

LA RADIOGRAPHIE INDUSTRIELLE

I- INTRODUCTION GENERALE

La radiographie industrielle, qui est l'obtention d'une image en utilisant une radiation de forte énergie, est utilisée pour détecter en volume les défauts d'un matériau.

Ce cours se propose donc de donner le principe de base du contrôle par radiographie, ainsi que son but et son domaine d'application, de faire connaissance du matériels utilisé, de donner les notions sur la nature des rayonnements utilisés, leur production, leur détection et leur lois de propagation ainsi que leurs propriétés essentielles notamment le phénomène d'**absorption**.

Deux types de radiation sont utilisés :

Les rayons X générés par un tube à rayons X par interaction d'un faisceau d'électrons accélérés sur une cible métallique.

Les rayons gamma générés par des éléments radioactifs (isotopes) renfermés dans une cellule hermétique. Les isotopes les plus fréquemment utilisés sont le cobalt-60, le césium-137 et l'iridium-192.

Ces radiations électromagnétiques (ou corpusculaires) ont les propriétés suivantes :

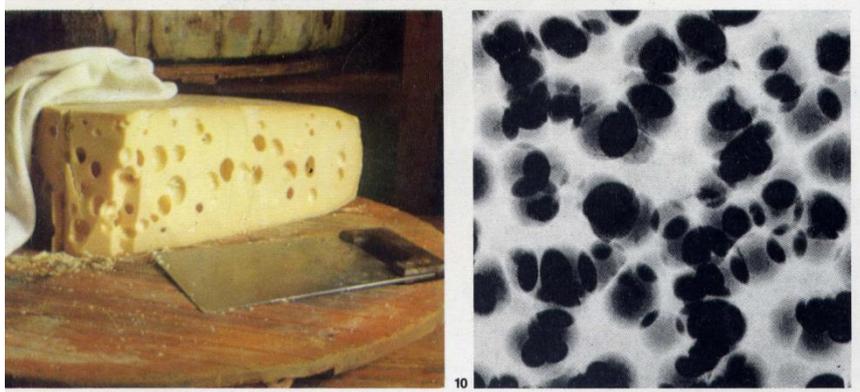
- Ils sont invisibles
- Ils sont de faible longueur d'onde, donc de forte énergie
- Ils sont ionisants
- Ils traversent la matière, propriété utilisée en radiographie.

Le principe de la radiographie repose sur le fait que ces radiations quand ils traversent la matière voient leur intensité relativement atténués selon la nature et l'épaisseur du matériau (**l'absorption**). Cette absorption différentielle est convertie en une image sur un support qui peut être un film photographique, ou un écran fluorescent ou une caméra. Cette dernière permet d'assurer une vision directe sur un écran de télévision et réaliser un enregistrement numérique. La radiographie numérique présente l'avantage d'optimiser la gestion des données (archivage numérique des images, transmission des résultats en temps réel, réduction du temps d'exposition) de plus elle est non polluante , zéro film, zéro bain de développement.

Le contrôle radiographique par rayon X ou gamma ne se limite pas uniquement aux constructions soudées mais s'applique à toute sorte de matériaux de nature différente papier, matière plastique, matériaux métalliques, etc. Il concerne également, les ouvrages d'art, les contrôles d'entretien notamment sur les chaudières, les hauts fourneaux, cubilots, les cellules et les ailes d'avion, le contrôle d'objets très divers : pneus, pièces de fonderie ou en matériaux composites,

Le principe de la radiographie est similaire à la prise de photos. D'un côté de la pièce, on fixe un film et, de l'autre côté, on place une source radioactive ou un tube à rayons X. Un défaut ou une irrégularité dans la pièce va plus ou moins absorber le rayonnement que ses environs d'où le contraste.

Le défaut quelque soit sa nature se traduit par un contour sombre, ligne droite ou courbe pour une fissure, une tache dans le cas d'une inclusion ou soufflure etc.



Les trous noirs montrent les cavités dans un morceau de gruyer



Défaut de fonderie- Discontinuité de matière en volume

LES RAYONS X

I - GENERALITES

Les rayons X ont été découverts de façon fortuite le 08 novembre 1895 par le physicien allemand Wilhelm Conrad Röntgen. C'était un rayonnement qui a des propriétés totalement différentes de celles de la lumière visible. Sa nature mystérieuse, ondes ou matière, lui a valu à cette époque l'appellation de Rayon X. La série d'expériences menées de manière rigoureuses par W.C.Röntgen montrèrent que ce rayonnement invisible, ne peut être ni réfléchi, ni dévié par un champ magnétique à l'inverse des rayons cathodiques. Il a, par contre, la propriété de se propager en ligne droite, d'ioniser l'air, de traverser les objets opaques, le bois, et surtout le corps humain.

C'est cette dernière propriété qui frappa le plus les esprits de l'époque et les rayons X avaient été immédiatement exploités en médecine car ils rendaient visible, pour la première fois, l'intérieur du corps humain. D'ailleurs, la première radiographie obtenue est celle de la main de Bertha, femme de Roentgen. En effet, les rayons x traversent assez facilement les tissus biologiques, mais sont absorbés différemment par les os et les dents, qui apparaissent avec un contraste différent sur les radiographies.

Dans l'environnement de Max Von Laue, à Munich, en 1912, la question relative à leur nature était alors débattue. Il pensa que les rayons X, s'ils étaient des ondes, devraient être diffractés par les cristaux. En effet, la confirmation de cette hypothèse est venue par ses collègues W. Friedrich et P Knipping. Les expériences qui ont été menées leurs ont permis d'obtenir effectivement la première figure de diffraction des rayons X de l'histoire en faisant traverser un cristal de blende (sulfure de zinc) par un faisceau de rayons X. Cette expérience et son interprétation démontrèrent simultanément que les rayons X se comportent comme des ondes et que les atomes sont périodiquement organisés au sein des cristaux. Ce fut alors la découverte de la **diffraction X**, qui a valu le prix Nobel, en 1914, à Max Von Laue.

2 - NATURE DES RAYONS X

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques transversales de même nature que la lumière visible, mais différentes de celle-ci, par leur longueur

d'onde qui est de 10^3 à 10^4 fois plus courte, se situant dans l'intervalle $0,1 \text{ \AA} - 10 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) (figure1).

Les deux propriétés essentielles qui sont, la **diffraction** (interférence des ondes diffusées) et l'**effet photoélectrique** (ionisation de la matière) montrent que l'énergie radiante des rayons X revêt un double caractère, ondulatoire et corpusculaire.

2-1 l'aspect ondulatoire : la radiation peut être considérée comme une propagation d'ondes électromagnétiques caractérisées par la longueur d'onde $\lambda = C.T$ en Angström (\AA) et la fréquence de radiation $\nu = 1/T = C/\lambda$ en Hertz (Hz).

2-2 l'aspect corpusculaire : la radiation peut être considérée comme un ensemble de photons se propageant à la vitesse de la lumière C ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), possédant une énergie E égale à $h \nu = h c / \lambda$, exprimée en Joule (J) ou très souvent en **électronvolt** (eV). Un électronvolt est l'énergie acquise par un électron accéléré sous une tension de 01 volt. ($1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. et h , constante de Planck $= 6,6236 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$)

Le rayonnement peut être caractérisé indifféremment par une ou plusieurs grandeurs physiques à savoir : sa longueur d'onde λ (\AA), sa fréquence ν (HZ), son énergie E en (Joule) ou (eV) ou son intensité I (énergie traversant l'unité d'angle solide par unité de temps) exprimée en Watts par stéradian ou de façon plus pratique par le taux de comptage du détecteur de rayonnement évalué en nombre de coups.

L'interaction des rayons x avec la matière a des propriétés particulières qui sont à l'origine de toutes les applications pratiques qui en découlent. Ces propriétés sont : la diffraction, la fluorescence, et l'**absorption**. Cette dernière étant la conséquence des différents phénomènes d'interaction Rayonnement X - Matière.

3- La traversée de la matière diminue son intensité d'où le phénomène d'**absorption**. Les applications médicales et industrielles basées sur ce phénomène sont multiples et variées comme par exemple le contrôle de soudure, la radiographie médicale, le Scanner, la mesure d'épaisseur, la détection des défauts internes dans une structure, l'automatisation de mécanismes industriels etc.

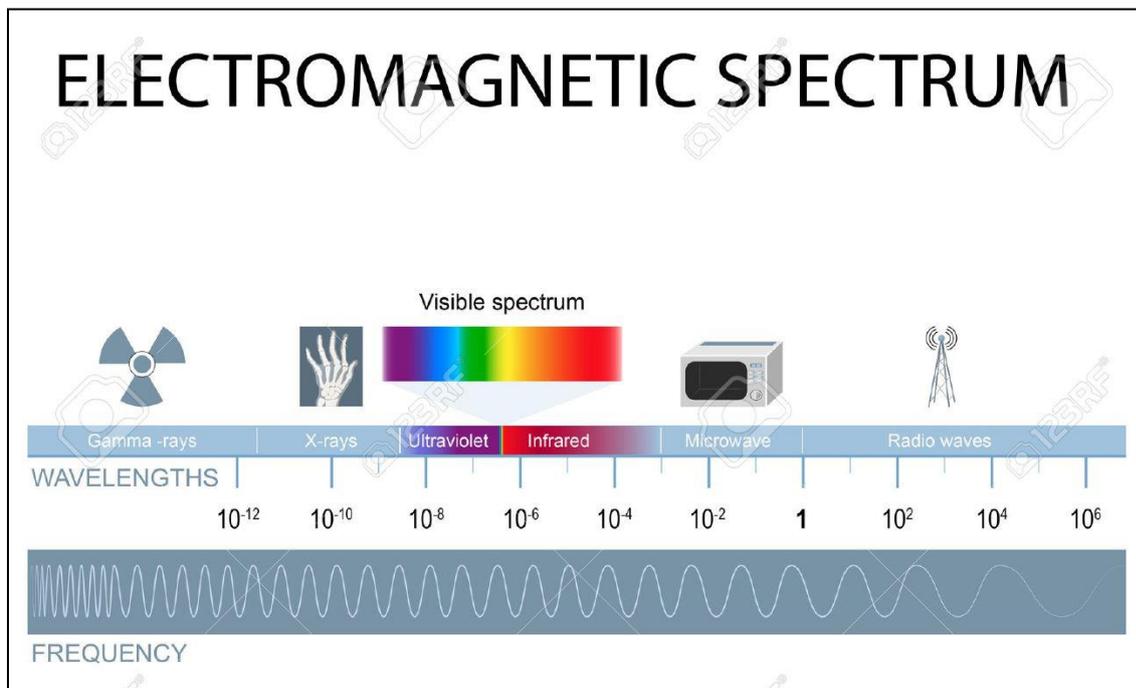


Figure1 : Echelle de comparaison des radiations électromagnétiques

3 PRODUCTION DES RAYONS X

3.1 Le tube à rayons X

La première source d'intensité suffisante pour être pratique est l'interaction des électrons accélérés (rayons cathodiques) avec un solide ou une cible métallique, à l'image du tube de Crooks qui était à l'origine de leur découverte.

Un tube de rayons X comprend donc en principe une source d'électrons appelée CATHODE et une cible l'ANTICATHODE renfermées dans une enceinte où règne un vide primaire. Les rayons X émis sortent à travers des fenêtres (en béryllium) aménagées dans l'enveloppe protectrice. Entre la cathode et l'anticathode, on établit une forte différence de potentiel (en KV) pour donner aux électrons la vitesse voulue avec laquelle ils viennent percuter l'anticathode.

Lors du choc, les électrons se trouvant brusquement freinés, il y a transformation de l'énergie cinétique en chaleur et en rayonnement X.

La part d'énergie émise sous forme de rayons X est faible. Le rendement du tube à rayons X (rapport de l'énergie du faisceau à celle du flux électronique) est proportionnelle à la fois, à la tension V et au numéro atomique Z de l'élément constituant l'anticathode. Ce rendement est de 0.8 % pour un tube à anticathode de molybdène opérant sous 100 KV et 0.2 % pour un tube à anticathode de cuivre opérant sous 30 KV. Donc, la quasi-totalité de l'énergie électronique est

transformée en chaleur. La nécessité de refroidir énergiquement l'anticathode pour évacuer la chaleur produite, s'avère absolument indispensable, afin d'éviter sa dégradation par fusion.

Même en employant les moyens de refroidissement les plus énergiques possibles, une substance donnée utilisée comme anticathode ne peut pas recevoir plus d'une certaine énergie de surface sans se détériorer. Cette valeur limite est d'autant plus grande que la substance est meilleure conductrice et/ou possède un point de fusion plus élevé. On emploie exclusivement des métaux comme anticathode et principalement des métaux réfractaires comme le tungstène et le molybdène ou bien très bon conducteur de chaleur comme le cuivre. La figure 2, a et b montrent un tube à rayon X et un schéma de principe des différents éléments qui le constituent.

3.2 Le rayonnement synchrotron

La deuxième source de production de rayons X est l'accélérateur de particules, le synchrotron. Le nom de rayonnement synchrotron vient d'un type particulier d'accélérateur, où le rayonnement est émis par des particules chargées se déplaçant à des vitesses relativistes dans des champs magnétiques courbant leurs trajectoires. Le rayonnement synchrotron est produit dans des anneaux de stockage de taille variables (de 50m à 300m de diamètre) autour desquels sont installées tangentiellement des expériences où lignes de lumière. (Figure 3)



Figure3 : Accélérateurs de particules

ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) à Grenoble (France) APS (Advanced Photon Source) à Argonne, Illinois (USA)

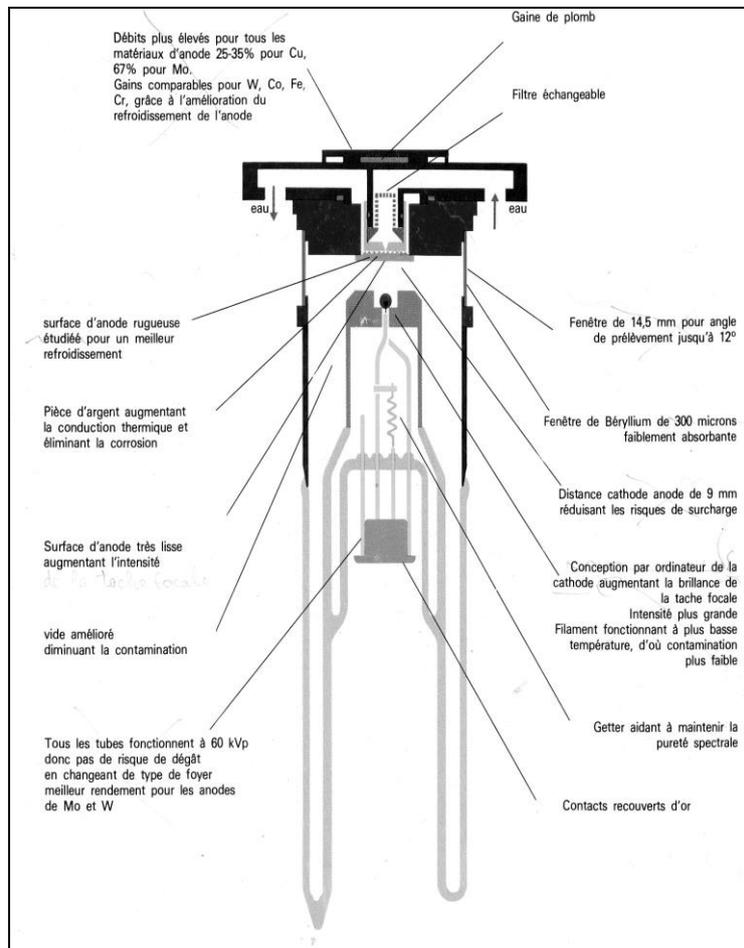


Figure 2bis : Coupe longitudinale d'un tube à rayons X

Ce sont des centres de troisième génération car le rayonnement est produit de deux manières :

- Lorsque la trajectoire des électrons est courbée par un champ magnétique produit par un aimant de courbure, les électrons émettent un spectre continu de rayons X. Pour un synchrotron de 6GeV, comme l'ESRF, avec un aimant de 0.8T, l'énergie de ce spectre est centrée à 19.2keV. Le faisceau de rayon X a alors une divergence verticale égale à mc^2/E , où E est l'énergie des particules et m la masse au repos. Pour l'ESRF, cet angle est de 0.08mrad. L'énergie est donc beaucoup plus centrée que dans le cas d'un tube.

- Entre les aimants de courbure sont installés des « éléments d'insertion » appelés onduleurs ou wiggler. Ces éléments sont constitués de multi pôles magnétiques qui donnent aux électrons des trajectoires sinusoïdales. Cette manière de faire osciller les électrons renforce l'intensité du rayonnement émis de plusieurs ordres de grandeur. Ainsi, la brillance exprimée en photons par seconde par mm^2 de taille de source, par milliradian carré de divergence et par 0.1% de largeur de bande) d'un faisceau sortant d'un onduleur de l'ESFR peut

atteindre 10^{20} ph/s/mm²/mrd²/0.1% largeur de bande soit 10^{14} fois plus que la brillance d'un tube.

Les anneaux de stockage sont constitués de combinaisons complexes de champs magnétiques et électriques, les premiers servant à produire le rayonnement et les seconds à réaccélérer les particules ayant perdu leur énergie en rayonnant.

Il y a environ 30 centres de rayonnement synchrotron dans le monde. Les plus importants sont l'ISRF (European Synchrotron Radiation Facility) à Grenoble (France), Sprig8 au Japon et l'APS (USA).

Le rayonnement synchrotron est caractérisé par :

- ✓ Une très grande brillance (10^{20} ph/s/mm²/mrd²/0.1% largeur de bande).
- ✓ Un spectre blanc dans un large domaine de fréquence.
- ✓ Une polarisation linéaire dans le plan de l'orbite des électrons
- ✓ Une structure temporelle (typiquement des impulsions de ~10ps tous les 10ns).

4- MECANISME DE PRODUCTION DES RAYONS X

4.1 Introduction

Le rayonnement X émis par des électrons accélérés heurtant une anticathode est constitué de deux parties distinctes :

Une partie continue appelée « **spectre continu** » dont l'origine est la décélération des électrons lors de l'impact avec l'anticathode ; on le nomme aussi rayonnement de freinage ou bremsstrahlung.

Une partie discontinue appelée « **spectre de raies** » constitué par des raies d'émission très fines caractérisant la nature du métal de l'anticathode d'où l'appellation de « **raies caractéristiques** ». Si on considère un tube à anticathode de tungstène fonctionnant à courant constant à des tensions croissantes de 20 à 50 KV, la variation de l'intensité émise en fonction de la longueur d'onde est indiquée par les courbes de la figure 4.

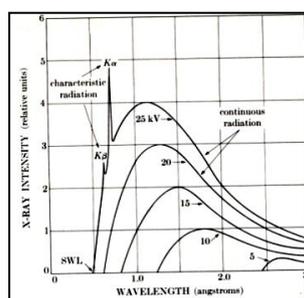


FIGURE 4 : Intensité I du spectre continu en fonction de la longueur d'onde (λ).

4-2 Spectre continu

Pour une tension d'accélération $V < V_K$ où V_K étant la tension d'ionisation des atomes de l'anticathode, on obtient un spectre $I = f(\lambda)$ continu. Le spectre est dit continu parce que l'intensité de l'émission varie de façon continue, avec la longueur d'onde. L'énergie cinétique communiquée aux électrons par la tension d'accélération est partiellement transformée en une énergie rayonnante, par suite du ralentissement des électrons dans la matière (poire de pénétration des électrons).

Les faits fondamentaux mis en évidence par l'expérience sont :

1-le spectre s'arrête brusquement du côté des courtes longueurs d'onde. Cette limite inférieure λ_{\min} dont la théorie quantique rend compte de façon très simple, est inversement proportionnelle à la tension de fonctionnement V du tube. En effet, l'électron d'énergie eV peut, par suite du choc sur la matière, donner naissance à un photon dont l'énergie est au plus celle de l'électron, d'où une fréquence limite de la radiation donnée par la relation :

$$h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = eV \quad \lambda_{\min} = \frac{12.394}{V} \quad \text{Où :}$$

- h = constante de Planck ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s)
- V = tension d'accélération des électrons (en V)
- C = vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s)
- λ_{\min} = longueur d'onde minimale (en Å)
- e = charge de l'électron ($1,67 \cdot 10^{-19}$ Coulomb)

* le spectre continu contient une proportion notable des longueurs d'ondes très proches de la limite inférieure λ_{\min} . Le maximum d'intensité correspond à une longueur d'onde de l'ordre de $1,5 \lambda_{\min}$.

Pour des conditions de fonctionnement du tube données, l'intensité du spectre continu est proportionnelle au numéro atomique de l'élément de l'anticathode. L'intensité totale des rayons X du spectre continu est donnée par :

$$I = A \cdot i \cdot Z \cdot V^2$$

Où : A = constante

i = Courant électronique du tube

Z = numéro atomique de la cible (anticathode)

V = tension appliquée (accélération)

On a donc intérêt à employer des éléments lourds (le tungstène est 2 fois plus avantageux que le cuivre). L'augmentation de la tension d'accélération a tendance de pousser le spectre vers les courtes longueurs d'onde et à améliorer le rendement du tube pour tout le spectre.

4.3 Spectre de raies caractéristiques

Pour une tension d'accélération $V > V_K$, se superpose au spectre continu un spectre de raies dont les longueurs d'onde sont indépendantes des conditions de fonctionnement du tube, mais dépendent, par contre, de la nature de l'anticathode. Ce sont les **raies caractéristiques**, liées aux atomes constituant l'anticathode.

Lorsqu'on passe d'un élément à un autre de l'anticathode, le spectre caractéristique garde la même allure, mais se déplace dans l'échelle des longueurs d'ondes. Moseley a montré que ce déplacement est fonction du nombre atomique Z et que, pour une raie déterminée, on pouvait écrire la variation de la fréquence sous la forme :

$$\sqrt{\nu} = C (Z - \sigma)$$

Où : ν est la fréquence de la raie ;

C, σ constante ($\sigma \approx 1$) ;

Z numéro atomique

La loi de Moseley a permis d'anticiper la détermination des longueurs d'ondes des raies caractéristiques d'éléments chimiques non encore isolés ou connus. Les intensités relatives des raies sont les mêmes en première approximation pour les différents éléments.

Les spectres caractéristiques ainsi obtenus sont très simples et ne contiennent qu'un petit nombre de raies, ces spectres sont analogues pour tous les éléments. Ils sont constitués par des groupes de raies nommées K, L, M etc. Chaque série comprend une suite de raies qui se succède de façon homologue dans les spectres de tous les éléments. En radiocristallographie, on a le plus souvent affaire au spectre K, parfois au spectre L et M lorsqu'il s'agit d'éléments lourds.

Pour expliquer ce phénomène, il faut considérer dans un atome les électrons qui gravitent sur des orbites autour du noyau, avec des énergies de liaison bien déterminées W_K , W_L , W_M d'autant plus grandes que l'orbite est proche du rayon.

La série K est la plus importante ; elle ne comprend que trois raies d'intensités notables. Les deux plus intenses forment un doublet très resserré $K_{\alpha 1}$ et $K_{\alpha 2}$ dont les composantes ont des intensités comparables ($K_{\alpha 1}$ est deux fois plus intense que $K_{\alpha 2}$ et a la plus courte longueur d'onde).

Dans bien des cas le doublet n'est pas résolu et on adopte pour K_{α} la longueur d'onde moyenne pondérée, exprimée par la relation suivante:

$$\lambda_{K_{\alpha}} = \frac{2\lambda_{K_{\alpha 1}} + \lambda_{K_{\alpha 2}}}{3}$$

La troisième raie forte de la série K est la raie K_{β} ; elle a une longueur d'onde plus courte d'environ 10% et une intensité de l'ordre de 1/7 de celle de $K_{\alpha 1}$. Les rapports des intensités sont les suivants :

$$\frac{I_{K_{\alpha 1}}}{I_{K_{\alpha 2}}} \cong 2 \quad \text{et} \quad \frac{I_{K_{\alpha 1}}}{I_{K_{\beta}}} \cong 10$$

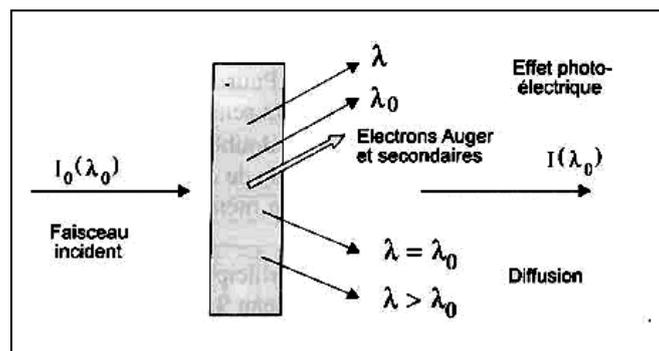
L'ABSORPTION DES RAYONS X

1 Définition

Quand un faisceau de rayons x traverse une couche de matière son intensité diminue suite à l'interaction du rayonnement avec la substance. Cette diminution traduit l'effet de l'absorption des rayons X par la matière. Plusieurs mécanismes sont à l'origine de cette diminution d'intensité :

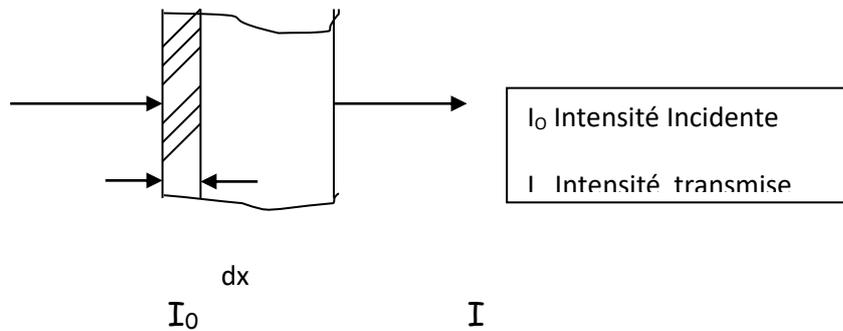
- Les photons peuvent avoir été déviés de leur trajet sans perte d'énergie (rayonnement diffusé sans changement de longueur d'onde ou diffusion élastique ou Rayleigh) ou avec une légère perte d'énergie (effet COMPTON) et éventuellement la création d'une paire électron-trou.
- Les photons peuvent avoir été absorbés par les atomes ou effet photoélectrique. L'atome excité réémet alors deux sortes de rayonnement secondaires : des électrons (Auger et secondaires) et des rayons X « de fluorescence » dont la longueur d'onde n'a pas de rapport avec la longueur d'onde primaire mais est caractéristique de l'atome excité.

L'effet photoélectrique est largement dominant et on peut considérer l'absorption comme un phénomène atomique ne dépendant que de la nature de la matière traversée, et du nombre des atomes et non de leur arrangement. Cette diminution obéit à la loi de Beer-LLambert.



2 Cas d'un métal pur

Soit un faisceau de rayon x d'intensité I_0 , et de section S , traversant une lame de matière d'épaisseur « x » ; à la sortie de la lame, l'intensité du faisceau devient I inférieure à I_0 .



La traversée d'une épaisseur dx d'une substance donnée entraîne une diminution $-dI$ de l'intensité I telle que :

$$-dI = \mu I \cdot dx$$

Où « μ » est le coefficient d'absorption linéaire, il a les dimensions inverses d'une longueur et s'exprime en cm^{-1} .

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx$$

En intégrant, on obtient :

$$\int_I^{I_0} \frac{dI}{I} = -\mu \int_0^x dx$$

$$\text{Log } I - \text{Log } I_0 = -\mu x$$

$$\log \frac{I}{I_0} = -\mu \cdot x$$

$$I = I_0 e^{-\mu \cdot x} \quad (1)$$

La relation (1) peut être écrite sous la forme :

$$I = I_0 e^{-\rho \left(\frac{\mu}{\rho}\right) x} = I_0 e^{-\rho \mu_m x}$$

μ_m Coefficient d'absorption massique se rapportant à un gramme de matière. Il ne dépend ni de l'état physique de la matière, ni de la combinaison chimique, ni de l'arrangement des atomes, mais uniquement du nombre de ceux-ci par unité de volume.

μ_m a la dimension $[\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$.

ρ étant la masse volumique de la matière