

Application des rayons X à l'imagerie médicale

Re !! On continue aujourd'hui avec la suite des rayons X. Vous l'aurez deviné il s'agit bien de l'application des rayons X à l'imagerie médicale (enfinnn). La fiche est à jour, pas de gros changements à notifier, surtout des explications un peu plus détaillées. Vous allez voir elle est super intéressante!!

1. IMAGERIE RADIOLOGIQUE

Récap du cours rayon X :

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.

Tout ça vous l'avez en beaucoup plus détaillé dans le cours sur les rayons X

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.

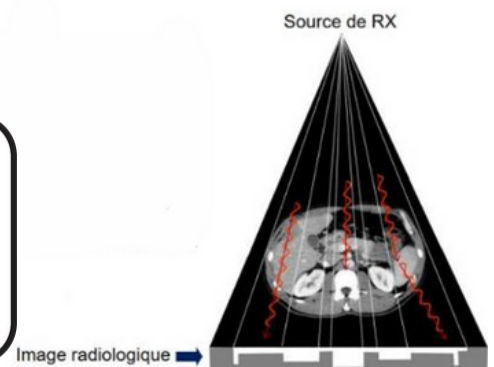
Ce détecteur est ici un film radiologique qui va produire la radio telle qu'on la connaît.

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 devenirs dans le corps du patient :

- Interaction avec la structure examinée = **absorption/ diffusion**
- 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 ++

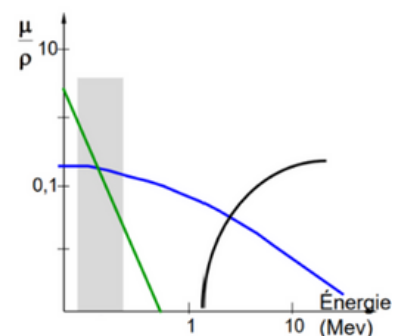
B. INTERACTION DES RX AVEC LES TISSUS

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

- Les photons X sont des **rayonnements électromagnétiques** d'Emax entre 50 et 150 keV (puisque c'est l'ordre de grandeur de la haute tension appliquée au tube à RX) (on se souvient ils sont numériquement égaux). Pour les énergies qui nous intéressent (soit entre 50 et 150 keV), c'est **l'effet photoélectrique qui va être le plus important**.
- Ils sont indirectement ionisants (normal ils ne sont pas chargés) : 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 μ/ρ** 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 :**

Effet photo-électrique :

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

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

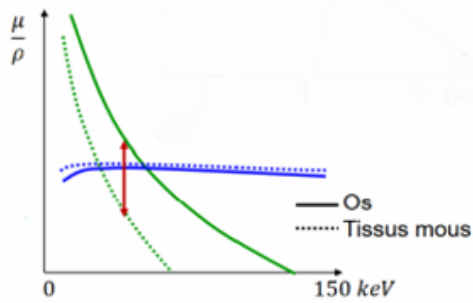
Effet de diffusion Compton :

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**.

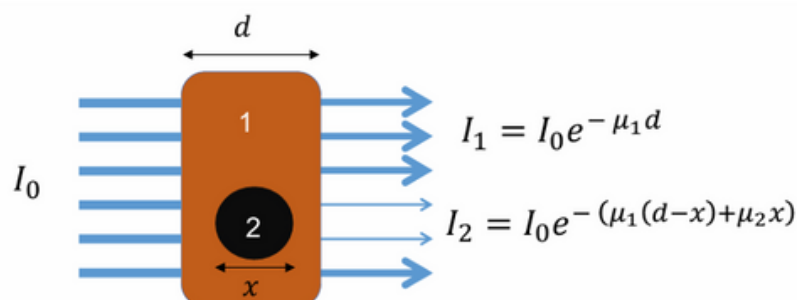
Les différences d'interaction sont surtout liées à l'**effet photo-électrique**, créant le contraste.

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**.

On peut modéliser le contraste en disant que c'est la différence entre **I_1** (les photons qui ne passent pas dans la boule 2) et **I_2** (les photons qui passent dans la boule 2) qui nous intéresse, qu'on moyenne :



$$C = \left| \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right| \text{ qu'on peut globalement écrire } \rightarrow C \approx \frac{1}{2} (\mu_2 - \mu_1)x$$

x : l'épaisseur de la boule

Et on a vu que μ , ça correspondait à cette formule avec k une constante.



$$\mu = k\rho \frac{Z^3}{(h\nu)^3} \text{ (effet photoélectrique)}$$

Ainsi le contraste s'exprime numériquement par la formule :

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

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

Don't worry, elle n'est pas à apprendre

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.

On retient :

Le contraste va dépendre de Z, de ρ et de x (l'épaisseur du milieu traversé). +++

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** :

$$H = 1, C = 6, O = 8, N = 7, \underline{Ca = 20}$$

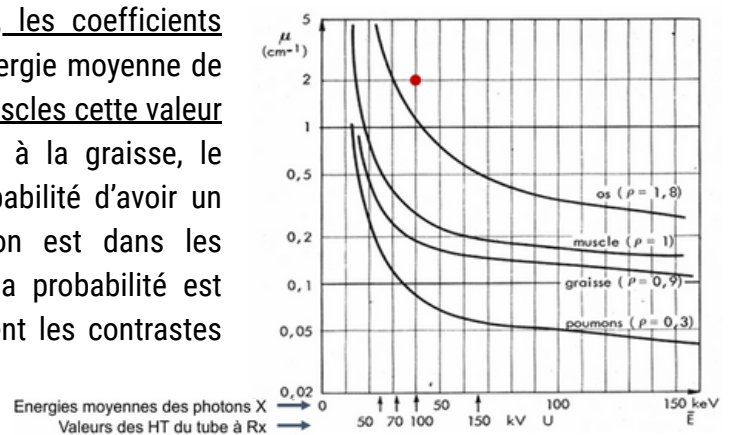
Ceci dit, il peut y avoir des **contrastes artificiels**, c'est-à-dire qu'on va pouvoir fabriquer ou renforcer des contrastes. Pour cela, on va utiliser des atomes avec un Z plus élevé, par exemple des **produits de contraste iodés : l'iode a un Z de 53.**

Voici un graph qui représente ces contrastes :

On a en **abscisse** l'énergie moyenne des photons X. On voit que pour une haute tension de 150 kV, l'énergie moyenne des rayons X est plutôt de l'ordre de 60 keV. C'est bien l'énergie maximale qui sera de 150 keV.

Sur une tension appliquée de 100 kV, qui correspond du coup à une moyenne d'énergie de 40 keV pour les rayons X, on voit qu'on a bien une distinction entre les poumons, la graisse, les muscles/tissus mous, l'os et le point à $2 \mu \rightarrow$ c'est ce qui correspondrait à l'iode (son coefficient se situe à 2, c'est-à-dire **au-delà même du coefficient d'atténuation des os**, car le Z est à 53).

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.



os
Tissus mous
eau
graisse
air

Tout ça, c'est ce qui va nous permettre d'avoir l'imagerie radiologique avec une visualisation qui va se faire en échelle de gris.

Ici on est sur une visualisation qui est inversée par rapport au film radiographique qu'on obtient initialement, c'ad que :

→ Le **blanc** = ça correspond non pas à un maximum de détection, mais plutôt à un **maximum d'atténuation**, un minimum de détection au niveau de la plaque.

→ Le **noir** = ça correspond à un maximum de détection au niveau de la plaque, donc à un **maximum de transmission** des photons.

(en gros les endroits où se trouvent les zones les plus claires correspondent aux structures les plus denses/ possédant les numéros atomiques les + grands → os++)= celles qui vont le plus atténuer de photons

On a globalement dans l'organisme **5** contrastes avec l'os, les tissus mous, l'eau, la graisse et l'air. Et on voit que quand on est au milieu, entre tissu mou, os et graisse, on a beaucoup plus de mal à faire la distinction car il y a moins de contraste que quand on compare l'os et l'air.

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.

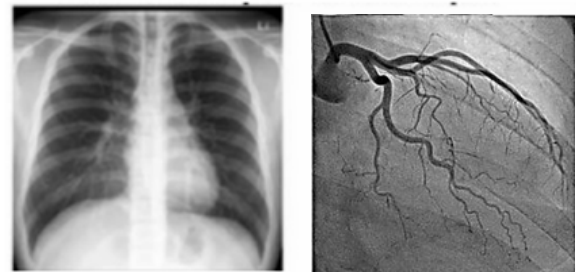
Si on veut étudier l'appareil urinaire il faudra donc utiliser un produit de contraste iodé, qui va être éliminé par les reins, et va ainsi permettre de générer un contraste entre les voies urinaires et le reste de l'abdomen.



Si on prend **une radio du thorax**, on a toujours les **structures osseuses**. On a les tissus mous et enfin le contraste au niveau des **poumons**, qui est un tissu peu dense car beaucoup d'air.

Mais on n'a aucun moyen de bien distinguer les vaisseaux cardiaques du muscle cardiaque 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.

Cependant, si on fait un cathétérisme intra-artériel et qu'on arrive au début de la coronaire gauche et qu'on injecte du produit de contraste iodé, cela va nous permettre de révéler ces artères coronaires issues de l'artère coronaire gauche. **Pour ce qui est du cathétérisme, on inverse l'échelle de gris : le noir correspond à un maximum d'atténuation et le blanc à un minimum.**



D. EXEMPLES D'APPAREILLAGES

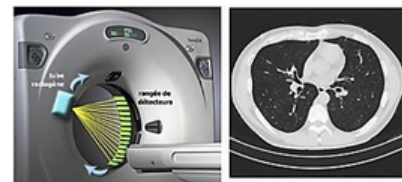
• Projection plane : radiologie conventionnelle :

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.



• Coupes : détecteur et source tournants (scanner ou tomodensitométrie) :

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/tomodensitométrie. Ici on a une image en coupe du thorax.



« tomo » ça veut toujours dire imagerie en coupe et ici « densitométrie » c'est parce qu'on fait une image de la densité des tissus.

- **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.



- **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.



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 :

A gauche on a une radiographie standard du thorax, de face et planeaire, et à droite une tomodynamométrie, 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 costophrénique**, 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)



Épanchement pleural

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 planeaire. Il va voir aussi des **nodules pulmonaires**, ces zones plus denses qui sont anormales. Donc, on a chez ce patient un cancer pulmonaire.

Il va voir aussi une **opacité anormale**, probablement **d'origine infectieuse**. Il y a finalement beaucoup d'informations dans ces contrastes radiologiques des RX.



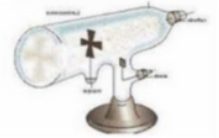
Épanchement pleural
Nodules pulmonaires

Le tutorat est un service gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.

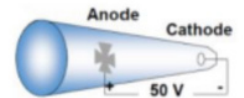
II. HISTORIQUE

A. LES EXPÉRIENCES SUR LE TUBE DE CROOKES (1875)

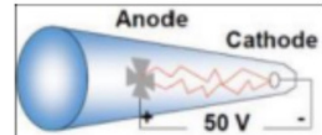
Cette histoire commence avec des expériences réalisées avec ce qu'on appelait à l'époque **le tube de Crookes**. Celui-ci était très utilisé par les physiciens au **19^{ème} siècle**. C'est une **enceinte sous verre**, dans laquelle il y avait une **anode métallique traditionnellement sous forme de croix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



Les physiciens observaient que lorsqu'on mettait **une tension de 50 volts entre l'anode et la cathode**, à pression atmosphérique, **on n'observait pas de phénomène particulier**.



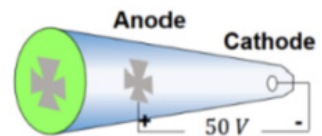
Mais ils se sont aperçus que **si on réduisait la pression atmosphérique, à partir de 10^{-2} atm** on observait des **décharges électriques**. Ils n'étaient pas capables de comprendre ce phénomène, mais ces décharges électriques sont dues à un **flux d'électrons qui va de la cathode vers l'anode**.



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.

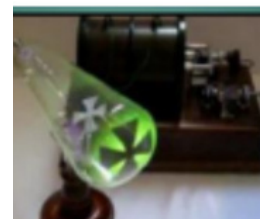
C'est donc indirectement le passage de ces électrons que voyaient les physiciens, mais bien sûr ils ne pouvaient pas l'interpréter puisqu'à cette époque on ne connaissait même pas l'existence de l'électron.

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** ($\lambda = 500-550$ nm) sous le fond du verre, avec l'ombre de la croix de Malte.



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**. (c'est pas à savoir)*



Quelques dates :

- **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 C. Roentgen** : premier qui va décrire ça comme étant des Rayons X (cf plus loin)
- **1897 Joseph John Thomson** : identifie ces particules chargées négativement : « les électrons »

B. LA DÉCOUVERTE DES RAYONS X PAR ROENTGEN (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 Bécclère** 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 ».

1ère 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 radiodermes : 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.



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 photoélectrique.

QCMs du profs+++++

QCM RX 1 : Quelle(s) est (sont) la (les) proposition(s) juste(s) à propos de l'origine des contrastes radiologiques entre deux tissus i et j ? Il y aura un contraste si, toutes choses étant égales par ailleurs :

- A- i et j ont des épaisseurs différentes
- B- i et j ont des densités différentes
- C- i et j ont des Z différents
- D- i contient du produit de contraste et j non
- E- Les propositions A, B, C et D sont fausses

QCM RX 2 : Les produits de contraste radiologique:

- A- Ne font qu'augmenter les contrastes naturels.
- B- Sont composés d'atomes riches en électrons.
- C- Atténuent les rayons X par freinage.
- D- Atténuent les rayons X par création de paires.
- E- Les propositions A, B, C et D sont fausses.

QCM RX 3 : Dans une expérience utilisant un tube de Crookes sous un vide poussé.

- A- Les électrons ne peuvent pas atteindre l'anode.
- B- On observe une fluorescence verte.
- C- Cette fluorescence verte est due aux rayons X de freinage.
- D- Cette fluorescence verte est liée aux raies caractéristiques du verre.
- E- Les propositions A, B, C et D sont fausses.

qcm pas fait en cours mais qui est sur la diapo

QCM 1 : ABCD

- A) **Vrai**
- B) **Vrai**
- C) **Vrai**
- D) **Vrai**
- E) **Faux**

QCM 2 : B

- A) **Faux** : ça modifie
- B) **Vrai** : c'est l'objectif, on a des atomes qui ont des Z élevés
- C) **Faux** : Le freinage, c'est l'interaction électron-matière. Quand on est sur des rayons X, il n'y a plus de freinage
- D) **Faux** : Non, parce que ça n'arrive jamais à la valeur seuil

QCM 3 : BD

- A) **Faux**
- B) **Vrai**
- C) **Faux**
- D) **Vrai**
- E) **Faux**

