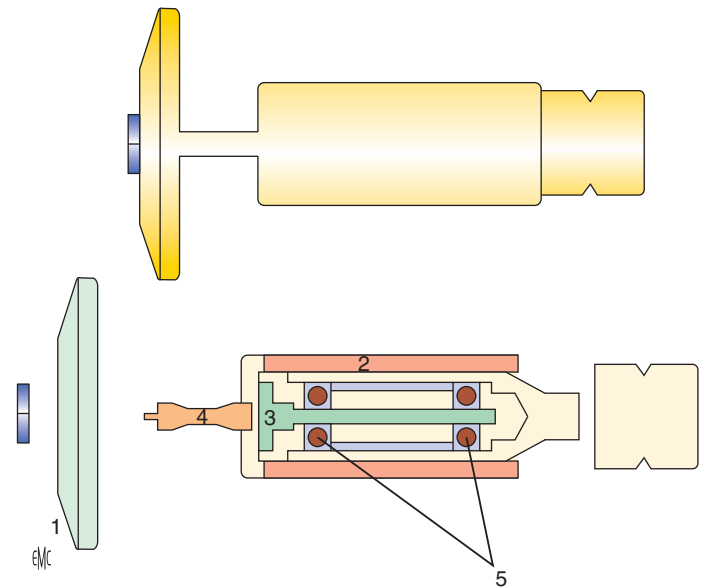


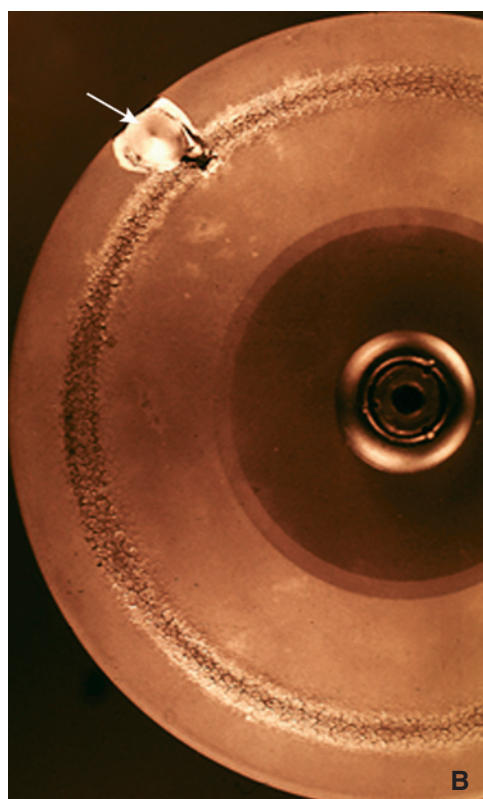
Figure 13. L'axe de rotation de l'anode ne doit pas se dilater avec la chaleur car on risquerait le grippage des systèmes de rotation. Le segment d'axe intermédiaire est en molybdène, mauvais conducteur thermique, pour isoler l'anode qui doit éliminer la chaleur produite en son sein par rayonnement. 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.

tiques délivrées par le stator. Au début du développement des tubes à anode tournante, la durée de vie du tube était courte en raison du manque de résistance des roulements à billes, sur lesquels est posé l'axe de l'anode. En raison des forces de frottement, il était nécessaire de lubrifier les roulements à billes mais les lubrifiants huileux habituels ne pouvaient pas être utilisés car ils se vaporisent dès qu'ils sont chauffés et détruisent le vide du tube ; les lubrifiants secs comme le graphite s'usent en se volatilisant sous forme de poudre qui détruit également le vide. Le problème a été résolu par l'emploi de lubrifiants métalliques fluides (en particulier l'argent) qui peuvent être utilisés dans un vide poussé. Dans les tubes à anode tournante modernes, les dispositifs permettant la rotation de l'anode sont devenus un facteur négligeable dans la durée de vie totale du tube.

La dissipation thermique dans les tubes à anode tournante représente un problème supplémentaire. La chaleur engendrée dans le disque de tungstène solide est dissipée par rayonnement à travers le vide jusqu'à la paroi du tube et ensuite dans le bain d'huile environnant le tube, à l'intérieur de la gaine. Rappelons que, dans un tube à anode fixe, la chaleur est dissipée par rayonnement et par conduction dans la masse du cuivre anodique. Dans le tube à anode tournante, l'absorption de chaleur par l'anode n'est pas souhaitée car la chaleur absorbée par les roulements à billes de l'anode pourrait les faire dilater et provoquer un grippage. Pour cette raison, la tige qui unit le disque de tungstène au reste de l'anode est constituée de molybdène. Le molybdène a un point de fusion élevé (2600 °C) et est un mauvais conducteur de la chaleur. Donc la tige de molybdène constitue une barrière thermique partielle entre le disque de tungstène et les roulements à billes de l'axe de rotation de l'anode (Fig. 13).

La longueur de la tige de tungstène est un autre point important à considérer. Lorsqu'on accroît la longueur de cette tige, l'inertie du disque de tungstène augmente (il s'agit en fait d'un problème gyroscopique plus que d'un problème d'inertie) ; cela augmente la sollicitation mécanique sur les roulements à billes. Il est donc souhaitable de garder une tige aussi courte que possible. Ce problème est réduit dans les tubes métalliques modernes par la substitution à une disposition en porte-à-faux de l'anode sur un palier unique, d'un dispositif à double palier, chacun d'entre eux supportant une extrémité d'un axe de rotation transanodique.

Même si tous les facteurs qui affectent la rotation d'un ensemble anodique relativement lourd sont contrôlés de façon optimale,

**Figure 14.**

A. Cratérisations comparées d'une cible anodique en tungstène à gauche et d'une cible anodique moins ancienne en alliage tungstène-rhénium à droite. La profondeur des fissures et les anfractuosités de la surface bombardée sont sans aucune commune mesure.

B. Fusion localisée d'une anode après « grippage » ayant bloqué la rotation. Le faisceau électronique frappant la cible immobile entraîne sa fusion localisée en quelques secondes (flèche).

l'inertie demeure un problème. En raison de cette inertie, il y a un court délai entre l'application du champ électromagnétique à l'anode et le moment auquel le rotor atteint sa vitesse de rotation angulaire maximale. Cette période varie généralement de quelques dixièmes à 1 seconde. Un circuit de sécurité est incorporé dans le circuit de production des rayons X, qui empêche qu'une exposition aux rayons X ne soit déclenchée avant que le rotor n'ait atteint sa vitesse maximale.

La durée de vie d'un tube à anode tournante peut être limitée par le dépolissage et la cratérisation de la surface de l'anode exposée au faisceau électronique (Fig. 14). Ces modifications physiques sont le résultat de stress thermiques et elles ont pour conséquence de diminuer le débit de rayons X du tube. La diminution de l'émission de rayons X résulte d'une dispersion excessive des photons (une quantité de rayonnement plus importante est dirigée en dehors des limites de la fenêtre de sortie des rayons X du tube) et de

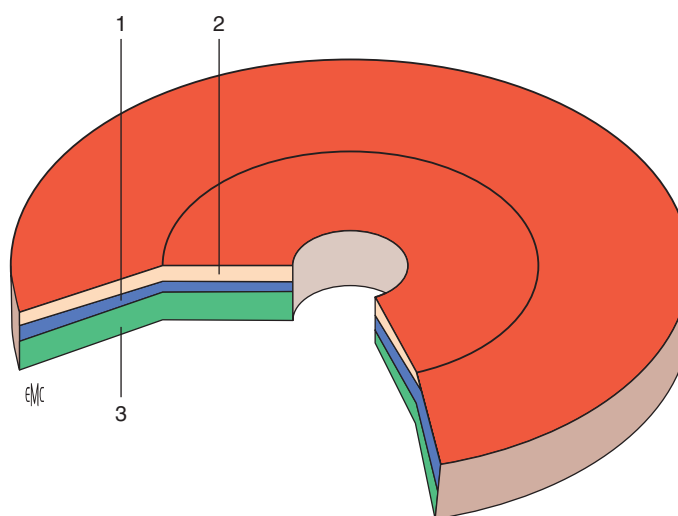


Figure 15. Disque anodique « composite » (*compound*). La cible bombardée est bien sûr toujours composée d'un alliage tungstène-rhénium. La couche sous-jacente est en tungstène, mauvais conducteur de la chaleur et point de fusion élevé. Pour limiter au maximum la masse totale de l'anode, la troisième couche utilise des métaux plus légers (molybdène ou graphite). 1. Tungstène ; 2. alliage tungstène-rhénium ; 3. alliage tungstène-zirconium-molybdène.

l'augmentation de l'absorption des photons X dans la cible elle-même. La combinaison de durées d'exposition courtes et d'une vitesse de rotation rapide entraîne des variations très rapides de chauffage et de refroidissement de la surface du disque anodique. La perte de chaleur par rayonnement à partir de la surface du disque survient car il se produit une augmentation significative de la température dans la masse du disque de tungstène. Dans ces conditions, la dilatation thermique du métal à la surface du disque est plus importante que celle du métal situé sous la surface. Cette situation entraîne des contraintes telles qu'elles provoquent une distorsion de la surface de la cible du disque anodique. On a montré qu'un alliage d'environ 90 % de tungstène et 10 % de rhénium (un métal lourd avec une bonne capacité d'absorption thermique) produit une anode plus résistante aux altérations de surface et possédant une plus importante capacité thermique qu'une anode de tungstène pur. Avec ces disques anodiques améliorés, l'érosion de la piste anodique a cessé d'être un problème majeur.

La vitesse de rotation habituelle d'un tube fonctionnant avec un courant de 50 Hz varie entre 2600 et 3000 tr/min. Si cette vitesse de rotation est augmentée, la capacité de l'anode à dissiper la chaleur s'accroît car une zone donnée de la cible est exposée au faisceau électronique durant un temps plus court à chaque tour de l'anode. En utilisant des circuits propres (tripleur de fréquence), la vitesse de rotation de l'anode peut être élevée jusqu'à 9000 tr/min, ce qui accroît d'autant les sollicitations mécaniques sur l'anode et son axe de rotation. Trois modifications du tube aident à résoudre les problèmes associés à cette vitesse de rotation accrue :

- la longueur de la tige anodique doit être réduite autant que possible pour diminuer l'inertie de l'anode ;
- le recours à un axe de rotation transanodique reposant sur deux paliers placés de part et d'autre de l'anode et aussi loin d'elle que possible ;
- et enfin l'inertie de l'anode doit être réduite en diminuant le poids de l'anode elle-même. Ceci est obtenu en utilisant un disque anodique « composite » (*compound*) dans lequel la plus grande partie du disque est faite de molybdène (poids spécifique 10,2) qui est beaucoup plus léger que le tungstène (poids spécifique 19,3). Une couche relativement mince d'alliage tungstène-rhénium est plaquée sur le disque et sert de cible réelle pour le faisceau électronique (Fig. 15). Certains disques composites utilisent du carbone (graphite) au lieu de molybdène pour réduire encore plus la masse, donc l'inertie. Le graphite ne conduit pas aussi bien la chaleur que le molybdène, donc un disque à anode en graphite va chauffer beaucoup plus qu'un disque de molybdène. Il y a aussi quelques

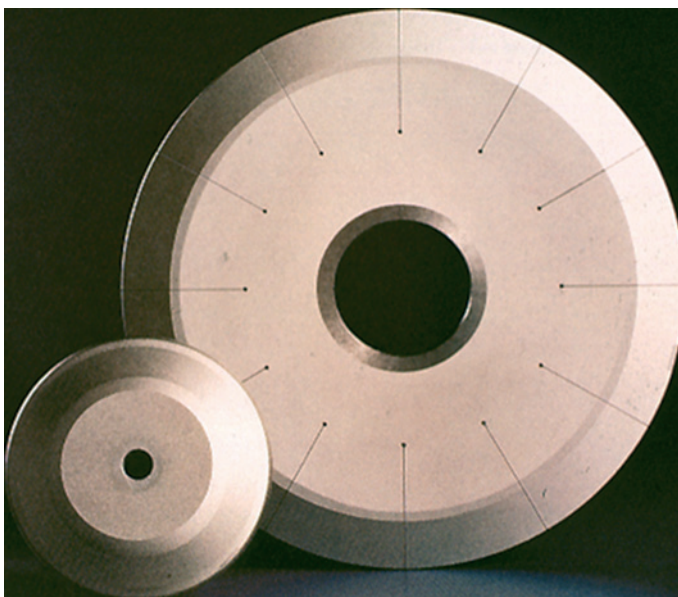


Figure 16. Disques anodiques ; petite taille : 70 à 100 mm ; arceau chirurgical, salles de radiologie conventionnelle « os-thorax » ; grande taille : 150 à 200 mm ; scanners, angiographie.

problèmes techniques associés avec le sertissage de la couche de tungstène-rhénium sur le graphite. Un disque composite avec un substrat de molybdène a un moment d'inertie d'environ 35 % moindre qu'un disque de tungstène solide de même diamètre et de même capacité calorifique. Une réduction supplémentaire d'au moins 50 % du moment d'inertie peut être obtenue quand le molybdène est remplacé par du graphite.

Certains disques anodiques sont fabriqués avec des fentes ou des sillons sur la surface de la cible. Cela permet au matériel de la zone cible de se dilater sans produire les tensions mécaniques qui sont observées dans un disque solide (Fig. 16). La face postérieure du disque anodique peut être noircie avec un « corps noir » comme le carbone, pour favoriser la dissipation thermique de l'anode par rayonnement.

Tubes à effet de grille^[4]

Les tubes à rayons X conventionnels contiennent deux électrodes (cathode et anode). Les commutations nécessaires pour déclencher et arrêter une exposition avec ces tubes doivent être capables de résister à des variations très importantes de la différence de potentiel entre les électrodes. Un tube à effet de grille renferme son propre système de commutation qui lui permet d'être très rapidement mis sous tension et hors tension, comme cela peut être souhaité dans les techniques d'imagerie dynamique à résolution temporelle élevée.

Une troisième électrode est utilisée dans le tube à grille pour contrôler le flux des électrons du filament vers la cible. Cette troisième électrode est constituée par la pièce de concentration qui entoure le filament. La pièce de concentration contribue à focaliser le flux électronique sur la cible. Comme les électrons sont chargés négativement, ils se repoussent les uns les autres lorsqu'ils se déplacent vers la cible. La conséquence est que le faisceau électronique (courant-tube) s'étale. La pièce de concentration est conformée pour contrecarrer cet élargissement du faisceau électronique.

Dans le tube à effet de grille, la pièce de concentration peut être portée à un potentiel électrique négatif par rapport au filament. La différence de potentiel entre le filament et la grille produit un champ électrique sur le trajet du faisceau électronique, qui repousse les électrons. Si cette différence de potentiel est suffisante, le courant-tube peut être complètement interrompu, situation dans laquelle aucun électron ne transite plus du filament vers la cible. La différence de potentiel appliquée entre la pièce de concentration et le filament peut donc agir comme

un interrupteur pour déclencher et interrompre le courant-tube. Comme la pièce de concentration et le filament sont proches l'un de l'autre, la différence de potentiel nécessaire pour interrompre le courant-tube n'est pas très importante. Par exemple, pour obtenir un courant pulsé avec un foyer de 0,3 mm et une différence de potentiel de 105 kV, une différence de potentiel de 1500 V entre le filament et la pièce de concentration suffit.

En agissant sur la tension de polarisation de la pièce de concentration, on peut modifier les dimensions du foyer thermique dans une assez large mesure. On peut donc, avec un seul filament, réaliser un tube à foyer variable, donc de puissance variable, susceptible de diverses applications.

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.

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. 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.

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 milliampérage 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.

Effet de talon de l'anode

L'intensité du faisceau de rayons X émis par le tube n'est pas uniforme ; elle dépend de l'angle sous lequel les rayons X sont émis à partir du foyer. Cette variation est appelée « effet de talon » de l'anode.

L'intensité du faisceau du côté de l'anode du tube est moindre que du côté de la cathode. La diminution d'intensité du faisceau de rayons X émis dans une direction pratiquement parallèle à la surface de l'angle d'anode est causée par l'absorption d'une partie des photons émis par l'anode elle-même (Fig. 17). L'intensité du faisceau par rapport à l'angle d'émission varie en fonction des caractéristiques physiques ou propres des tubes à rayons X.

Les valeurs moyennes de cet effet de talon de l'anode correspondent à une exposition relative du côté anodique de l'ordre de 73 % de l'intensité moyenne du faisceau tandis que du côté cathodique elle est de l'ordre de 105 %, pour une distance focale d'environ 100 cm. Donc il y a environ 30 % de différence d'intensité de l'exposition entre le côté anodique et le côté cathodique d'un film ou d'un détecteur numérique. Si la distance foyer-film est augmentée à 180 cm, les différences

d'intensité de l'exposition vont être nettement moindres, de l'ordre de 87 % sur le versant anodique et 104 % sur le versant cathodique.

Trois conséquences cliniques importantes de l'effet de talon de l'anode peuvent être observées :

- en premier lieu, l'intensité de l'exposition d'un film sur le côté anodique du tube est significativement moindre que celle constatée du côté cathodique. Ce facteur peut être utilisé pour obtenir une harmonisation des contrastes radiographiques de segments corporels d'épaisseurs différentes. Les régions les plus épaisses devraient être placées du côté de la cathode (filament du tube); par exemple, sur un cliché en incidence antéropostérieure du rachis dorsal, le tube doit être orienté de telle sorte que l'extrémité anodique du tube soit du côté du rachis dorsal supérieur, là où le segment corporel est moins épais, le côté cathodique du tube est alors du côté du rachis dorsal bas, là où les structures corporelles sont plus épaisses et reçoivent une exposition plus importante ;
- deuxièmement, l'effet de talon de l'anode est moins marqué lorsqu'on utilise le gros foyer d'un tube à rayons X ;
- troisièmement, pour une distance foyer-film identique, l'effet de talon est moindre pour les détecteurs de plus petit format. Ceci est dû au fait que l'intensité du faisceau de rayons X est plus homogène à proximité du rayon directeur central que dans la partie périphérique.

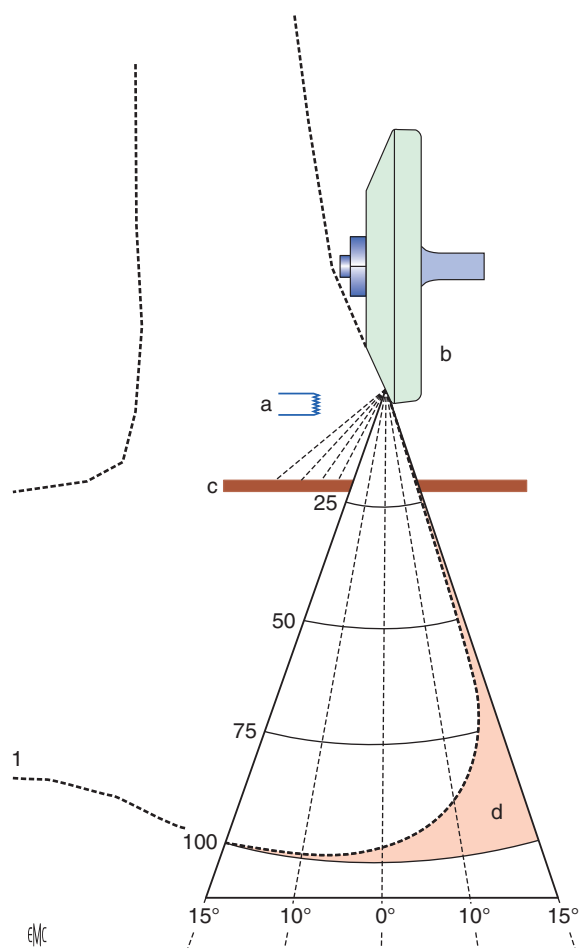


Figure 17. Effet de talon de l'anode. L'intensité du faisceau de rayons X émis est amoindrie du côté de l'anode en raison de l'absorption d'une partie des photons X émis au sein de l'anode qui leur a donné naissance. La variation d'intensité est de l'ordre de 30 % entre le côté anodique et le côté cathodique du tube. a : cathode ; b : angle d'anode 15° ; c : collimation ; d : zone d'effet de talon de l'anode. 1. Pourcentage de l'intensité du faisceau X produit par le tube.

Gaine et câbles haute tension

On pense généralement que les rayons X émis par le tube se limitent au faisceau émergeant; ils sont en fait émis avec une intensité plus ou moins équivalente dans toutes les directions à partir de la cible, constituant ce qu'on appelle le « rayonnement de fuite ». De plus les rayons X sont diffusés dans toutes les directions après les collisions avec de nombreuses structures dans et autour du tube.

Pour limiter ce rayonnement de fuite, la gaine du tube est recouverte d'une couche de plomb qui sert à absorber le rayonnement primaire et secondaire qui pourrait produire une intensité élevée du rayonnement autour du tube, ayant pour conséquence une exposition inutile des patients et du personnel en même temps qu'une perte de contraste sur les images.

L'efficacité de la gaine du tube dans la limitation du rayonnement de fuite doit obéir aux spécifications énumérées dans les réglementations idoines : « le rayonnement de fuite mesuré à une distance de 1 m à partir de la source ne doit pas dépasser 100 milliroentgen (mR) par heure avec un tube fonctionnant à son niveau maximal d'intensité de courant (mA) et de différence de potentiel (kVp) ».

Une autre fonction de la gaine du tube est d'assurer la protection électrique contre les différences de potentiel très élevées nécessaires pour produire les rayons X. Les câbles haute tension connectés au tube par l'intermédiaire de réceptacles appropriés dans la gaine du tube contiennent une torsade de fils permettant

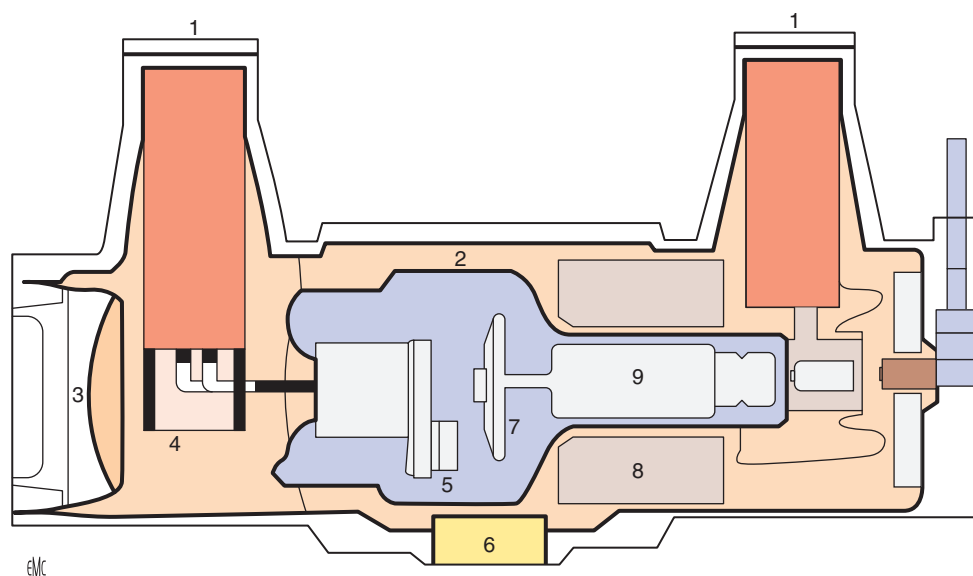


Figure 18. Schéma d'un tube à anode tournante dans sa gaine plombée. La gaine a de multiples rôles : abaisser le rayonnement de fuite au niveau réglementaire pour protéger le personnel et les patients; assurer la protection « physique » du tube (contre les chocs en particulier); contribution à l'isolement électrique; constituer l'enveloppe du bain d'huile intervenant dans l'élimination de la chaleur par convection. 1. Plots des câbles haute tension; 2. tube radiogène; 3. soufflet d'expansion du bain d'huile; 4. bain d'huile; 5. cathode, filament; 6. fenêtre de sortie des rayons X; 7. anode tournante; 8. stator; 9. rotor.

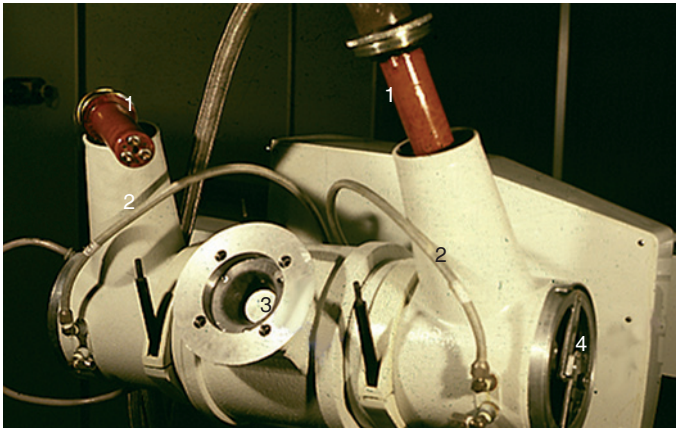


Figure 19. Tube à anode tournante dans sa gaine plombée. On retrouve les électrodes des câbles « haute tension » (1), le soufflet d'expansion du bain d'huile (4), le circuit d'eau réfrigérée intervenant dans les échanges thermiques par convection (2) et le filtre additionnel (3) disposé sur la fenêtre de sortie du faisceau pour éliminer les rayons X « mous ».

d'assurer une mise à la terre du tube. Pour prévenir les courts-circuits entre les fils de mise à la terre et le tube, l'espace qui les sépare est rempli d'huile minérale très épaisse.

Le tube à rayons X est contenu dans la gaine et l'huile est répartie autour du tube dans la gaine (Fig. 18, 19). La gaine est soigneusement purgée de tout élément gazeux résiduel car cet air résiduel pourrait se dilater de façon excessive lorsque le tube chauffe, entraînant la rupture de la gaine. L'huile a d'excellentes qualités d'isolant électrique et thermique. À cause de ses propriétés isolantes, l'huile va bien sûr se dilater dans la gaine du tube lorsque sa température s'élève. Un soufflet d'expansion va se dilater dans la gaine du tube, sans augmenter la pression dans le tube ni dans la gaine, permettant ainsi de prévenir de possibles dégâts. De plus, ce soufflet d'expansion peut être utilisé pour agir sur un contacteur qui automatiquement arrête l'exposition si la température maximale de l'huile a été atteinte.

Caractéristiques et abaques de charges des tubes à rayons X

Il est habituel de parler de la charge totale (capacité thermique maximale) d'un tube à rayons X en termes de kilovoltage (kVp), milliampérage (mA), et temps d'exposition (s). La limite de la charge d'un tube qui peut être acceptée en toute sécurité est fonction de la quantité de chaleur produite durant l'exposition. La température maximale pouvant être tolérée pour le tungstène est généralement estimée à 3000 °C. Au-dessus de ce niveau, une vaporisation importante de la cible de tungstène est observée. La quantité de chaleur produite par un courant électrique est proportionnelle au produit de la différence de potentiel (kV) et de l'intensité du courant (mA). La quantité totale de chaleur produite est donc le produit du voltage par le milliampérage du courant et par le temps d'exposition (s). Cette énergie est exprimée de façon habituelle dans deux systèmes différents :

- les unités chaleur (UC) (un système artificiel) ;
- les unités du système international (SI) (watt, seconde, joule).

Il faut comprendre les deux systèmes et leur valeur relative. Les unités chaleur disparaîtront dans le futur mais sont encore fréquemment utilisées dans les documentations des fabricants et dans la littérature.

Les UC (*heat units* [HU]) sont définies comme le produit de l'intensité du courant-tube (mA) par la différence de potentiel maximale (kVp) et par la durée d'exposition(s) avec un courant monophasé ; il s'agit donc d'une définition très artificielle et mal-encontreuse. Rappelons que dans un générateur monophasé, le kilovoltage maximal (kVp ou *peak voltage*) n'est pas le kilovoltage

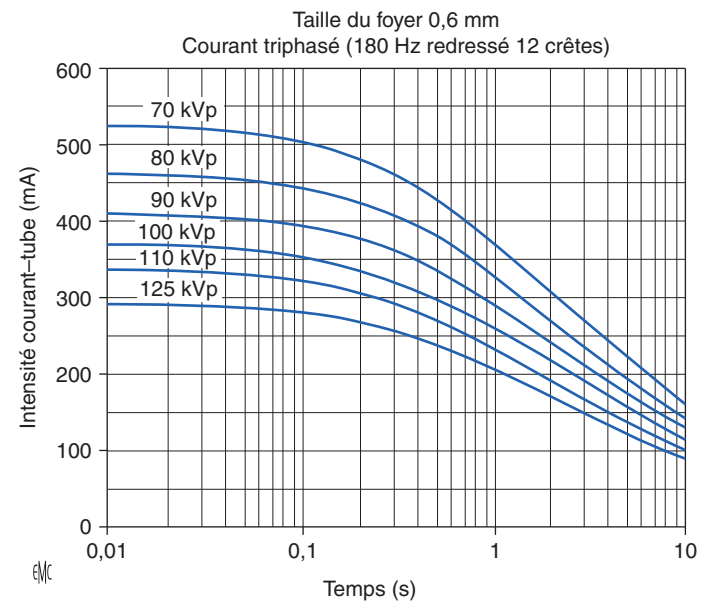


Figure 20. Abaque (ou nomogramme) de charge du petit foyer d'un tube alimenté en courant triphasé redressé 12 crêtes (ondulation ~ 6 %) ; puissance 35 kW.

moyen ; le kVp est en fait égal à 1,35 fois le kilovoltage moyen (c'est plus précisément la racine carrée moyenne du kilovoltage, que l'on peut appeler le kilovoltage moyen et que l'on peut calculer en utilisant un facteur de conversion de 1,4). Les générateurs plus récents utilisent un courant triphasé redressé et, à l'heure actuelle, le courant fourni par les générateurs de moyenne ou haute fréquence peut être considéré comme à différence de potentiel constante, pour lequel le kVp et le kilovoltage moyen sont identiques.

Le terme puissance (d'un tube à rayons X) est couramment utilisé pour exprimer la capacité du tube à effectuer une seule exposition d'une durée raisonnable. La durée d'une exposition raisonnable est définie comme égale à 0,1 seconde (ce qui correspond à une durée très longue pour un cliché radiographique et très courte pour une série angiographique ou une acquisition scanographique.) Les puissances des tubes sont, par convention, toujours exprimées pour un tube à rayons X utilisé avec un générateur à différence de potentiel constante et avec une vitesse de rotation de l'anode élevée.

Par exemple, quel est le milliampérage maximal pouvant être utilisé à 70 kVp pour une seule exposition avec un tube de 30 kW (30 000 W) ?

$$70 \text{ kVp} \times ? \text{ mA} = 30\,000 \text{ W}$$

$$? \text{ mA} = 30\,000 / 70 = 429 \text{ mA}$$

Par un calcul analogue, un tube de 150 kW peut accepter un courant tube de 2140 mA. Rappelons que ces données sont définies, par convention, pour des expositions de 0,1 seconde.

On peut utiliser un abaque de charge d'un tube à rayons X pour le calcul de la puissance permise. Sur un abaque (Fig. 20), trouvez la ligne correspondant à une durée d'exposition de 0,1 seconde, et cherchez l'endroit où elle coupe la courbe des 70 kVp. Ces deux lignes se croisent au niveau de la ligne des 500 mA, cela signifie que ce tube pourrait accepter une exposition de 70 kVp et 500 mA pendant 0,1 seconde. La puissance approximative est donc de :

$$70 \text{ kVp} \times 500 \text{ mA} = 35\,000 \text{ W} = 35 \text{ kW}$$

Un calcul analogue, sur la courbe correspondant à 100 kVp :

$$100 \text{ kVp} \times 350 \text{ mA} = 35 \text{ kW}$$

Il s'agit donc bien du foyer d'un tube de 35 kW de puissance.

Pour résumer, ce paragraphe a permis d'introduire la notion d'UC, de W/s (joule) et de charge en kW comme paramètres de mesure de la charge d'un tube à rayons X.

La quantité de chaleur (charge thermique) qui peut être tolérée par un tube radiogène sans dommages excessifs est déterminée par :

Tableau 1.
Principales caractéristiques courantes des tubes radiogènes en imagerie par projection « générale » (thorax–os).

Taille des foyers	Petit foyer 0,6 mm	Grand foyer 1–1,2 mm
Puissance des foyers	32–40 kW	72–100 kW
Capacité calorifique maximale	300 à 600 kUC	
Diamètre de l’anode	90 à 130 mm	
Angle d’anode	12 à 16°	
Kilovoltage maximal	150 kVp	

- le type de redressement du courant alimentant le tube ;
- la puissance du générateur ;
- la surface de la cible de tungstène bombardée par les électrons (taille du foyer thermique) ;
- le diamètre de l’anode ;
- la masse de l’anode ;
- l’angle d’anode ;
- la vitesse de rotation de l’anode ;
- et enfin par la durée de l’exposition.

En prenant en considération la charge thermique du tube, trois types d’usage caractéristiques sont à envisager :

- la charge thermique au cours d’une exposition unique ;
- la charge thermique au cours d’expositions multiples enchaînées rapides (comme en angiographie ou en scanographie) ;
- la charge thermique accumulée durant plusieurs heures d’utilisation intense (comme en scanographie).

La limite de sécurité pour le tube à rayons X réalisant une exposition unique peut être facilement déterminée à partir de l’abaque de charge du tube. Un exemple d’un tel abaque est donné sur la [Figure 20](#). Par exemple, si l’on détermine qu’une exposition nécessite 50 mAs (500 mA à 0,1 s) ; en se référant à l’abaque, les lignes correspondant respectivement à 500 mA et à 0,1 s se croisent sur le kilovoltage maximal de 70 kVp. De façon analogue, la charge maximale admissible pour toute combinaison des facteurs d’exposition peut être déterminée à partir de cet abaque de charge qui est donné seulement à titre d’exemple.

Les fabricants des tubes à rayons X utilisés dans toutes les installations de radiodiagnostic livrent toujours les abaques de charge pour les circonstances spécifiques dans lesquelles le tube pourrait être utilisé (par exemple courant monophasé redressé ou courant triphasé redressé).

Une des utilisations les plus importantes de l’abaque de charge thermique de l’anode est de déterminer la durée qu’il faut laisser au tube pour qu’il se refroidisse avant que des expositions complémentaires ne soient de nouveau possibles (courbe de refroidissement). Par exemple, supposons qu’une série angiographique produise 500 J par exposition, si cette série angiographique nécessite 20 expositions, l’échauffement total de l’anode est de 100 000 J ; en se reportant à l’abaque de refroidissement de l’anode du tube en question, on voit qu’il faut environ 6 minutes pour que le tube se refroidisse de 200 000 à 10 000 J. Donc si des séries angiographiques rapides sont nécessaires, il faut respecter malgré tout un délai de 6 minutes imposé par la limitation des capacités de dissipation thermique de l’anode.

Des considérations complémentaires doivent être ajoutées concernant la capacité de la gaine du tube à supporter les élévations thermiques. La gaine du tube peut absorber une énorme quantité de chaleur (1 500 000 J est une valeur courante). Mais si la gaine du tube peut absorber de grandes quantités de chaleur, il lui faut également un temps considérable pour se refroidir. En se référant aux abaques spécifiques, on voit qu’en général il faut environ 30 minutes à la gaine d’un tube à rayons X pour dissiper 600 000 J. Si un refroidissement plus rapide est nécessaire pour la gaine, l’utilisation d’un circuit de ventilation peut généralement doubler cette vitesse de refroidissement et on peut envisager des valeurs dépassant 96 000 J/min ([Tableau 1](#)).

Tubes à rayons X métal/céramique

Les tubes à rayons X à haute performance ont été introduits il y a un quart de siècle, d’abord en angiographie puis en scanographie. Ils sont composés d’une enceinte métallique au lieu de l’habituelle ampoule de verre avec trois blocs d’isolement des câbles et fils conducteurs en céramique. Deux de ces blocs assurent l’isolation pour les deux câbles haute tension (positif et négatif) et un troisième supporte la tige anodique. L’anode tourne, dans certains tubes, sur un axe qui a des paliers de support à chaque extrémité pour procurer une plus grande stabilité et réduire les contraintes mécaniques sur l’axe. Ce support additionnel permet d’employer une anode plus massive pouvant aller jusqu’à 2000 g, tandis que, dans les tubes conventionnels, elle est généralement limitée à 700 g. Les isolants de céramique sont employés pour séparer les parties du tube à rayons X, soumises à haut voltage, de l’enceinte métallique du tube. Un oxyde d’aluminium est habituellement utilisé dans les isolants en céramique. L’emploi d’isolateurs en céramique permet en outre de réaliser un tube plus compact (cf. [Fig. 6](#)).

L’emploi d’un métal comme enceinte dans le tube à rayons X offre plusieurs avantages dont les trois plus importants sont :

- moins de rayonnement extrafocal ;
- une durée de vie plus longue du tube avec des courants d’intensité élevée ;
- une capacité calorifique maximale du tube plus élevée.

L’enceinte de métal est mise à la terre ; cette mise à la terre ajoutée à l’utilisation d’isolateurs en céramique assure la sécurité électrique en dépit de la taille restreinte du tube.

Rayonnement extrafocal

Le rayonnement extrafocal est produit par un tube à rayons X lorsque des électrons accélérés à vitesse élevée interagissent avec les surfaces métalliques autres que la trace de la cible (généralement les autres parties de l’anode). La principale source d’électrons extrafocaux est représentée par les électrons rétrodiffusés à partir de l’anode. Ces électrons rétrodiffusés peuvent venir frapper l’anode une seconde fois et produire des rayons X dans une région autre que le foyer thermique.

Le rayonnement extrafocal peut être en partie contrôlé en plaçant le collimateur ou un diaphragme plombé aussi près que possible du tube à rayons X.

Le recours à une enceinte métallique diminue le rayonnement extrafocal en attirant les électrons extrafocaux vers le métal mis à la terre. Puisque l’enceinte de métal est au potentiel zéro (reliée à la terre), elle est positive par rapport aux électrons qui sont à un potentiel négatif. Les électrons extrafocaux peuvent être attirés vers l’anode ou vers la partie de l’enceinte du tube à rayons X mise à la terre, en fonction de leur éloignement de la paroi métallique ou de l’anode. Les électrons frappant le métal de la paroi métallique peuvent produire des rayons X, et le métal, de numéro atomique faible, produit plus de rayons X de faible énergie. L’enveloppe de métal diminue donc le rayonnement extrafocal en attirant de nombreux électrons extrafocaux.

Allongement de la durée de vie des tubes radiogènes et accroissement de la capacité calorifique maximale des tubes radiogènes Intensité du faisceau de rayons X

L’intensité d’un faisceau de rayons X est définie par le nombre de photons dans le faisceau multiplié par l’énergie de chaque photon. Cette intensité est habituellement exprimée en roentgen par minute (R/min ou C/kg dans le SI). L’intensité du faisceau de rayons X varie avec le kilovoltage, l’intensité du courant–tube, le matériau constituant la cible anodique et la filtration.

Matériau constituant la cible

Il détermine la quantité de rayonnement produite par un kilovoltage donné. Plus le numéro atomique des atomes de la cible est

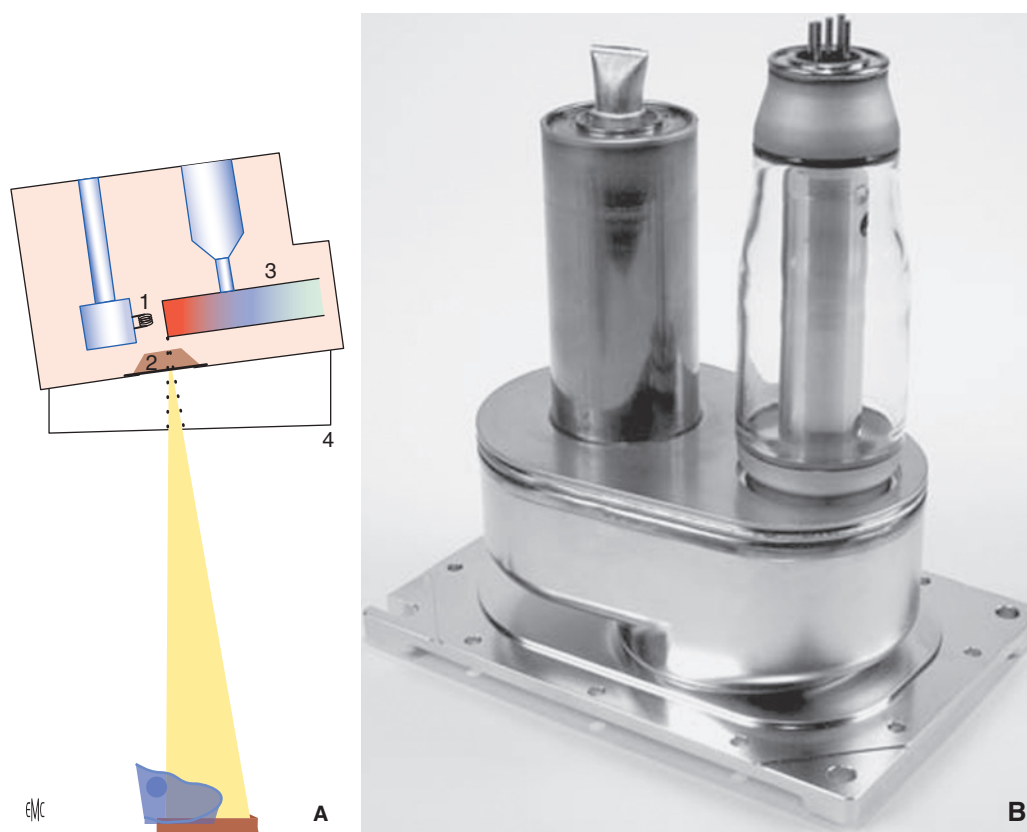


Figure 21. Exemple de tube moderne à usage spécifique pour la mammographie (A, B). Anode 70 mm; capacité calorifique maximale 97 kJ (135 kUC); deux cibles : molybdène et rhodium. Petit foyer molybdène (taille du foyer, angle d'anode, puissance) : 0,1 (6°) 2,5 kW; grand foyer molybdène : 0,3 (20°) 5,5 kW; petit foyer rhodium : 0,1 (6°) 2,0 kW; grand foyer rhodium : 0,3 (20°) 4,1 kW. 1. Filament; 2. fenêtre de sortie + filtre additionnel (molybdène ou béryllium); 3. anode rotative; 4. collimateur.

élevé plus l'efficacité de production des rayons X est élevée. Par exemple, le tungstène ($Z=74$) produirait plus de rayonnement de freinage que l'étain ($Z=50$) si tous les deux étaient utilisés comme cibles dans un tube à rayons X avec une différence de potentiel et une intensité du courant-tube identiques. On a déjà mis l'accent sur le fait que le tungstène est utilisé comme matériel pour la cible en raison de son numéro atomique relativement élevé (74) et de son point de fusion élevé (3370 °C). Le platine, avec un numéro atomique plus favorable de 78, a en revanche un point de fusion à 1770 °C et l'or stable ($Z=79$) fond à 1063 °C. Donc pour le spectre continu (photons X produits par freinage), le numéro atomique du matériel de la cible détermine en partie la quantité de rayons X produite.

La relation entre le numéro atomique et la production de raies caractéristiques est différente. Le numéro atomique du matériel de la cible détermine l'énergie ou la qualité du rayonnement X caractéristique produit. Par exemple le rayonnement caractéristique produit par la couche K du tungstène ($Z=74$) est de 57 et 69 keV, celui de l'étain ($Z=50$) est de 25 et 29 keV ; celui du plomb ($Z=80$) a des énergies de 72 et 88 keV.

Cibles de molybdène

Avec un numéro atomique élevé comme le tungstène, le faisceau de rayons X est presque entièrement constitué de rayonnement de freinage. La contribution des raies caractéristiques varie en fonction du kilovoltage du tube mais elle ne représente jamais un pourcentage important du total du faisceau.

Avec les anodes de numéro atomique plus petit, la production de rayons X par freinage est moins efficace. L'efficacité diminue également lorsque la différence de potentiel aux bornes du tube est diminuée. La combinaison d'un numéro atomique bas pour l'anode et d'un tube à voltage bas réduit la production de rayonnement par freinage à un niveau suffisamment bas pour que le rayonnement caractéristique devienne la radiation la plus importante.

Les tubes à anode en molybdène sont fabriqués pour tirer avantage de ce principe pour la radiographie du sein (et des structures minces, à faible contraste propre : pièces anatomiques, tableaux de peinture artistique). Le kilovoltage optimal pour la mammographie est d'environ 28 kVp. À cette différence de potentiel, les raies caractéristiques K alpha 17,5 keV et K bêta 19,6 keV du molybdène

constituent une partie significative du rayonnement fourni par un tube à anode en molybdène. L'emploi d'un filtre additionnel en molybdène de 0,03 mm d'épaisseur permet de supprimer le spectre de freinage et de ne conserver que le rayonnement caractéristique, pratiquement « bimonochromatique » (deux raies de 19,6 et 17,5 keV).

Dans la même optique et pour des seins plus épais et/ou plus denses, on utilise des tubes comportant, en plus de la cible en molybdène, des cibles de rhodium et de béryllium qui sont utilisées avec un filtre de béryllium de 0,63 mm d'épaisseur et une tension aux bornes de 28 à 30 kVp (Fig. 21).

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.

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.

Intensité du courant-tube

Le nombre de rayons X produits dépend évidemment du nombre d'électrons qui frappent la cible du tube à rayons X.

Tableau 2.
Principales caractéristiques courantes des tubes radiogènes en imagerie par projection à grande puissance (angiographie numérisée, coronarographie).

Taille des foyers	Petit foyer 0,3–0,6 mm	Grand foyer 0,8–1,2 mm
Puissance des foyers	15–60 kW	60–112 kW
Capacité calorifique maximale	300 kUC à 1,5 MUC	
Diamètre de l'anode	90 à 130 mm	
Angle d'anode	8 à 15°	
Kilovoltage maximal	150 kVp	

Tableau 3.
Principales caractéristiques courantes des tubes radiogènes en mammographie (anode en molybdène ou béryllium–rhodium).

Taille des foyers	Petit foyer 0,1 mm	Grand foyer 0,3 mm
Puissance des foyers	1–1,4 kW	4–6 kW
Capacité calorifique maximale	90 à 300 kUC	
Diamètre de l'anode	70 mm	
Angle d'anode	0,7 à 12°	
Plage kVp	20–50 kVp	

Le nombre d'électrons dépend directement de l'intensité du courant-tube utilisé (mA). Plus le milliampérage est élevé, plus le nombre d'électrons produits est élevé.

Filtration additionnelle des tubes radiogènes

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 la gaine.

Elle doit être adaptée à l'énergie des photons X utilisés et consiste en :

- un filtre de 2 à 3 mm d'épaisseur d'aluminium lorsque les tensions aux bornes utilisées vont de 60 à 120 kV ;
- un filtre de 0,1 à 0,2 mm de cuivre et un filtre de 2 à 3 mm d'aluminium au-dessus de 120 kV.

Il existe, en particulier sur les installations d'angiographie et de radiologie interventionnelle, des dispositifs automatiques de mises en place de ces filtres en fonction du kilovoltage utilisé mais il faut toujours vérifier que ces dispositifs sont en état de fonctionnement car, en particulier en radiologie interventionnelle, l'absence ou l'utilisation inadéquate de la filtration additionnelle peut constituer une source de lésions radiques graves (alopécie, radiodermites) (Tableaux 1 à 3).

Collimation du faisceau de rayons X [2]

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,

sous un angle de 45° (Fig. 22, 23). La lumière réfléchie par le miroir éclaire de façon précise la surface du champ irradié. Il faut bien entendu, pour obtenir ce résultat, que l'alignement de la source lumineuse et l'orientation du plan du miroir soient parfaitement contrôlés et régulièrement vérifiés.

Dans la plupart des installations modernes, la position des volets de collimation est automatiquement déterminée par le format du système de détection utilisé. Dans le cas de cassettes pour ERLM, des palpeurs mécaniques détectent la taille de la cassette et ajustent la position des volets. Le choix d'un kilovoltage optimal et l'utilisation conjointe des diaphragmes assurent la limitation du rayonnement diffusé lié à la production des rayons X. Pour une radiographie de qualité, il faut ensuite limiter la quantité de rayonnement diffusé produite par les interactions photons X–matière dans le segment corporel examiné ; à ce titre, il faut veiller à diminuer et homogénéiser l'épaisseur du segment corporel examiné par l'emploi adapté de sangles de compression, vessie pneumatique, cales, etc. (Fig. 24). C'est enfin à la grille antidiffusante que revient le rôle de diminuer au maximum la fraction de rayonnement diffusé entrant dans la création des images radiographiques pour leur conserver un contraste maximal, condition indispensable pour la visibilité des structures de petite taille de faible contraste propre.

■ Tubes radiogènes en scanographie



La plupart des techniques scanographiques courantes imposent une charge thermique élevée au tube radiogène du scanner. Une intensité du courant-tube élevée est en effet nécessaire pour fournir une quantité de photons suffisante et obtenir une résolution en contraste satisfaisante, lorsqu'on veut simultanément des vitesses de rotation rapides et l'acquisition de coupes inframillimétriques.

L'augmentation du nombre de patients en surpoids constitue une cause supplémentaire de surcharge des tubes radiogènes, si l'on veut, chez ces patients, conserver une qualité d'image acceptable, avec un niveau de bruit quantique qui ne nuise pas à la résolution en densité, pour assurer la visibilité des structures de faible contraste propre.



Les exigences croissantes en matière d'explorations multiphasiques en haute résolution de structures très mobiles comme le cœur et les coronaires nécessitent une puissance accrue des générateurs et des tubes, des temps de rotation les plus courts possible, des temps de refroidissement courts pour permettre un enchaînement rapide des examens et le plus petit foyer possible pour optimiser la résolution spatiale des images. Parmi les variantes technologiques utilisées pour améliorer la résolution spatiale dans l'axe Z, on peut citer le principe du foyer flottant qui double la quantité de mesures pour un détecteur matriciel de largeur donnée. Il n'a été adopté que par un seul constructeur.

Pour permettre une acquisition scanographique multiphasique de segments corporels étendus (scanner thoraco-abdomino-pelvien) sans surchauffe, les tubes à rayons X des scanners ont été spécifiquement développés pour disposer à la fois d'une capacité calorifique maximale de l'anode très élevée et d'une capacité de dissipation thermique de l'ensemble tube-gaine maximale.

En pratique, les deux spécifications des tubes radiogènes des scanners — capacité calorifique maximale de l'anode et capacité de dissipation thermique de l'ensemble tube-gaine — doivent être prises en considération simultanément pour définir la charge thermique maximale globale.

Capacité calorifique maximale des tubes en scanographie

Tous les perfectionnements de l'anode tournante sont bien évidemment systématiquement utilisés en scanographie :

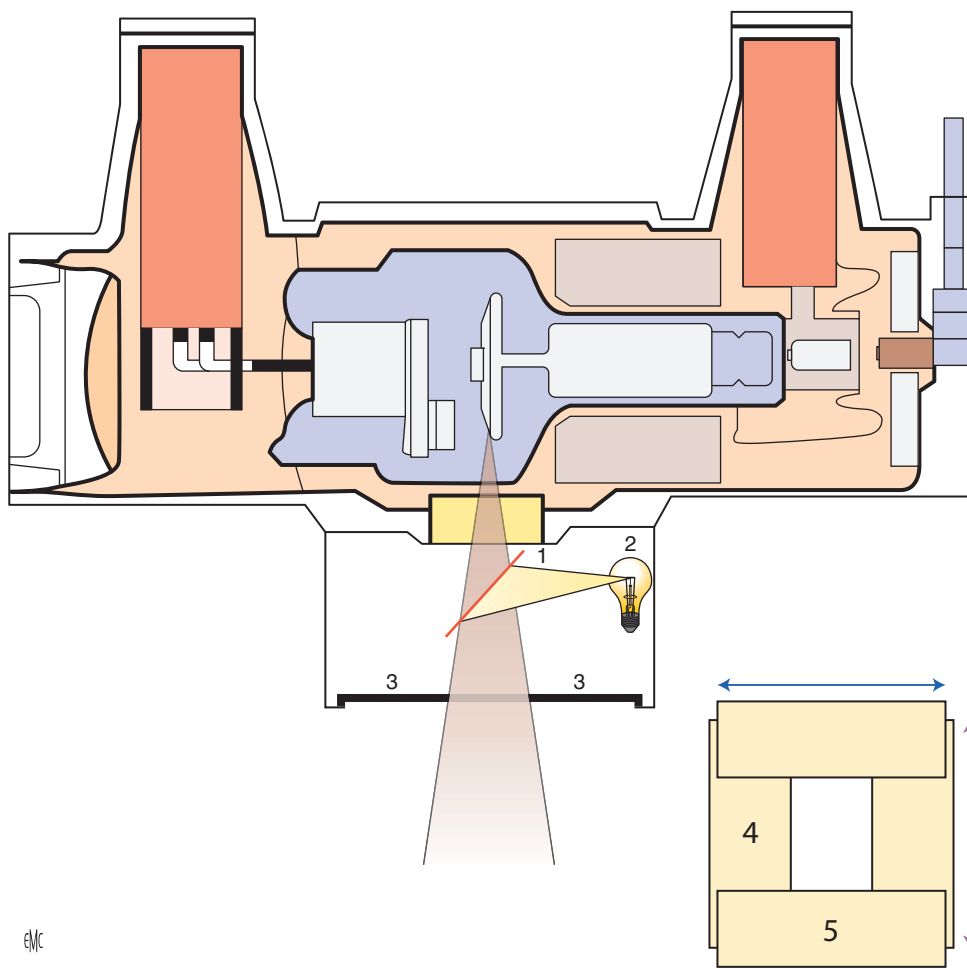


Figure 22. Diaphragmes et centreur lumineux. Les volets des diaphragmes sont disposés perpendiculairement dans deux plans différents et mobilisables simultanément deux à deux. L'ampoule du centreur lumineux est à la même distance du centre du miroir que le foyer du tube radiogène. 1. Miroir ; 2. lampe à incandescence ; 3. collimation ; 4. volets supérieurs ; 5. volets inférieurs.

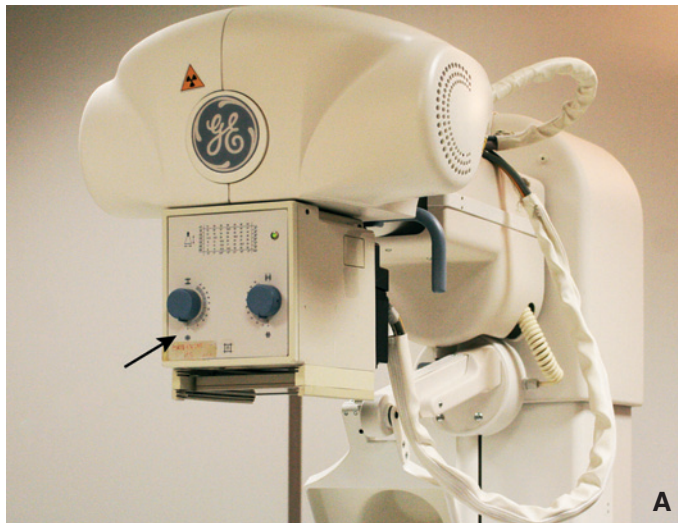


Figure 23. La mobilisation manuelle des diaphragmes s'effectue par rotation des boutons de commande (flèches). L'ensemble diaphragmes localisateurs et centreur lumineux est ancré sur la gaine du tube (tête de flèche).

A. Table télécommandée « multiusage ».

B. Sur suspension plafonnante télescopique.

- alliage tungstène-rhénium pour la partie superficielle de la cible (2 à 3/10^e mm) qui, grâce à une meilleure souplesse cristalline, assure un vieillissement moins rapide et sans microfissures ;
- augmentation du diamètre du disque de l'anode à 150 mm et plus ;
- augmentation de la masse de l'anode en utilisant :

- du molybdène (dont le poids atomique est la moitié de celui du tungstène donc qui, à masse égale, exige une quantité d'énergie double pour atteindre une température donnée),
- ou du graphite (corps noir à forte capacité de dissipation calorifique par rayonnement) ;

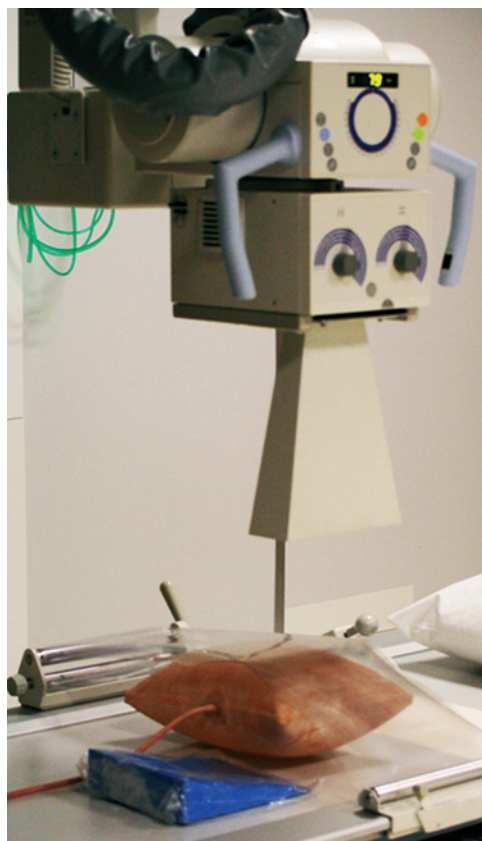


Figure 24. Pour améliorer la collimation, on ajoute un localisateur conique ou de section rectangulaire. Pour limiter et harmoniser l'épaisseur du patient, il faut comprimer l'abdomen par l'utilisation conjointe de la sangle abdominale, la vessie pneumatique et, au besoin, les cales. C'est en respectant ces règles artisanales que, même au XXI^e siècle et en imagerie numérique, on réalise des clichés corrects, c'est-à-dire lisibles.

- remplacement des roulements à billes par des emboîtements de cylindres à rainures hélicoïdales et lubrification par de l'argent métallique liquide ;
- noircissement de la face arrière de l'anode par vaporisation colloïdale de magnésie pour améliorer la diffusion de la chaleur par accroissement du pouvoir de rayonnement ;
- diminution des contraintes mécaniques liées à l'augmentation de la masse de l'anode par substitution à son porte-à-faux sur palier unique classique d'un axe métallique transanodique à deux paliers (Fig. 25).

Capacité de dissipation thermique maximale des ensembles gaine-tube-système de refroidissement en scanographie

Deux mécanismes d'élimination de la chaleur sont utilisés, qui se déroulent simultanément, mais dont les effets se produisent de façon décalée dans le temps.

La chaleur produite dans l'anode est d'abord éliminée par rayonnement vers l'huile de la gaine du tube qui est mobilisée par l'intermédiaire d'un circuit comportant un réservoir et une pompe (Fig. 26). Dans certains tubes, le circuit de l'huile est prolongé dans l'axe de rotation de l'anode pour ajouter encore de la dissipation thermique par conduction. Cette modalité de dissipation calorifique par rayonnement est la plus précoce mais elle décroît rapidement de façon exponentielle. Elle définit en partie la capacité du tube à réaliser une acquisition scanographique (ou une série angiographique) « exigeante » (à mAs élevés).

La dissipation calorifique par convection correspond au refroidissement de l'huile par un échangeur thermique à base d'air pulsé, fourni par un système de ventilation à très haut débit (l'air peut

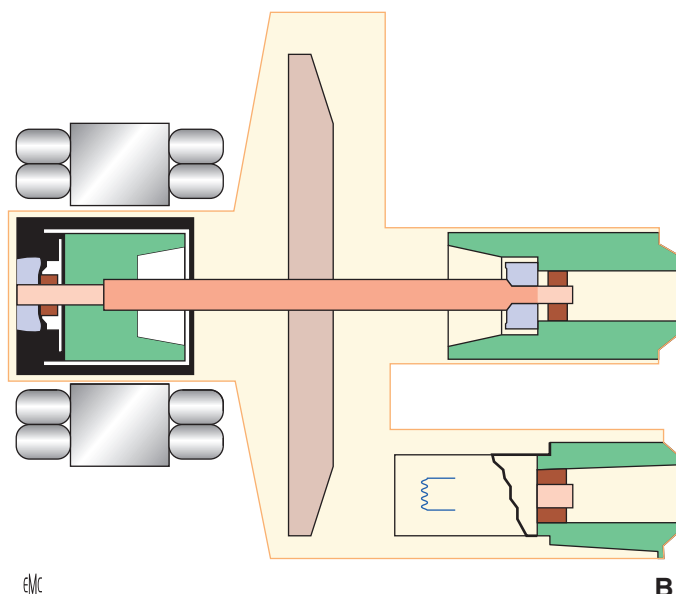
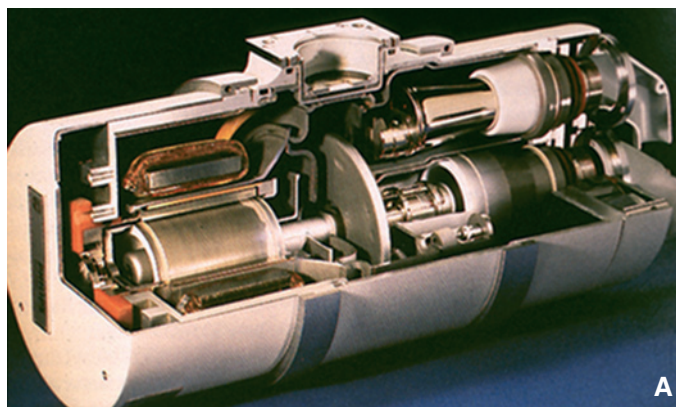


Figure 25. Tube scanographique avec axe transanodique reposant sur deux paliers placés de part et d'autre du disque (A, B). Les sollicitations mécaniques sur l'axe de rotation sont réduites et permettent d'adopter des anodes de plus grand diamètre (jusqu'à 200 mm, plus lourdes). En vert sur le schéma, les isolants en céramique pour les câbles « haute tension » et l'axe anodique.

dans certaines installations être réfrigéré grâce à un circuit d'eau glacée) (Fig. 27). La plupart des tubes utilisés en scanographie sont des tubes métal-céramique dans lesquels l'enveloppe métallique du tube facilite le refroidissement de l'huile par convection (tout en améliorant également l'efficacité du tube car l'enceinte métallique forme une cage de Faraday, mise au potentiel de la terre, qui capte les électrons qui, en s'échappant de l'anode, déposaient sur le verre de l'ampoule une charge stationnaire gênante, exposant à la survenue d'arcs électriques pouvant rompre l'ampoule).

La dissipation calorifique par convection prend une importance prépondérante au-delà de la 5^e minute suivant une charge calorifique maximale (Fig. 28). Elle caractérise la capacité de l'installation à enchaîner des examens multiphasiques « exigeants », sans imposer de délais de refroidissement du tube prohibitifs (Tableau 4).

■ Conclusion

Les rayons X sont produits par une conversion d'énergie lorsqu'un faisceau d'électrons accélérés est brutalement décéléré dans la cible d'un tube à rayons X. Un tube à rayons X est une diode à vide particulière. La cible d'un tube à rayons X est habituellement en tungstène ou en alliage de tungstène. La production

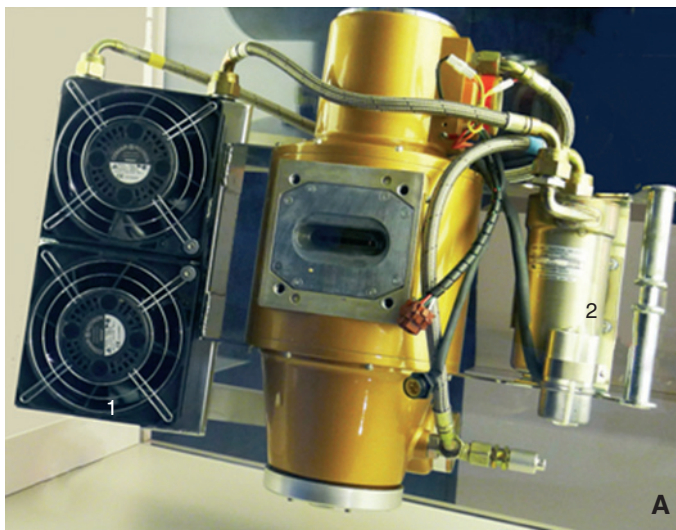


Figure 26. Tube scanographique (A, B). Refroidissement par rayonnement. La chaleur rayonnée par l'anode est transmise à travers les parois du tube au bain d'huile qui l'entoure. Le circuit d'huile comporte un réservoir (2) et une pompe qui mobilise l'huile chauffée et l'amène sous le flux gazeux à haut débit produit par les ventilateurs (1) réalisant le refroidissement par convection.

de chaleur dans un tube à rayons X est limitée au maximum par l'utilisation du principe du foyer linéaire et d'une anode tournante.

Les rayons X sont générés par deux processus différents qui entraînent d'une part la production d'un spectre continu de rayons X (freinage) et d'autre part la production d'un rayonnement caractéristique (raies). La quantité (nombre) de photons X produite est proportionnelle au numéro atomique du matériel constituant la cible (Z), au carré du kilovoltage maximal (kVp)² et au milliampérage du courant-tube (mA). La qualité (énergie moyenne) du rayonnement X produit dépend presque entièrement de la différence de potentiel aux bornes du tube (kVp).

Les principales caractéristiques d'un tube radiogène sont :

- la puissance de l'ensemble tube-générateur qui s'exprime par le produit $P \text{ (kW)} = U \text{ (kV)} \times I \text{ (mA)}$, par convention pour $t = 1/10^6$ de seconde. Cette puissance est directement conditionnée par la taille du foyer optique (qui elle-même dépend de la taille du foyer thermique et de l'angle d'anode). Le gros foyer d'un tube en radiologie conventionnelle a une taille de l'ordre de $1,5 \text{ mm}^2$ pour une puissance de 70 à 100 kW. Le petit foyer d'un tube conventionnel a une taille de l'ordre de $0,6 \text{ mm}^2$ pour une puissance de 25 à 30 kW ;

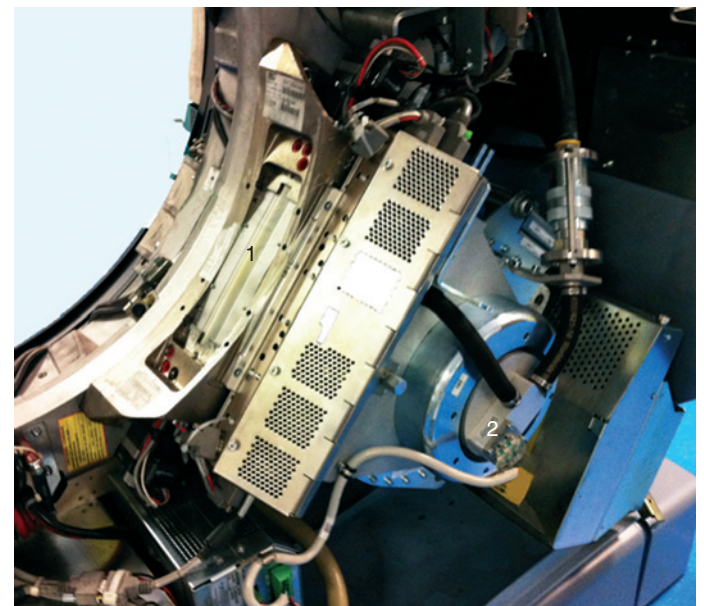


Figure 27. Tube radiogène en place sur l'anneau du scanner (2). On voit les lames plombées de la collimation primaire (1).

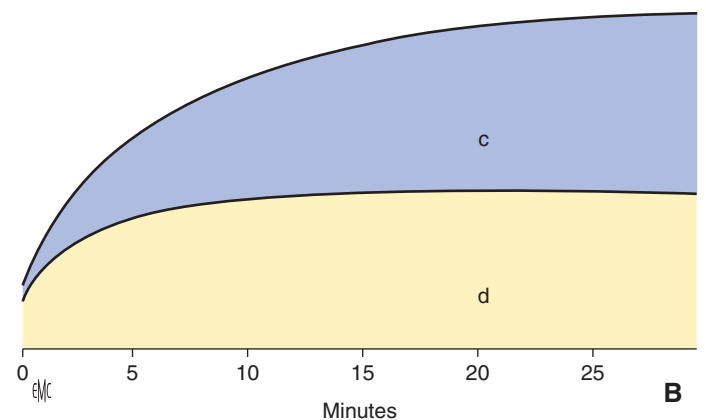
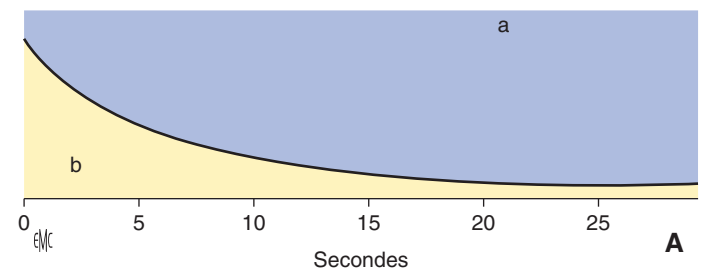


Figure 28. Chronologie des mécanismes de déperdition thermique dans un tube scanographique : la déperdition par rayonnement est très intense initialement (proportionnelle à la température atteinte par l'anode) ; elle décroît rapidement, de façon exponentielle, puis reste constante (A,B). La déperdition par convection (par l'intermédiaire d'un fluide gazeux, l'air soufflé par la ventilation) est initialement faible mais s'accroît rapidement à partir de 10 à 15 secondes et augmente avec le temps pendant plusieurs dizaines de minutes. a : déperdition précoce par convection ; b : déperdition précoce par rayonnement ; c : déperdition retardée par convection ; d : déperdition retardée par rayonnement.

- la charge thermique d'un tube s'exprime en UC et correspond au produit $UC = mA \times kW \times t$ (en secondes). La capacité calorifique maximale exprime la capacité d'un tube radiogène à permettre une acquisition de longue durée à charge élevée (série angiographique, acquisition scanographique) ;
- la capacité de dissipation thermique d'un ensemble tube-gaine s'exprime en UC/min ; elle comporte deux mécanismes qui

Tableau 4.
Principales caractéristiques courantes des tubes radiogènes sur un scanner « haut de gamme ».

Taille des foyers	Petit foyer 0,4–0,9 × 0,7 mm mm	Grand foyer 0,6–1,3 × 1,3 mm
Puissance nominale des foyers	24–30 kW	40–80 kW
Capacité calorifique maximale	2–7 MUC	
Taux maximal de refroidissement de l'anode	3,5–14 kUC/s	
Angle d'anode	7–10°	
Diamètre de l'anode	120–200 mm	
Kilovoltage maximal	140–150 kVp	

interviennent de façon simultanée, mais asynchrone. La dissipation thermique par rayonnement exprime la capacité d'un système radiogène à permettre une acquisition « exigeante », à

mAs élevés. La dissipation thermique par convection (transfert calorique entre l'huile chaude et le flux gazeux, éventuellement réfrigéré) détermine les délais de refroidissement nécessaires entre des examens imposant de fortes charges thermiques au tube.

Conflit d'intérêt : aucun.



■ **Références**

[1] Bushberg JT, Seibert JA, Leidholt EM, Boone JM. *The essential physics of medical imaging*. Baltimore: Williams and Wilkins; 1994, p. 65–83.

[2] Curry TS, Dowdey JE, Murry RC. *Christenssens's physics of diagnostic radiology*. Philadelphia: Lea and Febiger; 1990, p. 10–35.

[3] Dillenseger JP, Moerschel E. *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie*. Paris: Elsevier-Masson; 2009, p. 7–16.

[4] Schmidt R. Tube à rayons X. *EMC* (Elsevier Masson SAS, Paris), Radiologie et imagerie médicale: principes et techniques – Radioprotection - Imagerie radiologique conventionnelle : production de l'image radiologique, 35-050-A-90, 1990.

D. Régent (d.regent@chu-nancy.fr).
D. Mandry.
V. Croise-Laurent.
A. Oliver.
F. Jausset.
V. Lombard.
Service de radiologie, Hôpitaux de Brabois, Centre hospitalier universitaire de Nancy, rue du Morvan, 54511 Vandœuvre-Lès-Nancy, France.

Toute référence à cet article doit porter la mention : Régent D, Mandry D, Croise-Laurent V, Oliver A, Jausset F, Lombard V. Production des rayons X en imagerie par projection et en scanographie. *EMC - Radiologie et imagerie médicale - principes et technique - radioprotection* 2013;8(1):1-20 [Article 35-050-A-10].

Disponibles sur www.em-consulte.com

 Arbres décisionnels

 Iconographies supplémentaires

 Vidéos/ Animations

 Documents légaux

 Information au patient

 Informations supplémentaires

 Auto-évaluations

 Cas clinique

Cet article comporte également le contenu multimédia suivant, accessible en ligne sur em-consulte.com et em-premium.com :

1 autoévaluation

[Cliquez ici](#)

1 iconographie supplémentaire

Iconosup 29

Schéma général d'un tube radiogène scanographique dans sa gaine. Tube à enceinte métallique, anode de grand diamètre et de grande épaisseur, disposition classique de l'anode, en porte à faux à l'extrémité de son axe de rotation tournant sur un palier unique. 1. Bornes haute tension ; 2. stator ; 3. roulements à billes ; 4. rotor ; 5. anode à haute capacité calorifique 6,3 MUC ; 6. enceinte métal-céramique ; 7. gaine.

[Cliquez ici](#)

[Cliquez ici pour télécharger le PDF des iconographies supplémentaires](#)

5 informations supplémentaires

Infosup 1

[Cliquez ici](#)

Infosup 2

Unité chaleur.

[Cliquez ici](#)

Infosup 3

Charge thermique du tube en angiographie.

[Cliquez ici](#)

Infosup 4

Allongement de la durée de vie des tubes radiogènes et accroissement de la capacité calorifique maximale des tubes radiogènes.

[Cliquez ici](#)

Infosup 5

Principe du foyer flottant.

[Cliquez ici](#)