La radiographie (II). Qu'est-ce qu'un rayon X ? Comment en produire ? Quel mécanisme permet d'obtenir une radiographie ?

Publié le 01.11.07 | Par Catherine Simand-Vernin

Lors de la propagation à travers un milieu matériel, les rayons X peuvent être déviés par les atomes du milieu (diffusion) ou bien absorbés. C'est ce dernier phénomène qui est mis en jeu dans les applications médicales de la radiographie.

1. Les rayonnements électromagnétiques

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

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

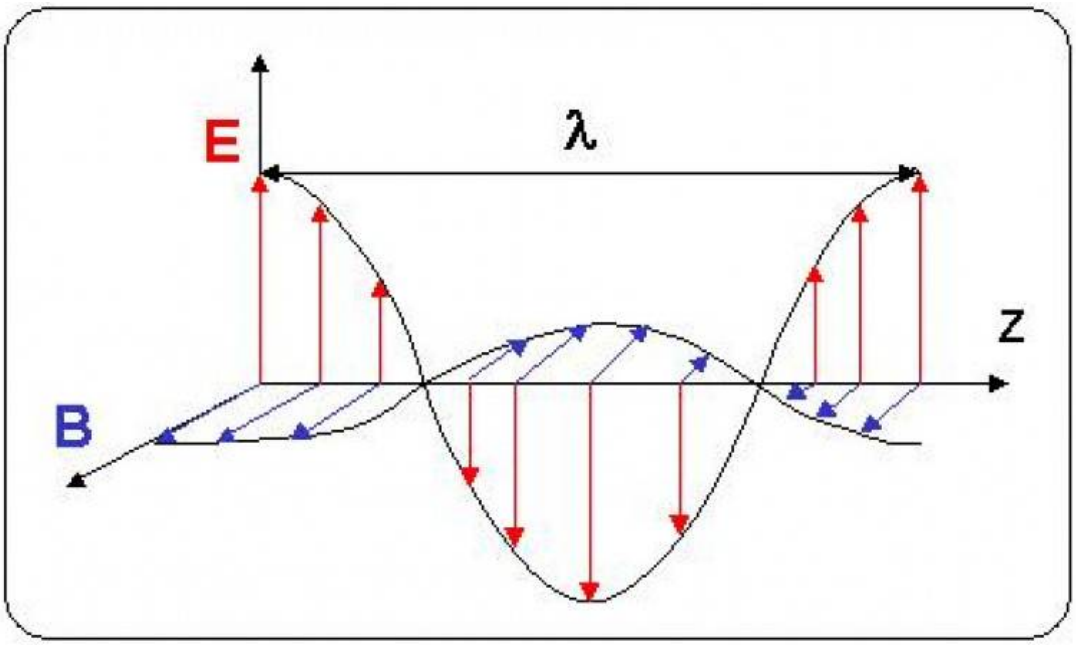


Figure 1 - Onde électromagnétique. Structure à un instant donné des champs électriques et magnétiques, E et B, de l'onde se propageant dans la direction z.

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

Le modèle corpusculaire du rayonnement électromagnétique est mieux adapté aux rayonnements de hautes fréquences : on

considère qu'un faisceau est constitué de photons, des particules sans masse qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Chaque photon transporte une quantité d'énergie E proportionnelle à la fréquence de l'onde E = hν, où h est la constante de Planck[1].

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

On appelle rayons X les ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre 10^{16} Hz et 10^{20} Hz. Les longueurs d'ondes sont de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-12} m, et les énergies des photons X sont comprises entre 40 et 4.10^{5} eV (1 eV correspond à $1{,}6.10^{-19}$ J, c'est l'énergie d'un photon dans l'infra-rouge). Ces énergies sont de l'ordre de grandeur des énergies de liaison des électrons des couches internes des atomes (de l'ordre du keV). Le domaine des rayons X se situe entre l'ultra-violet et les rayons gamma **[1]**.

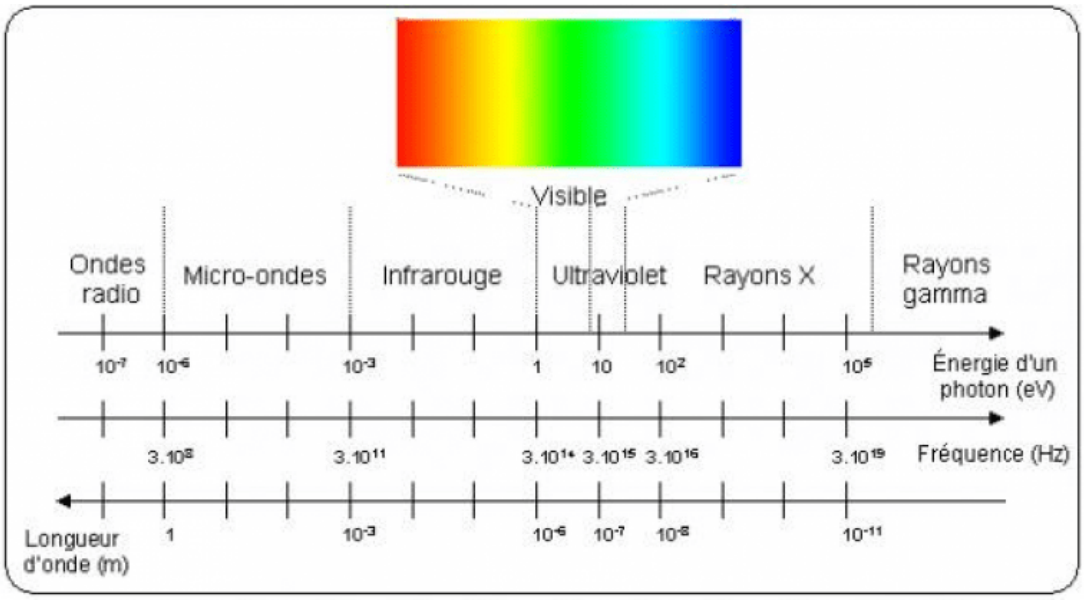


Figure 2 - Spectre électromagnétique

2. Production de rayons X

Les rayons X sont produits dans des tubes à rayons X également appelés tubes de Coolidge[2] ou tubes à cathode chaude (Figure 3). Le principe est le suivant : des électrons émis par une cathode (un filament, le plus souvent en tungstène, chauffé par le passage d'un courant électrique) sont accélérés par une différence de potentiel élevée (de 10 à 150 kV) en direction d'une cible constituée d'une anode en métal (en tungstène également) **[2]**. Les rayons X sont émis par la cible selon deux mécanismes :

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

Une faible portion, 1 % environ de l'énergie cinétique cédée par les électrons est rayonnée sous forme de rayons X, les 99 % restants sont convertis en énergie thermique.

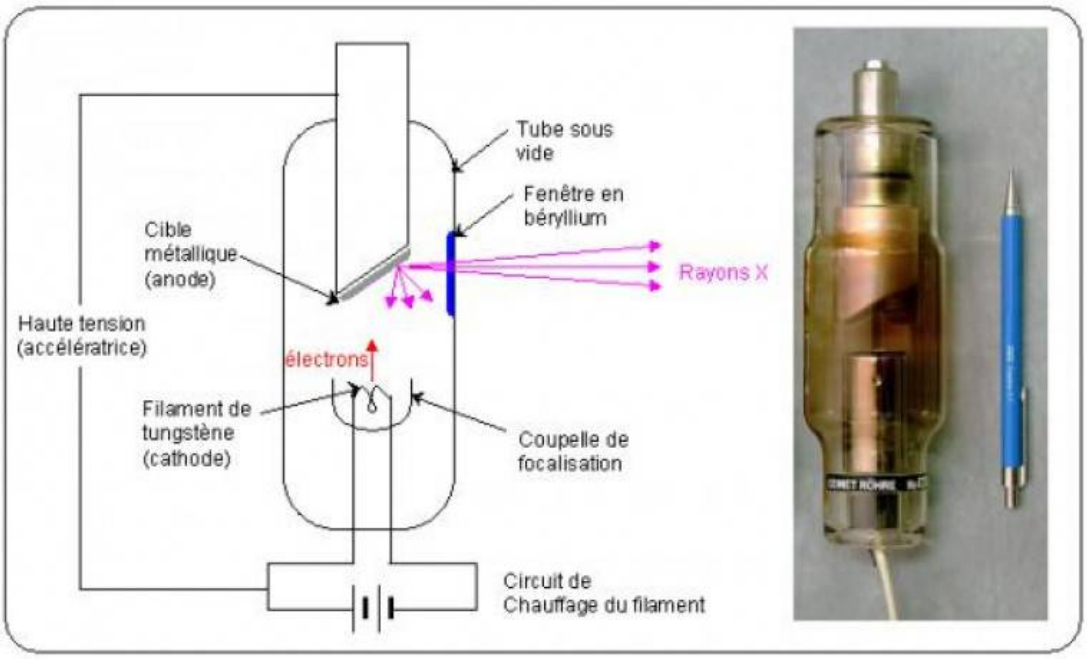


Figure 3 - Tubes à rayons X.

Auteur(s)/Autrice(s) : Photographie : H. Umland – Licence : Reproduit avec autorisation

3. Interaction des rayons X avec la matière

Lors de la propagation à travers un milieu matériel, les rayons X peuvent être déviés par les atomes du milieu (diffusion) ou bien absorbés. C'est ce dernier phénomène qui est mis en jeu dans les applications médicales de la radiographie.

Dans la représentation corpusculaire, un photon entre en collision avec les électrons liés aux atomes du milieu matériel traversé (électrons des couches internes). Si l'énergie E du photon incident est suffisante (supérieure à l'énergie de liaison W de l'électron), il peut arracher un électron du cortège atomique. Cet électron, appelé « photo-électron », est éjecté avec l'énergie cinétique E_{cin} = E - W. Les photo-électrons transfèrent ensuite leur énergie cinétique au milieu en provoquant des ionisations le long de leurs trajectoires[3].

L'absorption d'un rayonnement X par un milieu dépend fortement de la nature des atomes : pour une fréquence donnée, on constate que l'absorption est d'autant plus probable que le nombre atomique Z des atomes du matériau traversé est élevé. On constate également qu'un rayonnement de grande énergie (courte longueur d'onde) sera moins absorbé, donc plus pénétrant qu'un rayonnement de plus faible énergie. Les rayons X les plus pénétrants sont appelés rayons « durs » (longueurs d'ondes inférieures au nanomètre).

Considérons un faisceau unidirectionnel de rayons X traversant un écran matériel. L'intensité I(x) du rayonnement décroît exponentiellement en fonction de l'épaisseur x de matière traversée : $I(x) = I_0 \exp(-mx)$ où m est le coefficient d'atténuation linéaire (Figure 4). Le coefficient d'atténuation m croît en fonction du numéro atomique Z des atomes du matériau, et décroît en fonction de l'énergie des photons X[4].

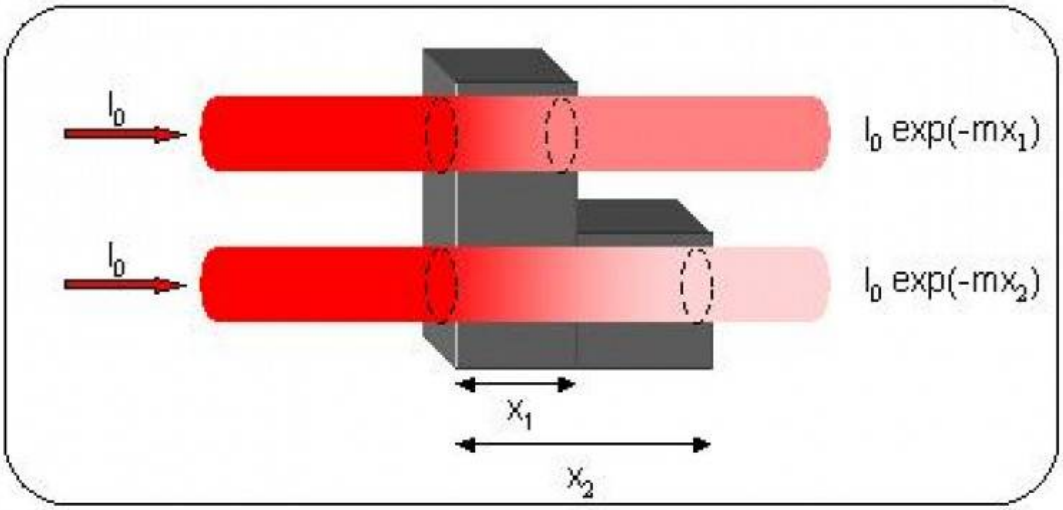


Figure 4 - Absorption des rayons X par la matière. L'intensité I du rayonnement décroît exponentiellement en fonction de l'épaisseur x de matière traversée.

4. Application à l'imagerie médicale

Le principe est celui des ombres chinoises. Le faisceau de rayons X produit par un tube à rayons X est émis en direction de la zone du corps humain à examiner, son intensité est « modulée » par l'absorption différentielle des organes traversés. L'image est recueillie en sortie sur un détecteur (plaque photographique par exemple).

Le coefficient d'atténuation m dépend de la composition chimique des tissus traversés. Il est élevé pour l'os, moyen pour les tissus mous et faible pour la graisse. Les os contiennent en effet des sels minéraux (phosphore, calcium, magnésium) qui sont des éléments de numéro atomique plus élevés que les constituants principaux des tissus mous (oxygène, carbone, hydrogène, azote...). Ils absorbent donc plus les rayons X.

La radiologie conventionnelle ne détecte que des contrastes supérieurs à 4 %, ce qui est le cas naturellement pour les os ou les poumons. Lorsque le contraste est insuffisant, on utilise des produits contrastants, par exemple l'iode ou le sulfate de baryum $BaSO_4$ (« bouillie barytée » lors d'un examen du tube digestif).

5. Bibliographie et ressources en ligne

[1] Lien vers une description des domaines du spectre électromagnétique dans le cadre des observations astrophysiques en ligne sur le site de l'Observatoire de Paris

[2] D. A. Skoog, F. J. Holler, T. A. Nieman, « Principes d'analyse instrumentale », 2003, De Boeck.

CRÉDITS

AUTEUR(S)/AUTRICE(S)

Catherine Simand-Vernin

Professeure agrégée, ancienne responsable du site ENS-DGESCO CultureSciences-Physique

RELECTURE SCIENTIFIQUE

Marie-Christine Artru

Ancienne responsable scientifique du site CultureSciences-Physique

MISE EN LIGNE

Hagop Demirdjian

Docteur en chimie théorique, ancien élève de l'École Normale Supérieure Lyon, responsable éditorial du site CultureSciences-Chimie de 2004 à 2008.

NOTES

1. Le modèle corpusculaire de la lumière complète le modèle ondulatoire. Il a été introduit par Planck et Einstein pour interpréter le rayonnement du corps noir et l'effet photoélectrique (1900 et 1906). La dualité onde-corpuscule a été ensuite généralisée à l'ensemble des particules par de Broglie (1923) et constitue un des fondements de la mécanique quantique.

2. William David Coolidge, physicien américain, invente le tube qui porte son nom en 1913. L'innovation principale est l'utilisation du tungstène pour le filament, les tubes permettent des progrès majeurs en radiologie. Les tubes actuels sont des améliorations du modèle original de Coolidge.

3. Ce phénomène d'ionisation dû aux rayons X est à l'origine de beaucoup de leurs effets, en particulier biologiques. Ces ionisations déclenchent une succession de réactions physico-chimiques pouvant aboutir à une modification des fonctions et des structures cellulaires. Ce sont donc les photo-électrons qui, par les dommages qu'ils créent dans les tissus vivants, sont la cause des lésions provoquées par les rayons X (cf. Radiographie III. « Problèmes liés à l'irradiation aux rayons X »).

4. L'intensité du faisceau I(x) mesure l'énergie du rayonnement ou le nombre de photons traversant par unité de temps l'unité de surface normale au faisceau, à la position x.