



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE, DE
L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE

EBE PHC 2

SESSION 2016

CAPES CONCOURS EXTERNE ET CAFEP

SECTION : PHYSIQUE-CHIMIE

EXPLOITATION D'UN DOSSIER DOCUMENTAIRE

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : *La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

A

Comment voir à l'intérieur du corps humain ?

À l'aide du dossier documentaire en annexe, on se propose d'aborder le thème de l'imagerie médicale au travers de différentes activités pédagogiques et d'études scientifiques.

Le dossier documentaire est constitué de 5 annexes :

ANNEXE 1 : Les Rayons X et la radiographie

- Document 1** : Production des rayons X
- Document 2** : Que font les rayons X en traversant la matière ?
- Document 3** : Extrait du diaporama « Les rayons X »
- Document 4** : Extrait d'un cours : Bases physiques des rayons X
- Document 5** : Les constantes radiologiques
- Document 6** : Systèmes de détection
- Document 7** : Le codage numérique des couleurs
- Document 8** : Interaction des rayons X avec la matière

ANNEXE 2 : Matériel pédagogique

- Document 1** : Tâche complexe : La radiographie d'un bassin
- Document 2** : Exercice : Loi d'atténuation d'un faisceau de rayons X
- Document 3** : La main de Mme Röntgen
- Document 4** : Extrait d'un exercice du baccalauréat S (Nouvelle-Calédonie 2013)

ANNEXE 3 : La tomographie par émission de positons

- Document 1** : La production de radiotraceurs
- Document 2** : Extrait d'un document de D. Le Bars (CERMEP Lyon) sur la production du FDG
- Document 3** : Photographie d'un cyclotron à usage médical, extraite d'une présentation de la TEP par le Pr TALBOT
- Document 4** : Principe de la TEP (Tomographe par Emission de Positons)
- Document 5** : Synthèse du fluorodésoxyglucose marqué au fluor 18, le ^{18}F FDG
- Document 6** : Fluoruration en microréacteur
- Document 7** : Quelques données
- Document 8** : La rétrosynthèse : énoncé de l'exercice et copie de l'élève

ANNEXE 4 : L'imagerie par résonance magnétique (IRM)

- Document 1** : Les grands principes de l'IRM
- Document 2** : Les agents de contraste paramagnétiques du gadolinium en IRM

ANNEXE 5 : Textes réglementaires

- Document 1** : Programme d'enseignement de physique-chimie, classe terminale des séries STI2D et STL, spécialité SPCL
- Document 2** : Programme d'enseignement de spécialité de sciences physiques et chimiques en laboratoire, classe terminale de la série STL
- Document 3** : Programme d'enseignement de mathématiques, classe de terminale des séries technologiques STI2D et STL, spécialité SPCL
- Document 4** : Programme de l'enseignement de physique-chimie Classe de première de la série technologique ST2S
- Document 5** : Programme de l'enseignement spécifique et de spécialité de physique-chimie Classe terminale de la série scientifique

Comment voir à l'intérieur du corps humain ?

L'imagerie médicale est une discipline née il y a à peine plus d'un siècle. En 120 ans, elle a bénéficié des progrès de la médecine, des connaissances accumulées en sciences du vivant et des avancées technologiques en physique, en chimie, en informatique. Grâce aux différentes techniques mises au point, il est désormais possible de voir un organe, et même de le voir fonctionner, grâce à des images fixes ou animées. Le diagnostic précoce, la thérapie et son suivi chez les patients ont ainsi fait des pas de géant. (extrait du magazine « *Les Savanturiers* » n°13, ressources pédagogiques du CEA)

PARTIE 1 : Les rayons X et la radiographie

Les principes généraux de la radiographie par rayons X sont décrits dans les documents de l'annexe 1.

Étude de documents extraits de l'annexe 1 et quelques utilisations pédagogiques:

Q1. Justifier l'allure du spectre du rayonnement émis par le tube à rayons X (figure 2 du document 1 de l'annexe 1) à l'aide des interactions décrites dans le document 1 de l'annexe 1.

Q2. Illustrer par un schéma le paragraphe du document 2 de l'annexe 1, intitulé « L'atténuation par perte d'énergie : l'effet Compton »

À propos de l'extrait du diaporama *Les rayons X* (document 3 de l'annexe1)

Le filament de tungstène d'un tube de Coolidge est assimilé à un fil cylindrique de rayon r et de longueur ℓ enroulé en hélice. En régime permanent, il est parcouru par un courant électrique d'intensité I , et sa température, constante, est notée T .

La résistivité du tungstène est notée ρ .

La loi de Stefan donnant la puissance rayonnée par unité de surface pour un corps porté à la température T s'écrit :

$$P = \sigma T^4.$$

Données : $r = 50 \mu\text{m}$, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.K}^{-4}.\text{m}^{-2}$

A haute température (à 2350°C), la résistivité du tungstène est $\rho = 7,75 \times 10^{-7} \Omega.\text{m}$.

Q3. Établir, en régime permanent, l'expression suivante :

$$\frac{\rho}{2r^3} \left(\frac{I}{\pi} \right)^2 = \sigma T^4,$$

où σ est la constante de Stefan.

Calculer l'intensité du courant qui parcourt le filament lorsque sa température est de 2350°C .

Q4. Les résultats de la question Q3 illustrent la phrase de l'extrait du cours *Bases physiques des rayons X* (document 4 de l'annexe 1) : " À condition d'appliquer une ddp suffisante entre cathode et anode, l'intensité du courant dépend uniquement de la température et donc du courant de chauffage du filament (région de saturation)."

La formulation de cette phrase présente une difficulté pour le lecteur, laquelle ? Proposer une nouvelle rédaction de cet extrait de cours qui permettrait de lever cette difficulté.

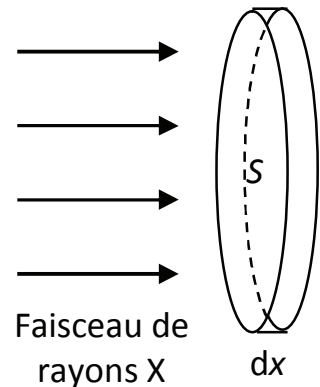
Q5. Calculer les valeurs des vitesses des électrons à leur arrivée sur l'anode, pour les diverses tensions données dans le document 5 de l'annexe 1. Commenter.

Données: $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$ kg, $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C.

À propos de l'absorption des rayons X avec la matière (document 8 de l'annexe 1)

Le faisceau de rayons X, de direction Ox, est constitué d'un flux homogène de photons. Les phénomènes de diffraction et de diffusion sont négligés.

La couche de matière d'épaisseur dx et de surface S est constituée d'un seul type d'atome. Le matériau possède une masse volumique ρ et une masse molaire M .



Q6. Exprimer le nombre dN^* d'atomes contenus dans ce volume en fonction de M , ρ , S , dx et de la constante d'Avogadro N_A .

On suppose dx suffisamment petit pour que tous les atomes de la couche soient contenus dans un même plan et on appelle r_a le rayon de ces atomes. On appelle $N(x)$ le nombre de photons incidents du faisceau de rayons X, traversant une section S du faisceau incident par unité de temps et $N(x + dx)$ le nombre de photons transmis au-delà de la couche d'épaisseur dx , par unité de temps.

Q7. Proposer un modèle simple de l'absorption permettant d'expliquer la variation de N entre x et $x+dx$.

Q8. En utilisant le modèle précédent, exprimer $N(x + dx)$ en fonction de $N(x)$, ρ , M , r_a , N_A et dx et montrer que l'équation différentielle vérifiée par $N(x)$ s'écrit :

$$\frac{dN}{dx} + \pi r_a^2 \frac{N_A}{M} \rho N = 0.$$

Q9. Donner la solution de cette équation différentielle.

On pose $N(x = 0) = N_0$ et $\mu = \frac{\pi r_a^2 N_A \rho}{M}$, appelé coefficient d'absorption.

La coordonnée $x = 0$ correspond à la face d'entrée du matériau.

À partir d'un modèle simplifié de l'atome, on montre que l'on peut exprimer le rayon r_a par la relation :

$$r_a = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z^2 e^2}{E_1},$$

expression dans laquelle Z est le numéro atomique et E_1 l'énergie du niveau fondamental des atomes considérés.

Q10. Justifier que, pour la plupart des éléments, le rapport M/Z vaut approximativement 2 g.mol^{-1} .

Comparer les expressions du coefficient d'absorption du modèle proposé et du coefficient d'absorption donné pour l'effet photoélectrique dans le document 8 de l'annexe 1.

Tâche complexe

Q11. Proposer une correction à visée formative de la tâche complexe du document 1 de l'annexe 2 pour des étudiants de licence.

Q12. À partir du document 1 de l'annexe 2 et des documents de l'annexe 1, concevoir une tâche complexe pour une classe de première ST2S sur le thème « les rayons X » (Radiographie – Radioprotection – Facteurs d'absorption des rayons X) :

- formuler une problématique;
- proposer au maximum quatre documents ressource choisis de l'annexe 1 et éventuellement modifiés;
- préciser les connaissances mobilisées par l'élève pour résoudre la tâche complexe;
- indiquer les aides possibles à apporter à l'élève au cours de la réalisation de la tâche complexe.

Exercice d'évaluation

Il s'agit dans cette partie de construire une évaluation destinée à des élèves de terminale STL à partir de l'exercice « Loi d'atténuation d'un faisceau de rayons X » présenté dans le document 2 de l'annexe 2. On s'appuiera sur les documents des annexes 1, 2, 5 et sur des connaissances scientifiques.

Q13. Résoudre l'exercice du document 2 de l'annexe 2 et préciser pourquoi il ne peut pas être proposé en l'état aux élèves.

Q14. Apporter la (les) modification(s) nécessaire(s) à l'énoncé et au questionnement de cet exercice pour qu'il soit adapté aux classes de terminale STI2D et STL, spécialité SPCL.

Q15. Comment justifier auprès d'un élève les variations du coefficient μ présentées dans le document ?

Q16. Quelles compétences sont développées lors de la résolution de cet exercice? On ne se limitera pas aux compétences propres à la physique-chimie.

Analyse de documents (documents 6 et 7 de l'annexe 1).

Les radiographies actuelles sont des images numériques codées en niveaux de gris, les documents 6 et 7 de l'annexe 1 décrivent leur élaboration.

Q17. Comment est réalisé le codage en niveaux de gris à partir du codage RVB 24 bits ?

Q18. Justifier le nombre de nuances de gris pouvant être codées à partir du codage RVB 24 bits.

Q19. Pourquoi un codage en niveaux de gris est-il suffisant dans le cas de la radiographie?

Deux clichés radiographiques sont présents dans l'annexe 2 : la radiographie d'un bassin (document 1) et l'image de la main d'Emma Röntgen (document 3).

Q20. Quelles différences constate-t-on entre ces deux images ? Les expliquer.

PARTIE 2 : La tomographie par émission de positons (TEP)

Les principes généraux de la tomographie par émission de positons sont décrits dans les documents de l'annexe 3.

En complément à la description du principe d'un cyclotron figurant dans le document 1 de l'annexe 3 on rappelle que, dans un champ magnétique uniforme B , une particule de masse m et de charge q animée d'une vitesse v décrit une trajectoire circulaire de rayon

$R = \frac{mv}{qB}$ à la vitesse angulaire $\omega_c = \frac{qB}{m}$, appelée "pulsation cyclotron". On se limite à une description classique.

Q21. Analyser le schéma du cyclotron donné dans le document 1 de l'annexe 3, et apporter les corrections qu'il faudrait apporter avant de le fournir à des élèves.

Q22. Exprimer en la justifiant la pulsation du champ électrique permettant une accélération de la particule à chaque passage entre les deux parties hémicylindriques du cyclotron. Le champ magnétique, uniforme, ne règne qu'à l'intérieur des deux cavités hémicylindriques, alors que le champ électrique, uniforme et dépendant sinusoïdalement du temps, ne règne qu'entre ces deux cavités.

Q23. Montrer que la dimension des cyclotrons à usage médical déduite du document 2 de l'annexe 3 est cohérente avec la photographie présentée dans le document 3 de l'annexe 3.

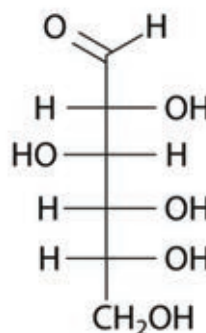
On donne pour le proton $m_p = 1,67 \times 10^{-27}$ kg, $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C.

Q24. Estimer la valeur du champ magnétique nécessaire à l'obtention du faisceau de protons décrit dans le document 2 de l'annexe 3. Commenter.

La TEP tomographie par émission de positons (ou positron) est une technologie de médecine nucléaire qui utilise des molécules marquées, principalement le

fluorodésoxyglucose FDG. Nous nous intéressons ici à quelques éléments de la synthèse du FDG.

Dans l'enseignement secondaire, la molécule de glucose est généralement représentée sous sa forme ouverte (voir la représentation ci-contre).



Formule du D-glucose
(en représentation de
Fischer)

Or, cette molécule existe le plus souvent sous une forme cyclique à six chaînons, le pyranose.

La cyclisation conduit à 2 stéréoisomères de configuration, appelés anomères α et β du glucose. La molécule représentée dans le document 5 de l'annexe 3 est l'anomère α -D-glucose.

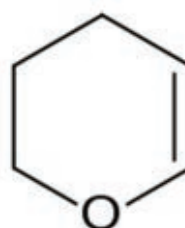
Q25. Expliquer pourquoi cette cyclisation conduit à deux stéréoisomères.

Q26. Représenter l'anomère β -D-glucose. Laquelle des deux formes α ou β est la plus stable ? Justifier.

Les deux anomères α et β du glucose sont isolables purs à l'état solide. On peut mesurer le pouvoir rotatoire spécifique à 25°C pour la raie D (jaune) du sodium, exprimé en unités polarimétriques, de chacune des espèces soit pure, soit en solution aqueuse. En solution aqueuse, il y a interconversion des formes α et β du D-glucose. Si l'on dissout l' α -D-glucose dans l'eau, son pouvoir rotatoire spécifique diminue de sa valeur initiale $+112^\circ \cdot \text{dm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$, correspondant à l'espèce pure, à une valeur d'équilibre $+52^\circ \cdot \text{dm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$; si l'on part de l'espèce pure β -D-glucose, son pouvoir rotatoire spécifique, qui est initialement de $+19^\circ \cdot \text{dm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$ augmente jusqu'à atteindre la même valeur d'équilibre $+52^\circ \cdot \text{dm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$.

Q27. Déterminer le pourcentage à l'équilibre de la forme α ou de la forme β dans une solution aqueuse de D-glucose.

Avant d'effectuer la synthèse du ^{18}F FDG il est nécessaire de protéger les groupes hydroxyle du D-glucose. Il est possible de protéger un alcool sous forme d'acétal en utilisant le dihydropyrane (DHP) en milieu acide.



dihydropyrane
(DHP)

Q28. Pourquoi cette protection est-elle nécessaire ? Comment la déprotection est-elle ensuite effectuée ? (seul le type de réaction est demandé).

Q29. Pour quelle(s) raison(s) le fluor 18 est-il préférentiellement utilisé comme traceur radioactif dans la tomographie par émission de positons ?

La synthèse par voie électrochimique du ^{18}F FDG s'effectue dans un microréacteur décrit dans le document 6 de l'annexe 3.

Q30. Estimer la surface minimale de refroidissement de l'échangeur thermique qui permettra d'évacuer l'énergie libérée par la réaction de synthèse du ^{18}F FDG moyennant une différence de température de l'ordre de 10 °C entre le fluide caloporteur et le milieu réactionnel. Préciser si besoin les hypothèses nécessaires à la résolution du problème et apporter un regard critique au résultat obtenu.

Pour cette question, faisant appel à une démarche de résolution de problème, vous pourrez vous appuyer sur les données fournies dans l'ensemble de l'annexe 3 et sur vos connaissances. Les éléments de réponse à cette question seront très significativement valorisés lors de l'évaluation des résultats.

Afin de conclure la partie « Sélectivité en chimie organique » du programme de terminale S, une professeure propose un exercice sur la protection de fonctions. Cet exercice, qui porte sur la rétrosynthèse, et la copie rédigée par un élève figurent dans le document 8 de l'annexe 3.

Q31. Relever les erreurs figurant sur cette copie d'élève. Pour chacune de ces erreurs, formuler les conseils nécessaires à noter sur la copie dans le but de faire progresser l'élève.

PARTIE 3 : L'imagerie par résonance magnétique

Les principes généraux de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) sont décrits dans le document 1 de l'annexe 4.

Q32. Le document 4 de l'annexe 2 est un extrait d'exercice de baccalauréat. Rédiger une correction de cet extrait d'exercice et proposer, en le justifiant, un barème sur 10 points.

Q33. Comme ceux de Johan Gadolin, les travaux des chimistes Marie Curie, Antoine-Laurent Lavoisier, Dimitri Mendeleïev ont concerné les éléments chimiques. Sur un axe chronologique, indiquer la période correspondant aux travaux de ces trois chimistes et préciser succinctement la nature de leur contribution.

Q34. Justifier à l'aide du document 2 de l'annexe 4 que le gadolinium III Gd^{3+} , par sa configuration électronique, constitue un agent de contraste particulièrement adapté à l'IRM.

Q35. Un professeur de terminale STL souhaite illustrer son cours d'enseignement de sciences physiques et chimiques en laboratoire sur les complexes en chimie à partir de l'exemple du gadolinium. En utilisant le document 2 de l'annexe 4, proposer un exercice comprenant un énoncé succinct et trois questions développant des capacités exigibles du programme de physique-chimie ainsi que leur corrigé.

ANNEXE 1 : Les rayons X et la radiographie

Document 1 : Production des rayons X

On obtient des rayons X par bombardement de la matière, généralement un métal, par des électrons. Lors de l'interaction, l'électron pénètre dans le métal de la cible où il subit une décélération brutale. La perte d'énergie cinétique de l'électron est convertie à 99% en énergie thermique et à 1% en rayonnement X.

La naissance des rayons X est due à deux interactions différentes :

- L'une avec le noyau des atomes constituant la cible. Cette interaction de type électrostatique entre l'électron et le noyau conduit à une déviation de la trajectoire de l'électron (figure 1). Lorsqu'une charge électrique est accélérée, elle rayonne de l'énergie électromagnétique : on parle ici de rayonnement de freinage (ou *brehmsstrahlung* en allemand).

- La seconde avec les électrons des atomes constituant la cible : lorsque l'énergie des électrons incidents est supérieure à l'énergie de liaison d'un électron lié au noyau, ce dernier est arraché de l'atome. S'il s'agit d'un électron des basses couches énergétiques de l'atome, celui-ci devient alors instable et il y a réarrangement du nuage électronique (un ou plusieurs électrons transitent vers des niveaux énergétiques plus faibles), provoquant l'émission de photon X ; ce rayonnement est qualifié de *rayonnement par fluorescence*.

Le spectre d'émission de rayons X d'un métal donné se présente comme la superposition d'un spectre continu et d'un spectre de raies (figure 2).

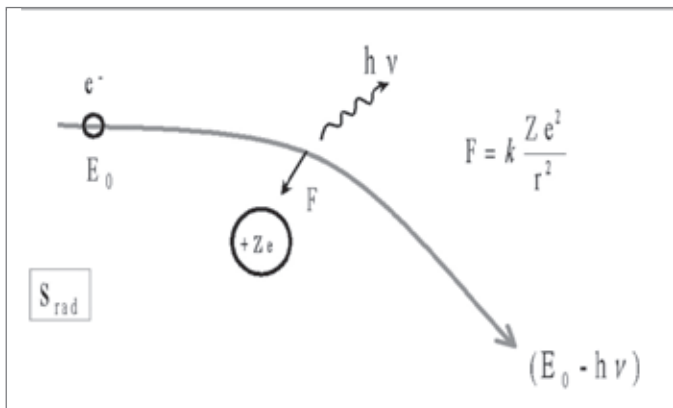


Figure 1 - Interaction électron-noyau : le rayonnement de freinage

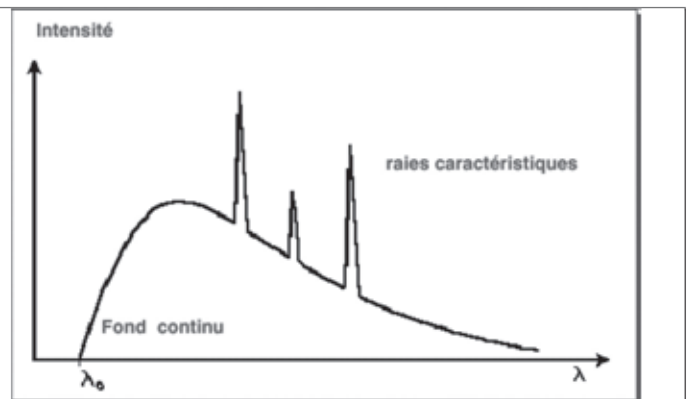
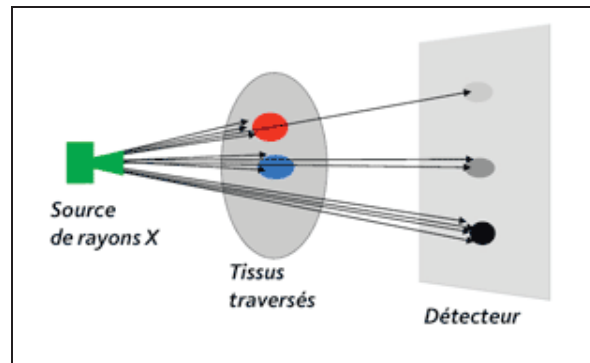


Figure 2 - Spectre d'un tube à rayons X

Document 2 : Que font les rayons X en traversant la matière ?

Source : <http://rayons-sante.com/rayonnements-sante/les-mots-pour-le-dire/article/que-font-les-rayons-x-en>

Le principe de la radiographie est fondé sur la différence d'absorption des rayons X par les différents tissus du corps humain. En d'autres termes, l'atténuation des rayons X varie avec les structures rencontrées. Que se passe-t-il concrètement, au niveau atomique ?



Dans la gamme d'énergie des photons X utilisés en radiographie (de 20 à 130 keV), il existe deux mécanismes d'atténuation, qui correspondent à la rencontre des photons avec les électrons liés aux atomes : l'atténuation par effet photoélectrique et l'atténuation par effet Compton. Deux autres effets existent (diffusion Rayleigh-Thomson) mais n'interviennent pas en radiographie.

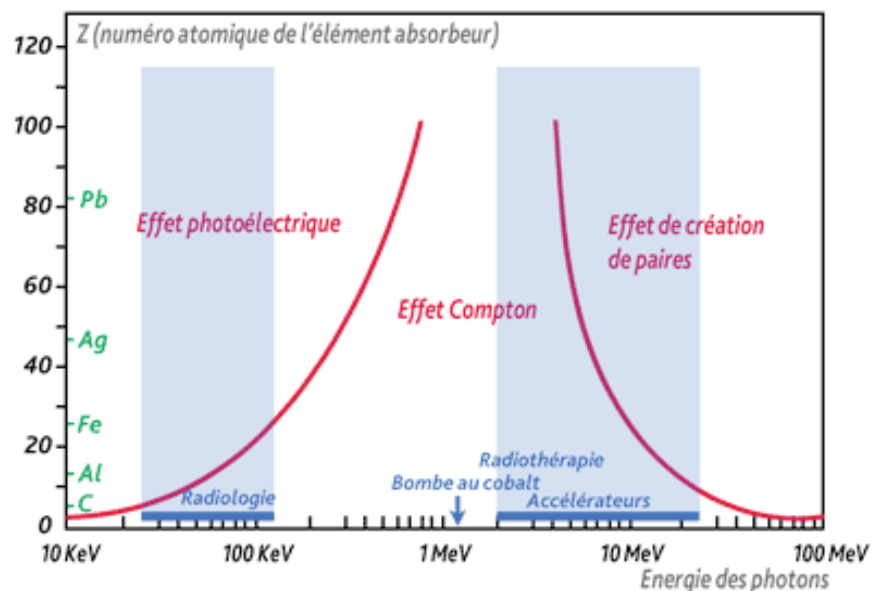
L'atténuation par absorption : l'effet photoélectrique

En frappant un électron, le photon X lui cède toute son énergie et l'éjecte. Le photon X est absorbé et l'atome est ionisé. L'électron éjecté est appelé "photoélectron". Pour que l'effet photoélectrique se produise, il faut que l'énergie E du photon incident soit supérieure à l'énergie de liaison W de l'électron.

L'atténuation par perte d'énergie : l'effet Compton

Quand le photon X a une énergie bien supérieure à celle des électrons, il ne cède qu'une partie de son énergie à l'électron qu'il rencontre. L'électron est éjecté (c'est un "photoélectron") et l'atome est ionisé. Quant au photon X, il est dévié, et poursuit sa route avec une énergie inférieure. C'est une diffusion appelée "effet Compton".

Prédominance des effets en fonction de l'élément absorbeur et de l'énergie des photons. Seuls les effets photoélectriques et Compton interviennent en radiographie.



Production des rayons X

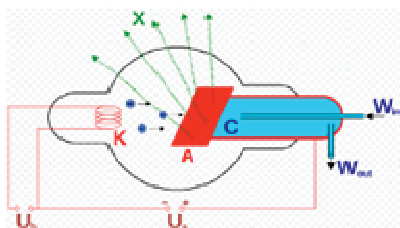
Tube de Coolidge

Tube à vide contenant un filament chauffé par une basse tension (BT) et une anode (masse métallique) portée à une forte tension positive (haute tension HT) par rapport au filament.

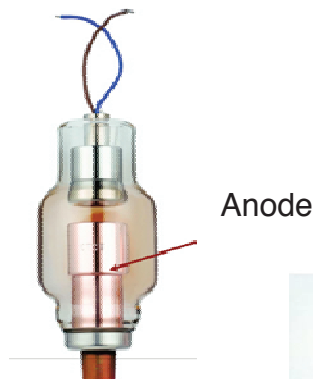
1. Production d'électrons par un filament conducteur chauffé à rouge (effet thermoionique)

2. Attraction des électrons vers une cible métallique portée à une très forte tension positive (anode=anti cathode) par rapport au filament

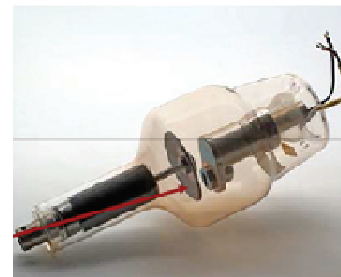
3. Décélération brutale des électrons lors de leur arrivée sur l'anode. L'énergie cinétique se transforme en chaleur (beaucoup) et rayons X (un peu).



Quelques tubes à rayon X



Anode tournante
Pour mieux évacuer la chaleur



Que peut-on régler sur un tube à rayons X?

1 La tension entre l'anode et la cathode

de façon directe en modifiant la tension d'alimentation

2 L'intensité qui traverse le tube entre anode et cathode

de façon indirecte en modifiant le chauffage du filament (plus la température du filament est élevée, plus l'intensité qui traverse le tube est élevée)

Effets de l'intensité sur le spectre

L'intensité électrique qui traverse le tube détermine l'amplitude du spectre.

Une diminution de l'intensité aplatit le spectre, une augmentation surélève le spectre.

L'intensité qui traverse le tube modifie l'intensité du faisceau X sans modifier sa qualité

Intensité=quantité de rayons X

À condition d'appliquer une ddp suffisante entre cathode et anode, l'**intensité** du courant **dépend uniquement de la température** et donc du courant de chauffage du filament (région de saturation).

Document 5 : Les constantes radiologiques

Sources : <http://www.sfrnet.org/Data/upload/files/Le%20rayonnement%20X.pdf>
<http://coolidge.canalblog.com/archives/2012/02/12/23506529.html>

Extrait d'un blog : Ma vie est un rayon X

Le manip radio c'est le technicien qui utilise les rayons X (entre autres). Quand un manip radio fait un cliché radiologie (par exemple, un poignet, un poumon, abdomen...) il choisit ses constantes radiologiques à savoir les milliampères (mA) et le temps d'exposition (seconde) aussi appelés les mAs (produit mA x temps d'expo), et le kilovoltage (kV). Les kV correspondent à la haute tension appliquée au tube (au générateur quoi). Les mAs correspondent à la quantité de rayons X produits.

Pour un manip, les kV et les mAs sont les deux notions importantes à connaître quand on fait un cliché.

Histoire de voir les constantes utilisées par le manip, voici un petit tableau récapitulatif :

Poumons	120 kV	2-3 mAs
Fémur	70 kV	75 mAs
Clavicule	45 kV	50 mAs

Document 6: Systèmes de détection

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Radiographie>

Dans certains systèmes dits indirects, l'information relative à l'exposition du détecteur aux photons est contenue sous forme d'une image latente (virtuelle). Celui-ci doit subir une opération spécifique afin de transformer cette image latente en une image réelle. Des systèmes directs, plus modernes, permettent de transformer instantanément l'information reçue par le détecteur en image. Chaque détecteur est caractérisé par sa courbe sensitométrique, qui définit l'exposition du détecteur nécessaire à l'obtention d'un certain niveau de gris sur l'image.

Couple écran-film

La radiographie analogique utilise comme détecteur le couple écran-film. Le film photographique fut le premier détecteur à être utilisé en radiographie, dès la découverte des rayons X. Il est sensible à la lumière et aux rayons X dans une moindre mesure. Il contient une émulsion contenant des cristaux d'halogénure d'argent (souvent de bromure d'argent). Ces cristaux, soumis aux photons, se dissocient en ions par effet photolytique créant ainsi une image latente.

L'image latente est transformée en image réelle après plusieurs étapes se déroulant dans l'obscurité ou sous une lumière inactinique. La **révélation** est réalisée en plongeant le film dans une solution basique qui réduit les ions argent. La **fixation** de l'image est obtenue en plongeant le film dans une solution acide permettant de stopper ces réactions de réduction.

Pour améliorer la sensibilité du film aux rayonnements très pénétrants que sont les rayons X ou gamma, il est couplé à des écrans renforçateurs, disposés de part et d'autre du film. Ils sont constitués de sels fluorescents qui convertissent les rayons X en photons lumineux. Le couple écran film est disposé à l'abri de la lumière, dans une cassette qui est placée derrière l'objet à radiographier. Le couple écran film, seul détecteur analogique, est resté longtemps une référence en radiographie du fait de son excellente résolution spatiale et de sa bonne sensibilité. Néanmoins, il est de moins en moins utilisé, au profit des systèmes de détection numériques qui permettent de délivrer des doses moins importantes au patient tout en conservant une qualité d'image suffisante à un diagnostic.

Capteur plan

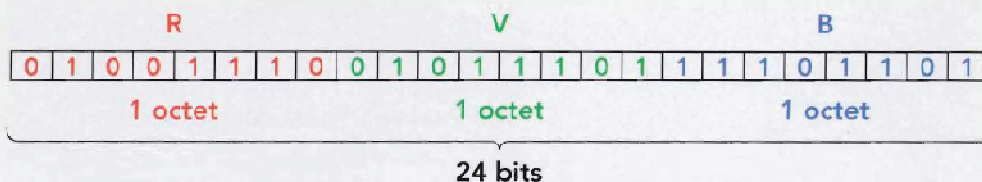
La radiographie numérique directe ou *Direct Radiography* (DR) utilise comme détecteur le capteur plan (diodes assurant la conversion directe lisible par circuit électronique), dernier cri de l'imagerie médicale directe. Dans ce dernier cas, l'image générée par les rayons X au niveau de la couche d'iodure de césium est transformée en signaux électriques par une matrice de photo-transistors (2048 × 1536 pixels pour une surface de détection de 40 × 30 cm) qui a l'avantage de ne présenter aucune distorsion géométrique (effet coussin) contrairement aux amplificateurs de luminance qui utilisent des lentilles / miroirs pour focaliser l'image sur le capteur. De plus le faible poids et l'encombrement réduit de ces équipements de dernière génération permettent leur intégration dans le matériel de radiothérapie, autorisant entre autres le positionnement précis du patient sur la table de traitement grâce à un logiciel spécifique comparant les images obtenues en temps réel (pas de développement de film) avec des images de références prises lors de la planification du traitement.

Document 7 : Le codage numérique des couleurs

Source : TS Physique Chimie (extrait), enseignement spécifique, Collection Dulaurans Durupthy, Hachette éducation

3.1 Le codage des pixels en couleur

► Parmi les différents types de codages, le codage RVB 24 bits est le plus utilisé. Chaque sous-pixel est codé sur un octet, constitué par une séquence de huit bits. Un bit ne pouvant prendre que deux valeurs (0 ou 1), la plus petite valeur possible d'un octet est 00000000 et la plus grande 11111111. En numération décimale, un octet peut donc prendre toutes les valeurs entières possibles entre 0 et 255.



Pour réduire la longueur de l'écriture des codages, on utilise aussi l'écriture hexadécimale (en base 16). On peut aisément passer d'une écriture à une autre à l'aide de certains tableurs, calculatrices ou applications en ligne

► La couleur de la lumière colorée émise par chaque sous-pixel peut ainsi être décomposée en 256 nuances différentes.

On aura donc pour un pixel :

$$256 \times 256 \times 256 = 16\,777\,216 \text{ couleurs,}$$

soit environ 16 millions de couleurs.

► Chaque pixel d'une image peut ainsi être codé.

Par exemple,

- les pixels noirs sont codés **R0 V0 B0**;
- les pixels rouges sont codés **R255 V0 B0** (ils n'émettent que de la lumière rouge);
- les pixels jaunes sont codés **R255 V255 B0** (rouge et vert);
- les pixels oranges sont codés **R255 V171 B0** (rouge et vert);
- les pixels blancs sont codés **R255 V255 B255**;
- etc.

3.2 Le codage en niveaux de gris

En codage RVB 24 bits, il est possible de réaliser 256 nuances de gris en affectant la même valeur à chaque sous-pixel

Par exemple,

- un pixel noir est codé **R0 V0 B0**;
- un pixel blanc est codé **R255 V255 B255**;
- un pixel gris est codé **R64 V64 B64** (plus le gris est sombre, plus la valeur commune aux trois sous-pixels est faible).

Document 8 : Interaction des rayons X avec la matière

Source : Mesures Physiques Annecy – Philippe Galez -2011

Structure et Propriétés des Matériaux / Diffraction des Rayons X par la Matière Ordonnée / Compléments

Soit un faisceau de rayons X monochromatiques d'intensité I_0 tombant sur un matériau homogène d'épaisseur L (Fig. 2). On se propose de déterminer l'intensité transmise I c'est à dire l'énergie par unité de temps et de surface du rayonnement qui ne subit aucune transformation (même longueur d'onde et même direction).

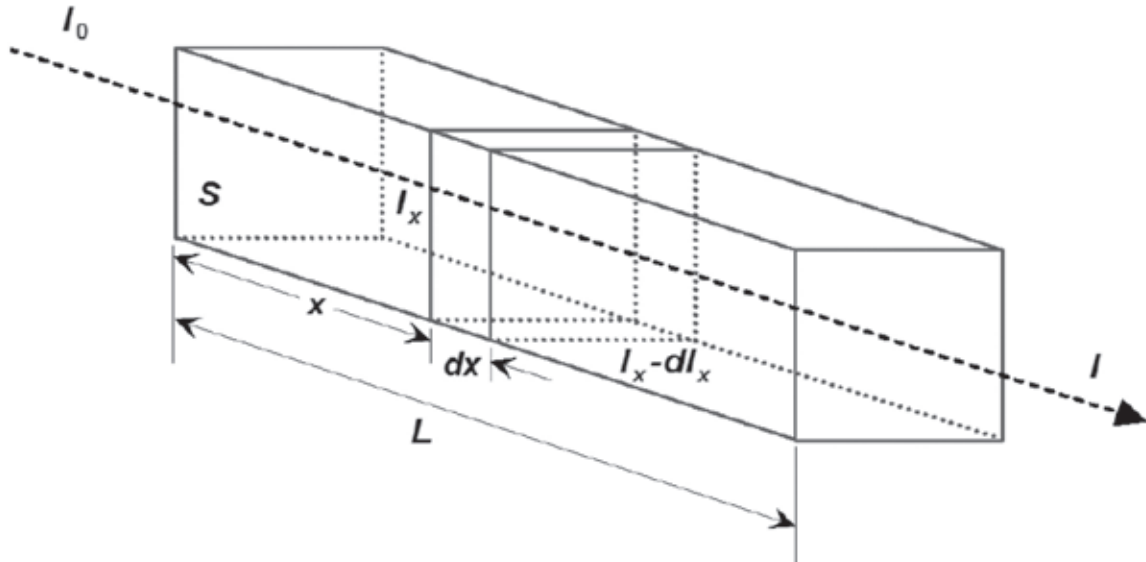


Figure 2. Absorption des rayons X par la matière.

I_x est l'intensité transmise après la traversée d'une épaisseur x de matériau. L'énergie par unité de temps perdue dans la tranche dx infiniment fine est alors proportionnelle à l'énergie par unité de temps incidente en x et à l'épaisseur de la tranche :

$$S dI_x = -\mu I_x dx \quad (\text{équation 3})$$

μ (m^{-1}) est un coefficient dépendant des effets photoélectrique et Compton :

$$\mu = \mu_{\text{photoélectrique}} + \mu_{\text{Compton}}$$

Contribution de l'effet photoélectrique : $\mu_{\text{photoélectrique}} = C \frac{\rho Z^3}{E^3}$ avec ρ masse volumique du milieu traversé, Z numéro atomique du milieu traversé, E énergie des photons et C constante.

Contribution de l'effet Compton : μ_{Compton} dépend du numéro atomique du milieu traversé et dépend peu de l'énergie des photons.

	Poumons	Graisse	Muscle	Os	Source - Imagerie radiologique - Notes de cours - André Aurengo
Z _{moyen}	7	6,5	7	20	
Z est le numéro atomique. Le "Z moyen" est la moyenne des Z des éléments chimiques composant la matière traversée.					