

APPLICATION DES RAYONS X A L'IMAGERIE MEDICALE

I - IMAGERIE RADIOLOGIQUE

Récap du cours RX :

A la **cathode**, il y a un **filament de tungstène** qui va permettre de générer des électrons sous l'effet de la haute tension qui s'applique à ce tube. Il y a un **courant anodique**, c'est-à-dire un flux d'électrons qui vient percuter la cible qui est l'anode.

A l'**anode**, il y a une **production de chaleur** importante, et une **production de RX** qui vont être **collimatés** (ça veut dire qu'on va diriger ces RX vers un certain point) pour sortir du tube et pouvoir être utilisés à des fins d'imagerie.

Donc on a le tube ainsi positionné au-dessus du bras du patient. Le flux de RX va être dirigé vers ce qui est la cible diagnostique : ici le bras. Les RX vont traverser ce dernier et réagir avec un détecteur placé sous la table sur laquelle on fait l'examen.

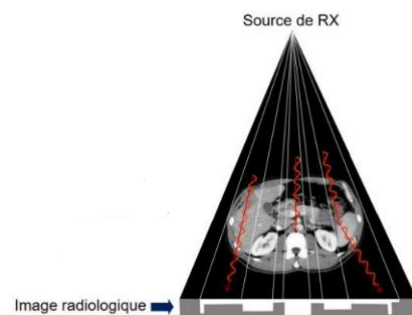
Ce détecteur est ici un film radiologique qui va produire la radio telle qu'on la connaît.

A - Formation de l'image radiologique

Il s'agit de mesurer la transmission du flux de photons X à travers l'organisme. On a la source de RX qui sort du tube, et qui va traverser une partie du corps du patient pour être détectée de l'autre côté et générer l'image radiologique.

Ces photons X vont avoir différents devenir dans le corps du patient :

- Interaction avec la structure examinée = **absorption**
- Pas d'interaction = **transmission**



Par exemple sur cette photo : un photon peut interagir avec une vertèbre osseuse et être absorbé, disparaître.

Un autre peut être transmis et passer au travers du foie.

Tous les **photons transmis**, qui ont donc résisté à la traversée du patient, sont **convertis en une image radiologique par interaction avec un détecteur** (récepteur) approprié. Cette image va être la répartition spatiale des photons transmis.

L'image radiologique reflète le **pouvoir d'atténuation des structures traversées**.

Contraste = différences d'absorption des photons X à travers les différents tissus

B - Interaction des RX avec les tissus

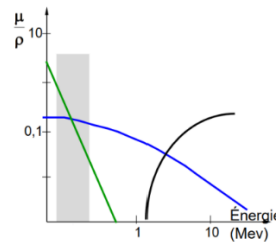
Le contraste va être fonction de l'interaction des photons avec la matière.

- Les photons X sont des **rayonnements électromagnétiques** d' E_{max} entre **50 et 150 keV** (puisque c'est l'ordre de grandeur de la haute tension appliquée au tube à RX).
- Ils sont **indirectement ionisants** : leur énergie maximale est largement supérieure à 13 eV, qui est la limite pour les RI.



Si on reprend ce graphique qui montre en fonction de l'énergie les coefficients massiques d'atténuation $\frac{\mu}{\rho}$ des REM dans la matière :

- En vert : par effet photo-électrique
- En bleu : par effet Compton
- En noir : par création de paires



Les RX se situent dans une gamme d'énergie relativement faible (en gris sur le graph), dans laquelle les interactions se font seulement par :

(Les formules n'ont jamais été demandé en QCM mais il faut quand même les avoir en tête)

Effet photo-électrique :

La probabilité d'interaction est donc proportionnelle au cube du numéro atomique Z , et inversement proportionnelle au cube de l'énergie.

$$\frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$

Effet de diffusion Compton :

La probabilité d'interaction est inversement proportionnelle à l'énergie.

$$\frac{\sigma}{\rho} = k' \frac{1}{h\nu}$$

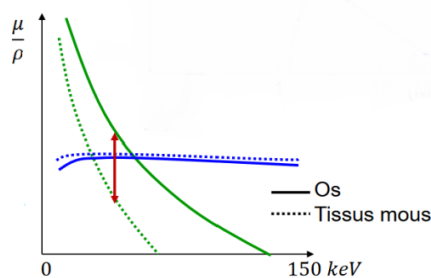
Les énergies sont beaucoup trop faibles pour que se manifeste la création de paires.



On zoom sur la partie qui nous intéresse et on trace les probabilités d'interaction par effet photo-électrique et par effet Compton pour 2 tissus différents : l'os en trait plein, et les tissus mous en pointillés.

Effet Compton

Il n'y a **pas de différence** entre l'os et les tissus mous, ce qui était prévisible car la probabilité d'interaction ne dépend pas du Z , donc ne dépend pas des tissus traversés.



Effet photo-électrique

Il y a une **différence** entre l'os et les tissus mous, puisque la probabilité dépend bien du Z . Donc si $Z \nearrow$ la probabilité d'interaction \nearrow . La **probabilité** d'interaction par effet photo-électrique est donc **plus importante pour l'os** car il est essentiellement constitué de calcium, qui est relativement riche en électrons ($Z = 20$)

Donc les interactions des RX avec les tissus dépendent des différences des μ des tissus et de l'énergie des RX.

Les **différences d'interaction** sont surtout liées à l'**effet photo-électrique**, créant le contraste.

C - Contraste

Le contraste correspond à la **différence de photons transmis** sur la surface irradiée.

Il dépend donc des différences de **coefficients linéiques d'atténuation μ** des tissus, ainsi que de leur épaisseur.

Le contraste s'exprime numériquement par la formule :

$$C = \frac{1}{2}(\mu_2 - \mu_1)x = \frac{k}{2(h\nu)^3}(\rho_2 Z_2^3 - \rho_1 Z_1^3)x$$

(cette formule n'est pas à apprendre, vous en faites pas)

μ_1 et μ_2 : coefficients linéiques d'atténuation du tissu 1 et tissu 2

x : épaisseur traversée (cette formule n'est

Si on remplace μ_1 et μ_2 par les coefficients linéiques par effet photo-électrique, puisque c'est l'effet principal, on obtient la formule de droite, qui fait apparaître l'énergie au dénominateur à la puissance 3.

Donc **plus l'énergie augmente, moins le contraste sera important**. La **différence de ρZ** (le produit de la densité par le numéro atomique) entre les deux tissus traversés, ainsi que l'**épaisseur**, vont **contribuer à ce contraste**

Contraste => dépend de Z et de la densité ρ .

Quand on regarde les **contrastes naturels**, c'est-à-dire les valeurs des Z qui constituent les tissus biologiques, la plupart des atomes ont un Z relativement petit. Il n'y a que le calcium qui a un Z plus élevé :

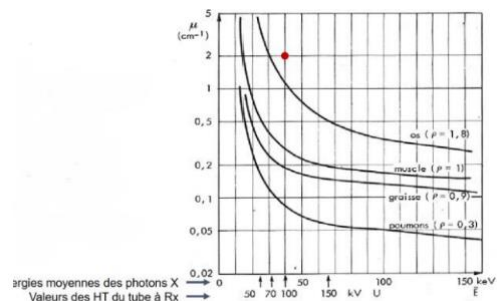
$$H = 1, C = 6, O = 8, N = 7, Ca = 20$$

Ceci dit, il peut y avoir des **contrastes artificiels**, c'est-à-dire qu'on va pouvoir fabriquer ou renforcer des contrastes. Pour cela, on va utiliser des atomes avec un Z plus élevé, par exemple des produits de contraste iodés : l'iode a un Z de 53.

Voici un graph qui représente ces contrastes :

On a en **abscisse** l'énergie moyenne des photons X. En-dessous de cette ligne on a les valeurs des hautes tensions du tube à RX, égales aux valeurs des énergies maximales des photons fabriqués. Par exemple, si on a un tube qui fonctionne sous une haute tension de 100kV, les photons X générés auront une énergie maximale de 100keV, mais une énergie moyenne qui sera de 40 keV.

En **ordonnée**, on a les probabilités d'interaction, les coefficients linéiques d'atténuation μ . On voit que pour une énergie moyenne de 40 keV, l'os a une valeur de 1, alors que pour les muscles cette valeur descend en-dessous de 0,5. Lorsque l'on passe à la graisse, le coefficient linéique d'atténuation, et donc la probabilité d'avoir un effet photo-électrique, diminue encore. Lorsqu'on est dans les poumons, dans lesquels il y a beaucoup d'air, la probabilité est encore plus faible, de l'ordre de 0,1.



De là naissent les contrastes entre les os, les muscles et l'air des poumons.

(Ce schéma est à comprendre mais pas à apprendre par cœur)

En ce qui concerne les **produits de contraste artificiels** : si on considère une énergie moyenne de 40 keV, le coefficient de l'iode va se situer à 2, c'est-à-dire au-delà même du coefficient d'atténuation des os, car le Z est à 53. (c'est le point sur le graphique)



Voyons un exemple concret de l'utilisation des produits de contraste iodés :
Il s'agit de créer/d'augmenter artificiellement un contraste radiologique qui éventuellement n'existe pas.

On a un cliché radiologique de l'abdomen et du pelvis, et on voit un **contraste osseux** : on voit très bien les os du rachis, le bassin et les hanches, mais dans les tissus mous on **ne distingue pas d'organe** en particulier. Par exemple, **on ne voit pas l'appareil urinaire** : vessie, reins et uretères, car leurs Z sont très proches de ceux des tissus environnants, donc pas de contraste.

Si on veut étudier l'appareil urinaire il faudra donc utiliser un **produit de contraste** iodé, qui va être éliminé par les reins, et va ainsi permettre de générer un contraste entre les voies urinaires et le reste de l'abdomen.



Si on prend une **radio du thorax**, on a un contraste spontané un peu plus riche. On a toujours les **structures osseuses** : le rachis que l'on voit bien, mais aussi les côtes, les clavicules. On a les **tissus mous** avec le foie, le médiastin et le cœur, et enfin le contraste plutôt aérien au niveau des **poumons**, qui est un tissu peu dense car beaucoup d'air. Mais on ne peut pas étudier plus précisément le cœur, et notamment les artères du cœur qui sont les **artères coronaires**. Celles-ci ont des caractéristiques d'atténuation des RX qui sont les mêmes que le reste du médiastin.

Par contre, si on injecte un **produit de contraste** dans la coronaire gauche, on génère un contraste entre les vaisseaux qui contiennent le produit et le reste du cœur qui n'en contient pas.



D - Exemples d'appareillages

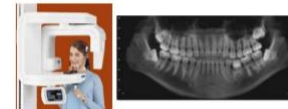
Projection plane : radiologie conventionnelle :

Le plus simple ce sont les appareils qui vont permettre des clichés que l'on appelle planaires, donc des projections planes d'une partie du patient. C'est la table de radiologie que l'on a vue précédemment, avec le tube à RX et dessous le détecteur sous forme de film.



Radio rétro-alvéolaire :

En chirurgie dentaire on peut utiliser les RX pour faire de la radiographie rétro-alvéolaire. On a le tube à RX sur un bras articulé qui permet de se rapprocher d'une dent. Un détecteur est placé dans la bouche et permet d'avoir des clichés radiologiques de dents isolées avec une très bonne résolution spatiale.



Exemples d'appareillages

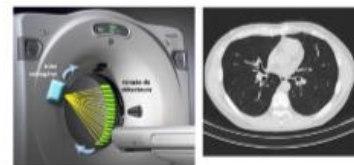
Panoramique dentaire :

On a un système avec un tube à RX et de l'autre côté un détecteur qui va faire un demi-tour autour de la mâchoire du patient, de manière à dérouler celle-ci et avoir un cliché radiologique de l'ensemble. On peut étudier globalement la dentition.



Coupes : détecteur et source tournants (scanner ou tomodesitométrie) :

On peut aussi utiliser ce système non pas de manière planaire, mais de manière tridimensionnelle, de façon à avoir des images qui sont cette fois en coupes. Pourtant, c'est le même système : un tube à RX et un détecteur, mais cette fois qui sont tournants autour du patient afin de reconstituer non pas des vues de face, de profil ou postérieure mais des coupes. C'est le scanner / tomodesitométrie. Ici on a une image en coupe du thorax.



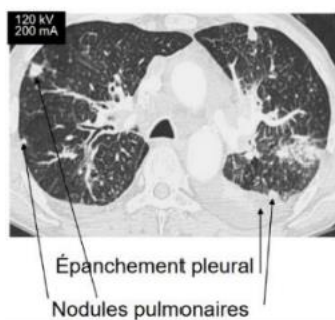
E - Exemples d'informations tirés d'examens radiologiques



On va prendre le cas d'un patient fumeur hospitalisé pour une hémoptysie (= le patient a craché du sang).

Voici deux examens faits avec des RX :
(Encore une fois pas à apprendre mais juste comprendre)

Sur la coupe scanner, on voit les réglages du tube avec 120 kV (haute tension) et 200 mA (intensité du courant anodique). Le radiologue va voir l'épanchement pleural du côté gauche, qu'on voit plus facilement sur l'imagerie en coupe qu'en imagerie planaire. Il va voir aussi des **nodules pulmonaires**, ces zones plus denses qui sont anormales. Il va voir aussi une **opacité anormale**, probablement **d'origine infectieuse**. Il y a finalement beaucoup d'informations dans ces contrastes radiologiques des RX.



A gauche on a une radiographie standard du thorax, de face et planaire, et à droite une tomodensitométrie, c'est-à-dire un scanner, du thorax également.

Si on regarde la radiographie de face : on voit les contrastes habituels, les contrastes osseux, les tissus mous du médiastin et du foie, et le contraste pulmonaire. On voit en plus des câbles d'électrocardiogramme pour la surveillance du patient pendant son hospitalisation. Le radiologue va voir une zone en particulier dans l'**angle costo-phrénique**, entre le grill costal et le diaphragme, et qui normalement est un angle aigu. Ici il est **comblé par du liquide** : c'est un **épanchement pleural**. (c'est lorsqu'il y a du liquide entre les 2 couches de la plèvre, qui est une membrane séreuse qui entoure les poumons, que vous verrez en anat au s2)

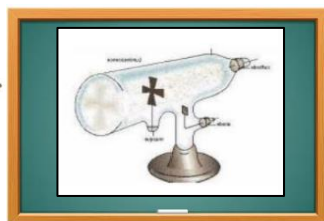


II - Historique

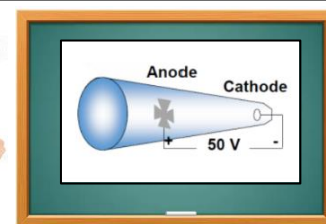
A - Les expériences sur le tube de Crookes (1875)

Attention instant BD qui ne ressemble pas de ouf à une BD mais faites genre

Cette histoire commence avec des expériences réalisées avec ce qu'on appelait à l'époque le tube de Crookes. Celui-ci était très utilisé par les physiciens au 19^{ème} siècle. C'est une enceinte sous verre, dans laquelle il y avait une anode métallique traditionnellement sous forme de croix de Malte et une cathode.



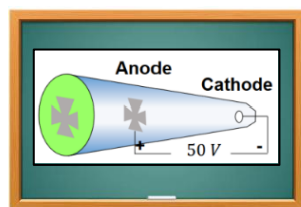
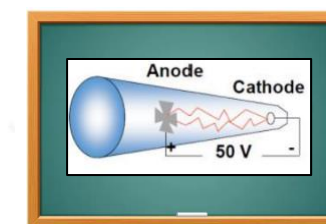
Les physiciens observaient que lorsqu'on mettait une différence de potentiel entre l'anode et la cathode, à pression atmosphérique, spontanément on n'observait pas de phénomène particulier.



Mais ils se sont aperçus que si on réduisait la pression atmosphérique, à partir de 10⁻² atm on observait des décharges électriques. Ils n'étaient pas capables de comprendre ce phénomène, mais ces décharges électriques sont dues à un flux d'électrons qui va de la cathode vers l'anode.

Comme on n'est pas dans le vide, ces électrons dans leur parcours entre la cathode et l'anode vont rencontrer des molécules d'air ou de gaz, et ce faisant vont provoquer des décharges lumineuses, qui sont liées aux ionisations/excitations que vont créer ces ions dans les atomes de gaz présents.

C'est donc indirectement le passage de ces électrons que voyaient les physiciens, mais bien sûr ils ne pouvaient pas l'interpréter puisqu'à cette époque on ne connaissait même pas l'existence de l'électron.



Cette fluorescence verte était en réalité la manifestation de l'interaction par collision des RX au niveau du verre, ce qui donnait des raies caractéristiques du verre. Ces photons de fluorescence, vu l'énergie des électrons et vu l'énergie de liaison des atomes du verre, se trouvaient avoir une longueur d'onde dans le domaine du visible, sous forme d'une lumière verte.

Ceci a été découvert lorsque Charles Brakla a justement décrit ces raies caractéristiques en 1908-1909, et a reçu le prix Nobel pour cela en 1917.

Quand ils ont poursuivi leurs expériences, ils se sont aperçus que lorsqu'on faisait un vide poussé dans le tube, à 10⁻⁵ atm, les décharges électriques disparaissaient (plus de molécule d'air et donc plus d'ionisation sous l'effet du flux d'électrons), par contre ils ont vu apparaître une fluorescence verte ($\lambda = 500-550 \text{ nm}$) sous le fond du verre, avec l'ombre de la croix de Malte.



« Sans vouloir rentrer dans les détails » un certain nombre de physiciens ont fait avancer petit à petit les hypothèses :



- 1869 Johan Hittorf : l'anode jette une ombre : « quelque chose se propage »
- 1878 Eugène Golstein : le quelque chose provient de la cathode : « rayons cathodiques » (les électrons sont encore inconnus à l'époque)
- 1895 Wilhelm Conrad Roentgen : Rayons X (cf plus loin)
- 1897 Joseph John Thomson : identifie ces particules chargées négativement : « les électrons »

B – La découverte des rayons X par Roentgen (le 8 Novembre 1895)

Roentgen faisait partie des physiciens qui travaillaient sur le tube de Crookes. Il a eu l'idée d'emballer le tube de Crookes dans un emballage optiquement étanche, et de regarder ce qui se passe sur une plaque de fluorescence photographique de platinocyanure de baryum à l'extérieur du tube. Il s'aperçoit que cette plaque est influencée lorsqu'il branche son tube et que celui-ci est isolé de manière opaque.



Il demande alors à son épouse de poser sa main sur la plaque en refaisant l'expérience. Il a la surprise de s'apercevoir qu'on voit par transparence la structure osseuse de la main sur la plaque.



Il fait l'hypothèse que des rayons sont sortis de son système expérimentale, et qui sont différents des rayons cathodiques puisqu'il a pris soin d'emballer son tube de Crookes dans un emballage étanche. Il appelle donc ces rayons les « rayons x » car il ne sait pas de quelle nature ils sont.

Cependant, il constate que ces RX traversent la matière et peuvent donner une image de celle-ci.

Nous savons maintenant que les RX sont surtout produits à l'anode par interaction des électrons avec le noyau, c'est-à-dire la partie continue du spectre.

C – Les débuts de la radiologie

Roentgen publie rapidement ses résultats en décembre 1895, et dès janvier-février 1896 des médecins s'intéressent à cette découverte, et en particulier des médecins français :

- Jean Bergonié à Bordeaux
- Antoine Bécère à Paris



Ils vont utiliser cette découverte pour ce qui est le début de la radiologie.



En 1901, bien que Roentgen ait abandonné ses études sur les RX, il reçoit le prix Nobel de physique.

La radiologie commence à se développer, mais assez difficilement, parce qu'elle rencontre un scepticisme médical : on entendait des médecins dire que c'était « déshonorer le corps médical en devenant photographe ».

1^{ère} Guerre Mondiale

D'une certaine façon, c'est la **première guerre mondiale** qui va aider le développement de la radiologie, grâce à un certain nombre de médecins et de scientifiques comme **Marie Curie**, qui à la même époque découvre la radioactivité.

Elle utilise la découverte de Roentgen pour pouvoir prendre soin des **blessés sur le front**. La radiologie permettait de **localiser les blessures métalliques des soldats**. Marie Curie fait partie des personnes qui ont développé les **petites curies** : c'étaient de petites camionnettes qui emportaient du matériel radiologique et du personnel pour réaliser des radios sur le front de bataille.



Effets biologiques

Cette période est aussi le **début de la connaissance des effets biologiques**, mais malheureusement il y a un décalage. En effet, au tout début les personnes qui utilisaient les RX n'avaient pas conscience que ces REM pouvaient avoir des effets sur la santé.

Cependant, ils vont vite s'en rendre compte, parce que les radiologues qui avaient l'habitude le matin de régler leur tube à RX en se faisant une radio de la main ont développé des **radiodermites** : des lésions des doigts qui se sont souvent résolues par des amputations. Très rapidement, on a donc pris conscience de ces effets radiologiques et commencé à les connaître et à les décrire, mais aussi comprendre comment s'en protéger.



III - CONCLUSION

- Les rayons X ont été découverts par Roentgen en 1895.
- Les rayons X traversent partiellement la matière biologique.
- Le **contraste radiologique** est déterminé par les **différences d'absorption des rayons X des différents tissus**, elles-mêmes dues aux différences de coefficients linéiques d'atténuation par effet photo-électrique.

The end !

C'était ma dernière fiche !!! J'avoue je me suis fait un peu plaisir sur cette fiche, oui oui on est en novembre mais c'est déjà le moment de penser à Noël :) Bref ce fut un plaisir de vous faire toutes ces fiches et j'espère vraiment qu'elles vous ont plu autant qu'elles m'ont plu.

C'est un cours plutôt facile, pas mal d'apprentissage pour la deuxième partie et un peu de compréhension.

Je vous souhaite bon courage pour la suite, n'oubliez pas que vous êtes incroyables et que cette place vous la méritez, alors donnez tout pour l'avoir, on croit tous fort en vous, alors déchirez moi cet exam !!

Dédies à toute ma famille, mes meilleures amies toujours là pour me remonter le moral et cet expérience incroyable qu'est le tutorat !

