

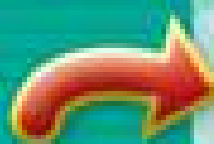
PACES

Salah Belazreg
Rémy Perdrisot
Jean-Yves Bonnaud

Biophysique

UE3

- Un cours complet
- De nombreuses illustrations
- Des conseils pour le concours
- De nombreux QCM et exercices extraits d'annales
- Tous les corrigés détaillés



Avec ce livre,
des concours blancs corrigés
en complément sur le web

3^e édition

EdiScience

Tutorat Associatif Toulousain

133, Route de Narbonne
31062 TOULOUSE CEDEX

P A C E S

2020 - 2021



UE 3 : Biophysique

– SOMMAIRE –

RAYONNEMENTS IONISANTS	7
FICHE DE COURS	7
QCM: L'atome (14 QCM)	67
CORRECTION DES QCM (Atomes)	70
QCM: Radioactivité et transformations isobariques (18 QCM)	73
CORRECTION DES QCM (Radioactivité et transformations isobariques)	78
QCM: Interactions photons-matière (9 QCM)	83
CORRECTION DES QCM (Interactions photons-matière)	85
QCM: Interaction électrons-matière (11 QCM)	87
CORRECTION DES QCM (Interactions électrons-matière)	90
QCM: Production de rayons X de freinage (10 QCM)	93
CORRECTION DES QCM (Production de rayons X de freinage)	96
QCM: Les détecteurs (11 QCM)	99
CORRECTION DES QCM (Les détecteurs)	102
QCM: Exposition aux RI (14 QCM)	105
CORRECTION DES QCM (Exposition aux RI)	108
OPTIQUE	111
FICHE DE COURS	111
QCM (14 QCM)	141
CORRECTION DES QCM	146
MAGNÉTOSTATIQUE ET RMN	151
FICHE DE COURS	151
QCM (22 QCM)	159
CORRECTION DES QCM	165
ANNALES DU TUTORAT	170
CORRECTION ANNALES DU TUTORAT	181

RAYONNEMENTS IONISANTS

FICHE DE COURS

I. L'énergie d'une particule et d'une onde électromagnétique

Avant-propos : Toute impasse sur la moindre formule dans les chapitres qui suivent coûtera des places. Il est vivement recommandé de les connaître sur le bout des doigts !

Qu'est ce que l'énergie ?

L'**énergie** est ce qui est **capable de produire un changement** (ex : élévation de température, déplacement d'une voiture, évolution d'une réaction chimique.), c'est un phénomène mesurable, exprimé la plupart du temps en Joules (J) ou en électron-volt (eV). L'énergie est une grandeur qui se conserve.

Celle-ci peut se présenter sous plusieurs formes, qui seront abordées ici successivement et non exhaustivement.

1) Énergie d'un corps en mouvement

On considère que l'énergie appliquée sur un corps (E_T) (un objet, une voiture, une personne) en l'absence de frottements est définie par son **énergie potentielle** (E_p) et son **énergie cinétique** (E_C) :

- **$E_T = E_p + E_C = \text{constante}$**

Pour un système isolé, E_p et E_C varient en sens inverse. Si E_p augmente alors E_C diminue et inversement.

a) Dynamique classique (Lois de Newton, $v \ll c$)

Énergie potentielle :

C'est une énergie qui a une valeur mécanique, et qui est échangée par un corps qui se déplace en étant soumis à une certaine force. Elle est liée au travail qu'il faut fournir pour déplacer ce corps.

Ex: Un objet que l'on soulève au dessus de sa tête présente, par rapport au niveau de base (ici le sol) une certaine énergie potentielle qui est proportionnelle à sa hauteur et à sa masse.

Il est important de noter qu'un système tend toujours vers une position où son énergie potentielle est minimale.

Énergie cinétique :

C'est l'énergie possédée par un corps ayant un mouvement rectiligne.

On l'exprime par la formule: **$E_C = \frac{1}{2}.mv^2$**

Valeurs numériques :

Comme expliqué précédemment, l'unité SI (Système International) de mesure de l'énergie est le Joule, mais on utilise le plus souvent l'électron-volt, plus pratique. Il est important de noter que:

$$1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$$

$$\text{Avec : } 1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV et } 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

b) Dynamique relativiste ($v \sim c$)

Il faut savoir que les principes et formules précédent(e)s ne s'appliquent plus dans le cas de particules/objets ayant une **vitesse proche de celle de la lumière** ($v > 10\%$ de c).

On utilise alors : $E_{\text{totale relativiste}} = \gamma \cdot mc^2$

On peut démontrer que : $E_{\text{totale relativiste}} = E_{\text{cinétique relativiste}} + E_{\text{de la particule au repos}}$

$$\text{soit } E_{\text{totale relativiste}} = (\gamma - 1) mc^2 + mc^2$$

$$\text{Ainsi : } l'E_{\text{cinétique relativiste}} = (\gamma - 1) mc^2 \text{ et } l'E_{\text{de la particule au repos}} = mc^2$$

$$\text{Rq: } \gamma \text{ est le facteur de Lorentz } \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Rq : $\frac{v^2}{c^2}$ Ce facteur est à utiliser dans les QCMs. Ici c représente la vitesse de la particule et c la vitesse de la lumière dans le vide. La vitesse de la particule est généralement exprimée en pourcentage de c (ex : $v = 0,9 \cdot c$). Cette expression permet de simplifier le quotient

$$\bullet \text{ Ex : } \frac{v^2}{c^2} = \frac{(0,9 \times c)^2}{c^2} = \frac{0,9^2 \times c^2}{c^2} = 0,9^2$$

Énergie potentielle de masse :

La masse d'un système est une forme d'énergie. On en déduit donc qu'une particule/un objet au repos (où $v = 0$) a une énergie $E_0 = mc^2$ car dans ce cas, γ vaut 1. Donc, sachant que la constante « c »

(correspondant à la célérité de la lumière dans le vide) voit sa valeur fixée à $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, on en déduit qu'ici, l'énergie potentielle ne dépend que de la masse m de la particule/de l'objet. Cela explique que **la masse d'un système est une forme d'énergie!!**

$$1 \text{ uma} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

On retiendra l'équivalence masse-énergie suivante:

Rq: uma = unité de masse atomique

(les mots « masse » et « énergie » sont utilisés indifféremment par le prof)

Énergie cinétique :

Dans le cas des faibles vitesses, on retiendra qu'en pratique l'approximation de la mécanique classique est valable. Dans le cas des grandes vitesses (celles des particules), la formule précédente montre qu'il n'est pas possible qu'une particule de masse non nulle ait une vitesse supérieure à c .

Lorsque v tend vers c le facteur de Lorentz tend vers l'infini. Cela signifie qu'il faudrait apporter une énergie infinie à la particule de masse non nulle pour qu'elle atteigne la vitesse de la lumière.

Nota bene : La dynamique classique est une approximation de la dynamique relativiste $\frac{c}{10}$ (à 1% près, c'est donc très proche). La dynamique relativiste est applicable dans tous les cas, mais la dynamique classique étant plus simple il vaut mieux l'utiliser (et c'est ce que l'on attend de vous) dès que possible. C'est à dire aux vitesses inférieures au dixième de la célérité de la lumière : $v < 10\%$ de c

2) Énergie d'une onde électromagnétique

La nature de la lumière est un phénomène complexe, celle-ci peut s'interpréter soit comme une **onde électromagnétique**, soit comme un flux de particules appelé des **photons**. Elle présente ainsi une dualité par son aspect à la fois **ondulatoire** et **corpusculaire**. Le premier aspect peut être mis en évidence par les phénomènes de **diffraction**, d'**interférences** et de **polarisation**, le second aspect par **l'effet photoélectrique** et **l'effet Compton**.

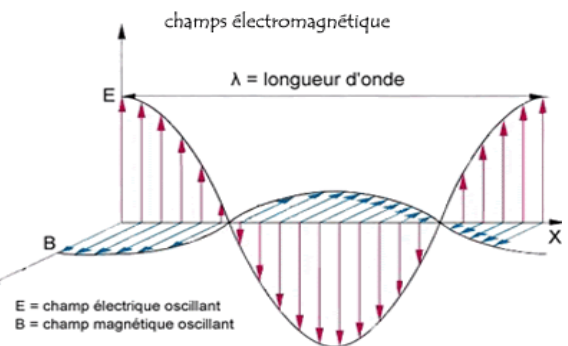
Elle présente également un aspect géométrique et un aspect vectoriel mais ceux-ci ne seront pas abordés ici (ouf).

a) Aspect ondulatoire

Cette onde électromagnétique qu'est la lumière est une onde progressive, constituée d'un couple de champs :

- un **champ électrique**
- un **champ magnétique**

Ceux-ci sont **orthogonaux** (« perpendiculaires »), **en phase**, et **proportionnels**.



L'onde se déplace donc selon un mouvement périodique, où deux constantes sont à prendre en compte :

- la **longueur d'onde** notée λ , dont l'unité est une unité de longueur (**nm**)
- la **fréquence** notée ν (nu) ou f , dont l'unité est l'inverse de l'unité de temps (souvent : **s⁻¹** ou **Hz**), on rappellera que la fréquence est l'inverse de la période notée T qui est exprimée en s. ($\nu = 1/T$).

Ces 2 constantes sont liées par la formule suivante: $\boxed{Y = c / \lambda}$ ou $\lambda = cT$

b) Aspect corpusculaire ou quantique

L'énergie d'un rayonnement électromagnétique se définit par la relation : $\boxed{E = h\nu}$

h correspond à la **constante de Planck**, qui a une valeur constante ($= 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s)

L'énergie d'une particule est donc liée à la fréquence de l'onde qui lui correspond, et donc à sa longueur d'onde :

→ A chaque longueur d'onde (donc à chaque fréquence), on associe une certaine énergie, dont l'unité est l'électron-volt !

On montre que :

$$\boxed{E(\text{keV}) = 1,24 / \lambda (\text{nm})}$$

Cette formule est plus simple à manipuler que celle avec la constante de Planck.

Cependant attention aux unités !!!!!!!

A retenir :

- Plus la **fréquence augmente**, plus l'**énergie augmente**. (il y a proportionnalité)
- Plus la **longueur d'onde augmente**, plus l'**énergie diminue** (Puisque la fréquence est l'inverse de la longueur d'onde).

/!\ une onde de grande fréquence aura une petite période ainsi qu'une petite longueur d'onde !

On le retrouve facilement en combinant nos 2 formules :

$$v = c / \lambda \quad \& \quad E = h\nu$$

Tel que : $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

3) Énergie de liaison d'un électron

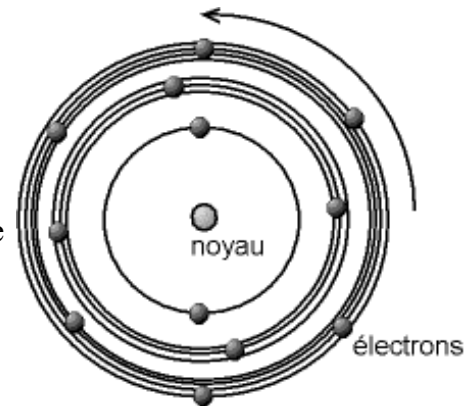
Un atome est composé de deux parties :

Un noyau (positif), contenant des protons (n° atomique : Z) et des neutrons (N)

Un nuage électronique (négatif)

Les électrons, dans le cas d'électrons non libres, gravitent sur des couches réparties « concentriquement » autour du noyau: K, L, M, ... (Pour donner une représentation imagée, on peut imaginer un caillou lorsqu'il entre en contact avec la surface de l'eau: le caillou représente le noyau, et les ondes se formant autour représentent les couches électroniques.)

=> Cela correspond à la représentation du **modèle de Bohr**.



Qu'est-ce que l'énergie de liaison ?

C'est l'énergie nécessaire pour **dissocier un système de particules qui sont en interaction**. (Par exemple, dans la vie courante, lorsqu'on tire sur la queue d'une pomme, celle-ci est arrachée lorsque l'énergie fournie est supérieure à l'énergie de liaison qui lie la queue au fruit).

Dans le cas de l'atome, c'est l'énergie qu'il faut fournir pour que l'électron concerné ne soit plus lié au noyau, et devienne alors un **électron libre**.

Autrement, pour calculer l'énergie de liaison d'un électron, il faut faire :

Énergie de l'électron libre – Énergie de liaison de l'électron concerné (ϵ_L)

Où l'énergie de l'électron libre est, comme vu précédemment, **liée à sa masse** ($E=mc^2$) et est égale à **0,511 MeV/c²**. On en déduit donc que l'énergie d'un électron lié est toujours $< 0,511 \text{ MeV}/c^2$!

Plus l'électron sera sur une **couche interne**, plus son énergie de liaison devra être **importante** car pour rompre la liaison « électron-noyau », il faudra « aller chercher l'électron au fond » pour **l'arracher au noyau**, ce qui nécessite plus d'énergie que pour rompre la liaison d'un électron en surface qui sera, lui, peu lié. (Interaction électron-noyau beaucoup moins forte.)

A retenir :

Plus un atome contient d'électrons (Z élevé), plus l' ϵ_L des électrons internes est forte.

Plus un électron est externe, moins il est attiré par le noyau et plus son ϵ_L est faible.

L'énergie de liaison (ϵ_L) est caractéristique de la couche d'un atome.

L' ϵ_L augmente lorsque le noyau comporte davantage de protons

Nb : Par simplification, il sera souvent noté 0,511 MeV (et non pas MeV/c²). Si le prof utilise cette notation, utilisez sa notation.

Énergie de première ionisation

L'ionisation est l'arrachement d'un électron à un atome neutre qui devient alors un ion. **L'énergie de première ionisation** est donc la **plus petite énergie nécessaire à l'arrachement d'un électron, pour un atome donné (E_L de la couche électronique la plus externe).**

D'une façon générale, les énergies d'ionisation diminuent le long d'une colonne du tableau périodique, et augmentent de gauche à droite.

Sachant que l'énergie de liaison de la couche K est approximativement proportionnelle au carré du numéro atomique tel que : **$E_{\text{liaison}}(K) \approx 13,6 \cdot Z^2$**

L'énergie de première ionisation est égale à 13,6 eV pour l'hydrogène **H** (couche K) et l'oxygène **O**. On considérera qu'un **rayonnement** sera dit **ionisant** si l'énergie transportée est **$> 13,6\text{eV}$**

Cela correspond aux photons à partir des **UV-C** et jusqu'aux **rayonnements X & gamma**.

Ionisation et réarrangement électronique

Qu'est-ce qu'une ionisation ?

Nous avons donc vu qu'un électron, situé sur une certaine couche en périphérie du noyau possède une certaine énergie de liaison, qui varie en fonction de la couche. Si celui-ci reçoit une énergie supérieure à son énergie de liaison, l'électron est éjecté de son orbite.

L'électron ayant une charge négative, l'atome ayant subi cette ionisation devient donc positif : c'est un **cation**. (inversement, un **ion** négatif est appelé « **anion** ».).

L'électron qui a été éjecté laisse donc une place vacante, un « trou » sur la couche où il était situé. Ce « trou » est comblé par un autre électron qui se trouve sur une couche plus externe (plus loin du noyau) par rapport à la couche qui portait l'électron éjecté. En effet, dans la nature, tout corps cherche à avoir l'énergie propre la plus faible possible, c'est dans cet état qu'il est le plus stable. Ainsi l'électron en se déplaçant vers une couche plus interne diminue son énergie propre d'une valeur égale à la différence d'énergie de liaison entre les deux couches et il augmente son énergie de liaison.

(Il apparaît donc une différence d'énergie de liaison entre celle de l'électron sur sa couche initiale, et celle de l'électron sur la nouvelle couche.) Cette différence d'énergie est retransmise sous forme de **photons de luminescence**, caractéristiques de l'atome (base de l'analyse par spectrométrie de fluorescence X : Quand ces photons sont de haute énergie, on parle de **fluorescence X**). Les photons ainsi émis sont appelés **X de réarrangement**.

Les 3 types de spectre :

Ex. Une émission d'une couche L à une couche K émet une énergie telle que : $h\nu = E_L(K) - E_L(L)$.

!Attention!: Tous les réarrangements ne sont pas possibles donc un **spectre de réarrangement** est toujours **discontinu**! On obtient donc un **spectre de raies**, caractéristique du noyau étudié.

Spectre continu :



Spectre d'émission :



Spectre d'absorption :



Les électrons Auger

Ce sont des électrons émis lors de la désexcitation d'un atome :

Si un atome est bombardé par des rayons X, il se produit un phénomène d'ionisation : comme vu précédemment, un électron est arraché d'une couche interne, il y aura donc une place vacante, qui sera comblée par un électron d'une couche plus externe.

Lors de la réorganisation, le photon X de réarrangement émis peut heurter un électron plus périphérique, qui est alors éjecté du cortège électronique. Cet électron est appelé électron Auger. (ou photoélectron I^{aire} car on parle d'effet photoélectrique).

A retenir: - Les éléments légers (**Z faible**) produisent plus d'**électrons Auger (léger – Auger)**,

- Les éléments lourds (**Z élevé**) produisent plus de **Photons X**.

Excitation – Désexcitation

→ **L'excitation** est un phénomène se produisant lorsqu'un électron lié reçoit une certaine quantité d'énergie qui le fait passer à un état d'énergie supérieur : l'état excité. L'énergie transférée qui provoque l'excitation est égale à :

Énergie de liaison de l'électron sur sa couche d'origine - Énergie sur sa couche d'arrivée

L'énergie transférée à l'électron lui permet de passer sur des couches plus externes mais est insuffisante pour l'éjecter. Ainsi lors d'une excitation, l'énergie reçue est toujours inférieure à l'énergie de liaison de l'électron sur sa couche initiale.

→ **La désexcitation** est donc le phénomène inverse : l'énergie est restituée sous forme de **photons de fluorescence**, lorsque l'électron revient sur sa couche initiale. **Un schéma de désexcitation est caractéristique d'un atome.**

Énergie de liaison moléculaire

Il est difficile d'expliquer autrement cette partie, cela ne serait que paraphraser.

Il faut donc savoir que l'énergie de liaison d'une molécule est composée de trois « sous énergies », qui sont spécifiques à chaque molécule: **l'énergie de rotation**, **l'énergie de vibration**, **l'énergie de liaison électronique**, dans l'ordre croissant en terme de d'énergie.

OEM	Transition énergétique	Effets biologiques
Micro-ondes	Entre niveaux de rotation	Thermique
Infrarouge	Entre niveaux de vibration	
Visible	Entre niveaux électroniques moléculaires	Chimique
Ultraviolet		
Rayon X et γ	Ionisation (rupture liaisons moléculaires)	Lésions moléculaires

Énergie électronique d'un cristal

Qu'est-ce qu'un cristal ?

C'est un ensemble de molécules ou d'atomes (pouvant-être ionisé(e)s) qui ont une structure tridimensionnelle, structurée et périodique. Il possède une structure élémentaire : la maille qui possède 4 ions par face. Toute translation reproduit cette maille.

La théorie des bandes est une représentation des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un solide (ici le cristal). Ces électrons ne peuvent prendre que des valeurs d'énergie comprises dans des intervalles précis (des bandes). Ces intervalles sont séparés par **des bandes d'énergie interdites** où il ne peut y avoir d'électrons (il faut donc une énergie minimale à l'électron pour franchir ce « Gap »). On parle de structure de bandes.

Les électrons situés sur la **bande de valence** contribuent à donner au cristal une structure solide ; ils sont localisés autour de chaque atome (cohésion des atomes entre eux). Ils correspondent aux états de **basse énergie**, et donc de **haute stabilité**.

A l'opposé, les **états d'énergie supérieurs** correspondent à la **bande de conduction** (qui correspond à un état excité), les électrons qui lui appartiennent sont les électrons dits libres, ou de conduction.

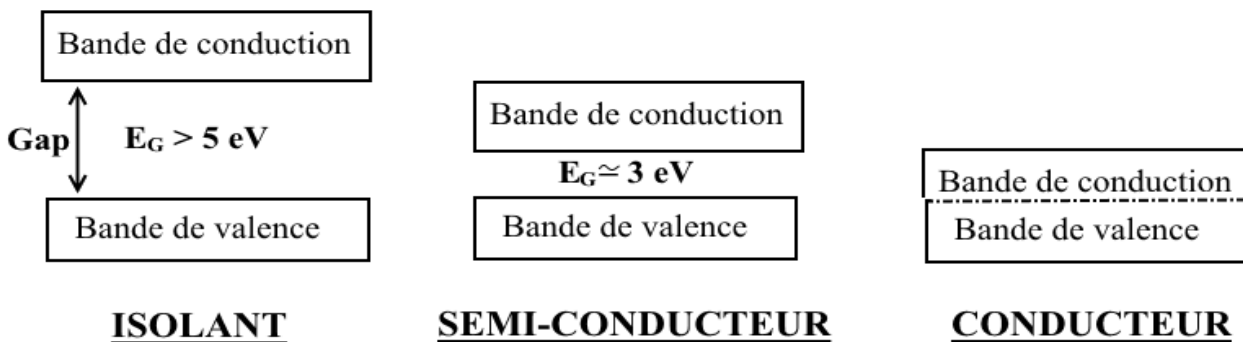
Cas des métaux conducteurs : La bande de conduction est partiellement remplie et il n'y a pas de bande d'énergie interdite (ou alors faible, c'est le cas des semi-conducteurs).

Le cristal contient des électrons susceptibles de participer aux phénomènes de conduction.

Rq: en général la conductivité **augmente avec la température**.

Cas des métaux isolants : La bande de conduction est vide, et la bande d'énergie interdite est grande. Le solide/cristal ne contient aucun électron capable de participer à la conduction.

Un **cristal dopé** contient des impuretés, c'est-à-dire des atomes/molécules étrangers au cristal pur présent dans la bande d'énergie interdite, permettant **des niveaux intermédiaires d'énergie**.



Énergie d'annihilation

L'annihilation est un phénomène de destruction, d'anéantissement. C'est ce qui se produit quand une particule rencontre son « opposé » ou « antiparticule » qui diffère par son nombre de charge opposé.

Par exemple, un électron et un positon se rencontrent, il en résulte deux rayonnements de photons gamma de même énergie (égale à la moitié de l'énergie potentielle de masse du couple **particule-antiparticule**). Ces deux rayonnements sont de direction identique (sur la même droite) mais de sens opposés. Leur captation est utilisée pour les **TEP (Tomographie par Émission de Positons)**. On peut illustrer ce phénomène par « les opposés s'attirent et, lors de leur rencontre, se détruisent ».

II. Structure du noyau atomique

1) Constitution du noyau

Le noyau est constitué de **nucléons** (protons et neutrons, particules subnucléaires). Les nucléons sont eux-mêmes constitués de **3 quarks** (particules subnucléaires), et font donc partie des **baryons** (particules composées de 3 quarks). Les baryons sont des **hadrons** (composées de quarks).

Cela s'oppose aux **leptons** (comme les électrons) qui sont insécables.

Un nucléon constitue la plus petite quantité de matière nucléaire pouvant exister à l'**état libre**. Un quark constitue la plus petite quantité de matière pouvant exister à l'**état lié** (avec d'autres quarks).

Parmi les 6 quarks connus (saveurs : down, up, strange, charme, beauty, top), deux entrent dans la constitution des nucléons : le quark haut (Up) de charge électrique $+2/3$, et le quark bas (Down) de charge électrique $-1/3$.

A retenir : Un **proton** est constitué de deux quarks Up pour un quark Down ; la charge résultante est donc de **+1**. Un **neutron**, quant à lui, est constitué de deux quarks Down pour un quark Up ; la charge résultante est donc **nulle**.

La cohésion du noyau est assurée par la force d'attraction mutuelle entre quarks, appelée **interaction forte** (par l'intermédiaire des **gluons**).

L'interaction forte est d'une intensité bien supérieure à l'**interaction électromagnétique** de répulsion s'exerçant entre protons.

On peut rappeler que dans la physique actuelle on connaît au total 4 types d'interactions. En plus des deux citées, on a deux autres interactions d'intensité plus faible :

- **l'interaction faible**, responsable notamment de la radioactivité β (passage d'un quark down à un quark up et inversement);
- **la gravitation**, causant l'attraction réciproque des corps proportionnellement à leur masse.

En physique, un atome est classiquement noté par son symbole X, qui représente l'identité chimique de l'élément, et des nombres ou signes caractéristiques de ses propriétés physiques :

X : symbole de l'atome (exemple: Hydrogène: H....)

A : nombre de masse, ou **nombre baryonique**, ou nombre de nucléons ($A = Z + N$)

Z : numéro atomique, ou nombre de charges, ou nombre de protons et donc d'électrons périphériques pour un atome neutre (non ionisé). Z est spécifique de l'identité chimique de X, par exemple ${}_1\text{H}$, ${}_6\text{C}$

N = nombre de neutrons ($N=A-Z$)

L'ensemble des atomes partageant le **même Z** est aussi appelé **élément**. Ce terme « élément » a une signification essentiellement chimique, identifiée par le symbole (Ex: Fe, C, Mg...).

Un même élément peut comporter des nombres de neutrons variables: ce sont les **isotopes** (même Z/protons) de cet élément: ^1_1H , ^2_1H ... sont isotopes l'un de l'autre.

Deux éléments différents (nombre de protons différents) peuvent présenter le même nombre de masse **A**: ce sont des **isobares**. Ex: $^{127}_{54}\text{Xe}$ et $^{127}_{53}\text{I}$

Deux noyaux d'un même isotope peuvent exister sous des états énergétiques différents. Ce sont des **isomères**. Par exemple: $^{99}_{43}\text{Tc}$ et $^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$.

L'unité de masse atomique

La masse d'un atome étant très faible par rapport à l'unité de masse du SI, le kilogramme, on a défini une unité adaptée à la physique atomique: **l'unité de masse atomique (uma)**.

L'**uma** est définie comme étant **le douzième de la masse d'un atome de l'isotope 12 du Carbone**. Or par définition du **nombre d'Avogadro**, $6,022 \cdot 10^{23}$ atomes du carbone 12 ont une masse de 12g, soit $12 \cdot 10^{-3}$ kg. D'où: $1 \text{ uma} = 1/12 \cdot 12 \cdot 10^{-3} / 6,022 \cdot 10^{23} = 1,6605 \cdot 10^{-27}$ kg

Par le principe d'équivalence masse-énergie, on obtient: **$1 \text{ uma} = 1,4925 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 931,5 \text{ MeV}$**

Masse des particules élémentaires

	Masse(m)	m.c ²
Proton	1,00727 uma	938,3 MeV
Neutron	1,00866 uma	939,5 MeV
Électron	0,00055 uma	0,511 MeV

On observe que la masse du proton est légèrement **inférieure** à celle du neutron. On observe aussi une grande différence au niveau de la masse entre les nucléons et les électrons: de ce fait, dans un atome, **la masse se trouve concentrée au niveau du noyau**.

2) Défaut de masse et énergie de liaison du noyau

Défaut de masse

La masse d'un atome est toujours inférieure à la masse de ses constituants libres. Cette différence est appelée **défaut de masse**, on le note Δm . En se liant, les différents constituants diminuent leurs énergies propres tout en libérant cette énergie. Masse et énergie étant similaires, la masse de l'ensemble des éléments liés sera inférieure à celle de la somme des éléments libres.

Soit un atome de masse Ma comportant Z protons et A nucléons:

$$\Delta m = [Z(m_p + m_e) + (A-Z) m_n] - Ma = m_{\text{constituants libres}} - m_{\text{atome}}$$

Énergie de liaison

A partir de ce défaut de masse on peut exprimer une énergie, appelée **Énergie de liaison totale du noyau**, on la note E_l ($E_l = \Delta m \cdot c^2$).

La masse des électrons étant négligeable, le défaut de masse est directement lié aux **nucléons** et à leur cohésion au sein de l'atome.

L'énergie de liaison d'un noyau est donc la masse (ou Énergie puisqu'il y a équivalence masse-Énergie) que **perdent les nucléons lors de la cohésion de l'atome** ($E < 0$). C'est donc par conséquent l'énergie qu'il faut **fournir à un noyau pour dissocier les nucléons** qui le constituent ($E > 0$). ⚠ : différent de l'interaction forte des gluons !

Exemple: pour l'hélium $E_l = 0,0304 \times 931 = 28,3 \text{ MeV}$

$$0,0304 \text{ uma} = (0,0304 \times 1,66 \cdot 10^{-27}) = 5,0768 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

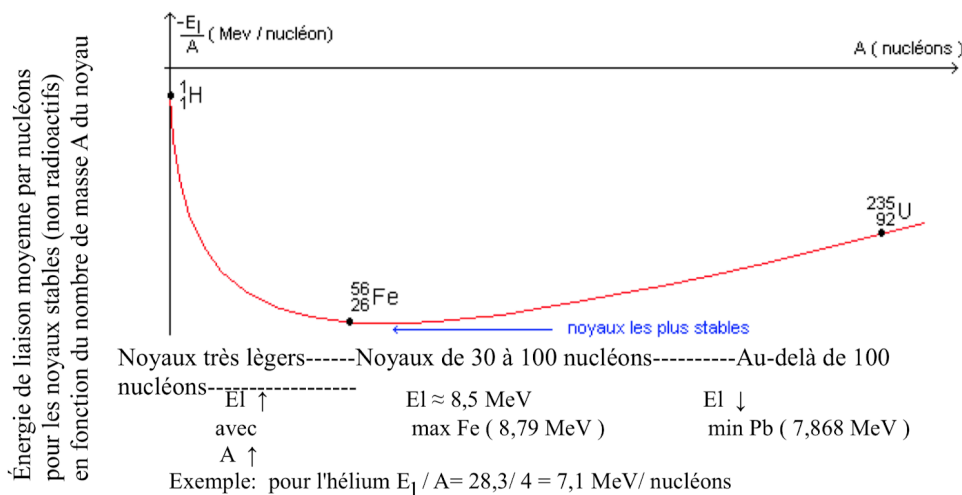
$$E_l = 5,0768 \cdot 10^{-29} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 4,569 \cdot 10^{-12} \text{ Joules soit environ } 28,3 \text{ MeV.}$$

Énergie de liaison moyenne par nucléon

On l'obtient lorsqu'on divise l'énergie de liaison totale du noyau par le nombre de nucléons qui le constitue (on a donc ainsi une valeur moyenne), on la note E_l / A .

NB : C'est cette valeur qui détermine la **stabilité du noyau**.

Courbe d'Aston :



Exemple: pour l'hélium $E_l / A = 28,3 / 4 = 7,1 \text{ MeV / nucléons}$

Énergie de liaison moyenne par nucléons pour les noyaux stables (non radioactifs) en fonction du nombre de masse A du noyau

Interprétation de la courbe:

Pour les noyaux légers tels que $A \leq 30$ l'énergie de liaison moyenne par nucléon augmente rapidement quand A augmente et est **nulle pour ^1H** .

Pour les noyaux moins légers tels que $30 \leq A \leq 100$, les énergies de liaisons moyennes par nucléons sont comprises entre 8 et 9 MeV (soit 8,5 MeV en moyenne), avec une stabilité maximale pour le fer à 8,79 MeV.

Pour les noyaux les plus lourds où $A \geq 100$, l'énergie de liaison moyenne par nucléon diminue progressivement et lentement vers la valeur du plomb à 7,86 MeV.

Remarque : Attention dans la lecture de ce schéma ! Quand la courbe décroît l'énergie de liaison par nucléon augmente et inversement !

Stabilité et instabilité nucléaire

Noyaux stables:

Les noyaux stables se situent autour d'une ligne courbe appelée « **vallée de stabilité** ».

Pour les noyaux légers cette ligne est proche de la droite $N=Z$.

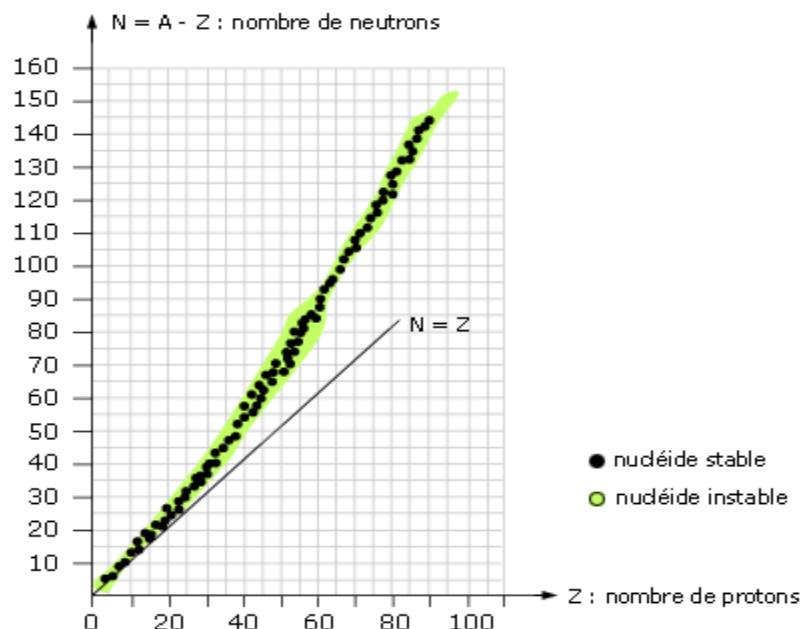
Pour les éléments plus lourds on observe une augmentation de plus en plus grande de N c'est-à-dire un excès de neutrons et donc N/Z augmente jusqu'à 1,5.

Rq :

Au delà de 40 nucléons, il y a davantage de neutrons que de protons ($p/n < 1$)

Le noyau stable le plus lourd est le plomb-208 $Z=82$ et $N=126$.

Les **1500 nucléides**, naturels ou artificiels, stables ou instables ont été placés sur un **graphique représentant** le nombre de neutrons N en fonction du nombre de protons Z de leurs noyaux : $N = f(Z)$.



Les **noyaux stables** (en noir) forment une « **vallée de stabilité** » autour de laquelle, les noyaux instables (en blanc) se positionnent.

Noyaux instables:

Les noyaux instables se situent de part et d'autre de la « vallée de stabilité ».

S'il y a un **excès de Neutrons** par rapport à la vallée de stabilité on observe une instabilité de type β^- .

Si il y a un **excès de Protons** par rapport à la vallée de stabilité on observe une instabilité de type β^+ ou **capture électronique (CE)**.

A partir de **Z=82** et N=126 (soit le plomb), tous les noyaux sont instables (**α , β , fission**), en dessous de cette limite il n'y a pas d'instabilité α .

Pour les noyaux très lourds ce sont des **fissions spontanées** qui se produisent.

Diagramme protons-neutrons pour l'ensemble des noyaux stables et instables

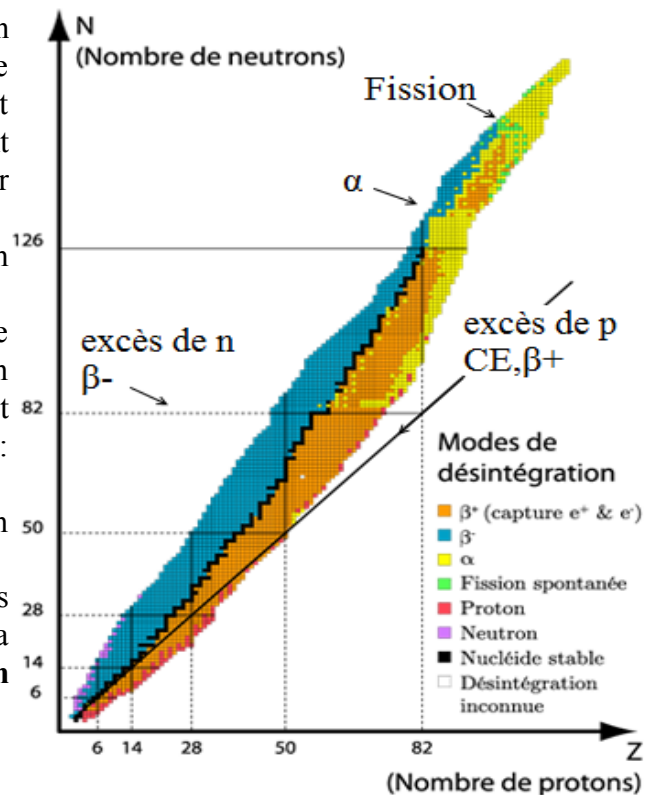
Rq: si on trace un diagramme de l'énergie de liaison moyenne par nucléon en fonction du nombre de protons et de neutrons pour les noyaux stables et instables on comprend que les **noyaux instables** ont un **excès d'énergie** (une masse trop élevée) par rapport aux stables.

Or un système tend toujours vers un minimum d'énergie potentielle.

Un noyau X instable libère une partie de son énergie potentielle de masse M_X tout en se transformant en un autre noyau X' de plus faible énergie potentielle et de masse $M_{X'}$: l'énergie qui est libérée vaut : $\Delta mc^2 = (M_X - M_{X'}) \cdot c^2$ avec $M_{X'} < M_X$

Et cette **énergie est libérée** sous la forme d'un **rayonnement** (particulaire ou photonique).

Les atomes instables sont donc appelés des **radioéléments** ou éléments radioactifs et la transformation est appelée **transformation radioactive** ou **désintégration radioactive**.



A retenir : toute transformation **spontanée** est dans le sens de la stabilité du noyau donc dans le sens d'une **augmentation du Δm** du noyau c'est-à-dire une **diminution de la masse** du noyau par l'émission d'une particule ou d'un rayonnement.

Il existe deux types de modifications d'un noyau:

- soit par **transformation radioactive** (phénomène **spontané**)
- soit par **réaction nucléaire** (interaction d'un **projectile** sur un noyau cible = phénomène induit), on obtient alors des radioéléments artificiels largement utilisés en imagerie médicale.

On obtient ainsi de nouveaux noyaux le plus souvent instables.

3) Réactions nucléaires $X(r,r')X'$

Une réaction nucléaire $X(r,r')X'$ est le résultat de l'interaction d'un rayonnement avec le noyau d'un

atome: ${}^a_c \mathbf{r} + {}^A_Z \mathbf{X} \rightarrow {}^{a+A}_{c+Z} \mathbf{C} \rightarrow {}^{A'}_{Z'} \mathbf{X}' + {}^{a'}_{c'} \mathbf{r}'$ avec $\mathbf{r}$: rayonnement incident
 $\mathbf{r}'$: rayonnement diffusé
 $\mathbf{X}$: noyau cible $\mathbf{X}'$: noyau final
 $\mathbf{C}$: noyau composé

Rq : ce sont les Joliot-Curie qui ont découvert la radioactivité artificielle

Il existe deux grands types de réactions nucléaires:

- les **transmutations**: où $\mathbf{X}'$ sera un noyau différent de $\mathbf{X}$ (elle sont utilisées pour la préparation de radioéléments artificiels en imagerie médicale nucléaire) $\mathbf{X} \neq \mathbf{X}'$
- les **diffusions** où $\mathbf{r} = \mathbf{r}'$, sous deux formes:
 - diffusion **élastique**: $\mathbf{X}'$ équivaut à une augmentation de l'énergie cinétique de $\mathbf{X}$ ($\mathbf{X}' = \mathbf{X}$) et $\mathbf{r}'$ à une diminution de l'énergie cinétique de $\mathbf{r}$ (ici $\mathbf{r}$ est un rayonnement **particulaire**).
 - diffusion **inélastique**: $\mathbf{X}'$ est un **état excité de $\mathbf{X}$** ($\mathbf{X}' = \mathbf{X}^*$ qui est une augmentation de l'énergie interne du noyau) et $\mathbf{r}'$ est de plus faible énergie que $\mathbf{r}$ (ici $\mathbf{r}$ est un rayonnement particulaire ou un photon!).

Lois de conservation appliquées aux réactions nucléaires (to know):

- conservation du **nombre baryonique** : la somme des A reste la même avant et après la réaction
- conservation de la **charge électrique** : la somme des Z reste la même avant et après la réaction (attention aux signes!!)
- conservation de **l'énergie totale** : l'énergie de masse et l'énergie cinétique sont conservées avant et après la réaction
- conservation de la **quantité de mouvement** : la quantité de mouvement (ou **impulsion**) reste inchangée avant et après la réaction.

Ces 4 lois de conservation sont suivies lors des transformations radioactives.

Remarque: on utilise plusieurs sources de rayonnements incidents $\mathbf{r}$ dans les réactions nucléaires

Émetteur α : on utilise un élément radioactif α .

Particules chargées (électrons, protons...) : les particules chargées sont utilisées comme rayonnement incident dans des accélérateurs de particules linéaires ou circulaires.

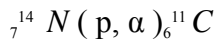
Neutrons : on utilise des sources de neutrons qui se trouvent dans des réacteurs nucléaires ou avec une source radioactive, ou d'un faisceau issu d'un accélérateur.

Photons (source radioactive, réacteur nucléaire, faisceau X de haute énergie)

Exemples à comprendre (p't'être pas les connaître par coeur quand même) :

Rappel: n = neutron, $\alpha = {}^4_2\text{He}$, d(deutérium) = ${}^2_1\text{H}$

Exemple :



$$\rightarrow A = 14 + 1 = 4 + 11$$

$$\rightarrow Z = 7 + 1 = 2 + 6$$

ELEMENT PÈRE	RAYONNEMENT INCIDENT	RAYONNEMENT DIFFUSÉ	ÉLÉMENT FILS
${}^{98}_{42}\text{Mo}$	1_0n	${}^0_0\gamma$	${}^{99}_{42}\text{Mo}$ (utilisé pour les scintigraphies)
${}^{130}_{52}\text{Te}$	1_0n	${}^0_{-1}e + {}^0_0\gamma$	${}^{131}_{53}\text{I}$ (utilisé pour la radiothérapie de la glande thyroïde)
${}^{14}_7\text{N}$	1_1p	${}^4_2\alpha$	${}^{11}_6\text{C}$
${}^{18}_8\text{O}$	p	n	${}^{18}_9\text{F}$
${}^{20}_{10}\text{N}$	2_1d	α	${}^{18}_9\text{F}$
${}^{14}_7\text{N}$	${}^2_1\text{H}$	n	${}^{15}_8\text{O}$

Exemple d'utilisation de radioéléments artificiels :

- TEP (Tomographie par émission de positons) avec un dérivé de glucose le FDG (un -OH est remplacé par le ${}^{18}_9\text{F}$) pour le dépistage de cancers (les tumeurs consomment plus de glucose)
- utilisation du ${}^{15}\text{O}$ dans une molécule d' H_2O , qui est un traceur de sang, l'imagerie TEP permet d'observer la perfusion sanguine cérébrale et l'activation cérébrale.

(Rq : Dans les QCMs peuvent vous être données des équations de réactions nucléaires dont vous devrez vérifier la cohérence afin de dénicher les justes et éliminer les fausses.)

4) Transformations radioactives

Lors d'une transformation radioactive de noyaux instables on observe une libération d'énergie sous la forme d'un rayonnement qui permet de suivre le devenir des molécules radiomarquées dans l'organisme (imagerie scintigraphique).

Ce sont ces rayonnements qui sont utilisés en imagerie médicale dans un but de diagnostic pour visualiser les organes ; ou encore utilisés en radiothérapie pour détruire des cellules cancéreuses par exemple.

Il s'agit de la transformation d'un noyau père X en un noyau fils X' avec émission d'un rayonnement. **Le noyau fils aura une masse inférieure à celle du père**, la différence de masse se trouve répartie entre les masses des particules émises, les énergies cinétique du noyau fils et des particules émises et des photons.

On note la transformation radioactive :



Rq : si le noyau fils n'est pas stable, on parle de **filiation radioactive** : le processus se reproduit jusqu'à aboutir à un noyau stable.

Lois de conservation appliquées aux transformations radioactives (par cœur ♥) :

- -Conservation du **nombre de masse**: $A' + A'' = A$
- -Conservation de la **charge électrique**: $Z' + Z'' = Z$
- -Conservation du **nombre leptonique**: la somme des leptons (neutrinos et électrons) est conservée. Il s'agit d'une quantité qui s'inverse lors du passage de la matière à l'antimatière.
- -Conservation de **l'énergie** : il y a conservation de l'énergie totale (cinétique + potentielle + celle de l'éventuel photon γ).
- -Conservation de la **quantité de mouvement** : la particule et l'élément fils ont des vitesses initiales et des énergies cinétiques inversement proportionnelles à leurs masses.

Nb : La vitesse initiale de l'élément fils peut être considérée comme négligeable, sauf dans le cas de l'émission alpha et de la fission spontanée.

Transformations isobariques (A=cte)

Il s'agit d'une transformation où le nombre de masse A du noyau fils est identique à celle du noyau père : ce sont les transformations β^+ , β^- , capture électronique (CE).

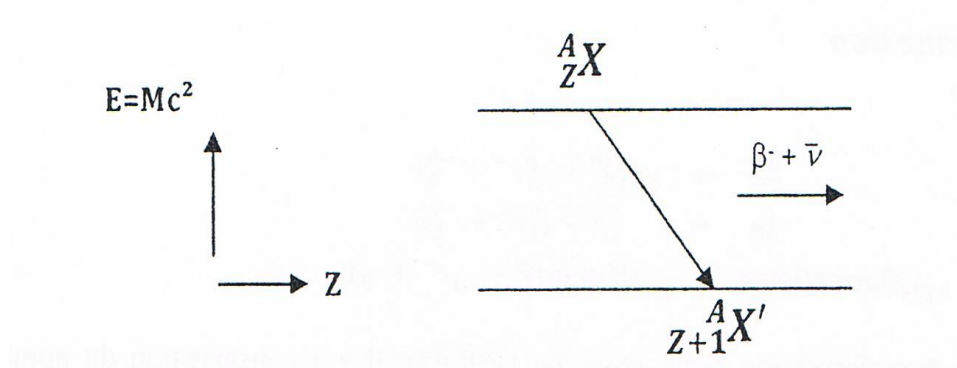
Rq : $^{40}_{19}\text{K}$ est un émetteur β^+ /CE et β^- ce qui est une exception.

Transformation β^- (Z+1)

Elle se produit quand le noyau possède un **excès de neutrons** par rapport à la vallée de stabilité.

Un **neutron se transforme en proton** (le nombre de nucléons A reste donc constant : -1+1) et il y a **émission d'électrons** négatifs dits β^- et d'un **antineutrino**.

Soit schématisé de la façon suivante (en abscisse le nombre de protons, en ordonnée l'énergie potentielle de masse) :



Les électrons β^- émis possèdent une énergie E_β aléatoire pouvant aller **de 0 à une énergie maximale $E_{\beta\max}$** qui correspond à la différence entre l'énergie de masse du noyau père et du noyau fils.

$E_{\beta\max} = \Delta Mc^2 \rightarrow E_{\beta\max}$ correspond à la transmission de la totalité de l'énergie libérée par la désintégration à l'électron.

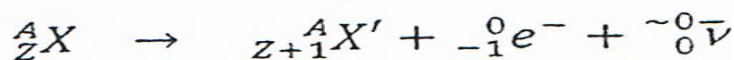
L'énergie emportée par la particule β^- suit une loi de probabilité pour laquelle la probabilité d'avoir des énergies nulles ou égales à $E_{\beta\max}$ est très faible mais pour laquelle obtenir une énergie moyenne $E_{\beta\text{-moy}}$ est beaucoup plus probable.

Le fait que la particule β^- ne soit pas toujours émise avec l'énergie maximale s'explique par l'existence d'une particule de charge nulle et de masse très faible avec une vitesse très proche de celle de la lumière : **le neutrino ou l'antineutrino** qui va emporter la différence énergétique et qui a une interaction très peu probable avec la matière. L'énergie émise par la désintégration du noyau père est répartie de manière **aléatoire** entre les deux particules.

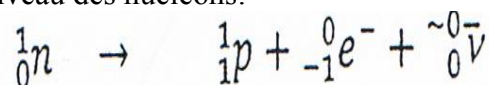
L'antineutrino est émis lors de la transformation β^- , on le note :

$\bar{\nu}$

Bilan de la transformation radioactive β^- :



soit au niveau des nucléons:



Le neutron se transforme en proton tout en émettant un **électron β^- et un antineutrino**.

En premier lieu le noyau perd la particule β^- soit une perte de 0,511 MeV.

Comme il y a un proton de plus l'atome a besoin d'un électron périphérique en plus qu'il capte dans les électrons libres, soit un gain de masse de 0,511 MeV. Il n'y a donc pas de différence de masse entre **l'atome** père et le fils. Cependant il y a bien une perte de masse entre le **noyau** père et le noyau fils.

Rq: la transformation β^- **pure** est une transformation où il y a uniquement émission d'une particule β^- et d'un antineutrino : il n'y a **pas d'émission γ ni de conversion interne!!**

Un β^- est un électron qui vient du **noyau !!**

$$E_{\beta-\max} = \Delta Mc^2$$

$$E_{\beta-\text{moy}} = \Delta Mc^2/3 = E_{\beta-\max}/3$$

Formules à retenir :

Transformation β^- impure :

Transformation β^- associée à une émission de γ :

Il y a émission d'un β^- suivie d'un ou plusieurs photons γ de désexcitation. Il y a plusieurs schémas de désexcitation avec des γ différents, la proportion des différentes voies de désexcitation est toujours la même.

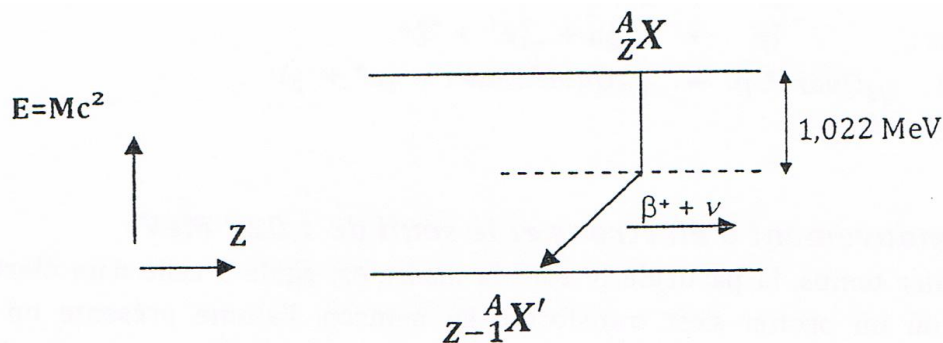
Transformation β^- associée à une émission de conversion interne :

Un photon γ de désexcitation éjecte un électron périphérique de l'atome avec une énergie cinétique égale à l'énergie du photon moins l'énergie de liaison de l'électron. Le spectre observé est alors modifié par ces électrons, on observe plusieurs électrons dont le β^- !!

• **Transformation $\beta^+(Z-1)$**

Il y a transformation β^+ quand un atome présente un **excès de protons** par rapport à la vallée de stabilité. Un **proton se transforme en neutron**, il y a émission d'un électron positif ou anti-électron ou **positon** ou bien particule β^+ qui a la même masse que l'électron (0,511 MeV) mais avec une charge positive et un **neutrino** est émis en même temps (ν).

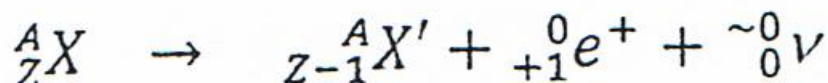
Soit le schéma de la transformation :



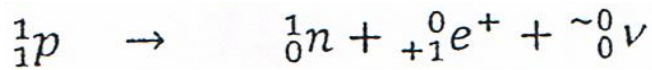
Les énergies cinétiques des particules β^+ émises sont comprises entre une énergie **un peu supérieure à 0** et l'énergie maximale (**$E_{\beta+\max}$**). En effet, le noyau et la particule β^+ sont tous deux chargés positivement, provoquant un phénomène de répulsion du β^+ .

L'énergie maximale correspond à la différence de masse entre le noyau père et le noyau fils ; à laquelle on déduit la valeur de **1,022 MeV**, qui représente le **seuil de l'émission** (voir la suite).

Bilan de la transformation radioactive β^+ :



soit au niveau des nucléons:



La particule β^+ est émise en premier, sa masse est de 0,511 MeV comme celle de l'électron, puis un proton se transforme en neutron, et il y a donc un électron en excès qui va partir du cortège électronique, ce qui correspond à une perte de masse supplémentaire de 0,511 MeV ; soit au final une différence minimale entre le noyau père et le noyau fils de **1,022 MeV (= seuil de l'émission β^+)**

Il faudra donc qu'il y ait **au minimum 1,022MeV entre un noyau père et son fils** pour qu'il se passe une transformation β^+ . Dans le cas contraire la désintégration β^+ est IMPOSSIBLE, on peut alors supposer qu'il s'agira d'une capture électronique.

La particule β^+ (positon) perd son énergie cinétique par des interactions électrostatiques successives et termine son chemin en entrant en contact avec un électron négatif : c'est **l'annihilation** ; les deux électrons (positif et négatif) disparaissent tout en entraînant l'apparition de **deux photons γ de 0,511 MeV** chacun, de **même direction** mais dont le **sens est opposé** (soit à 180°). La détection de cette paire de photons est à la base de l'imagerie TEP.

Rq: une transformation β^+ pure est une transformation où il n'y a émission que d'un neutrino et d'une particule β^+ , il n'y a pas d'émission de photons γ associés **mais on observe toujours 2 photons γ de 511 keV**. Il peut y avoir des photons γ de désexcitation associés et des électrons de conversion interne, ces électrons sont dûs aux photons γ de désexcitation **et/ou** au couple de photons de 511keV !!

Formules à retenir :

$$E_{\beta^+ \text{ max}} = \Delta mc^2 - 1,022 \text{ MeV}$$

$$E_{\beta^+ \text{ moy}} = 0,4 \cdot E_{\beta^+ \text{ max}}$$

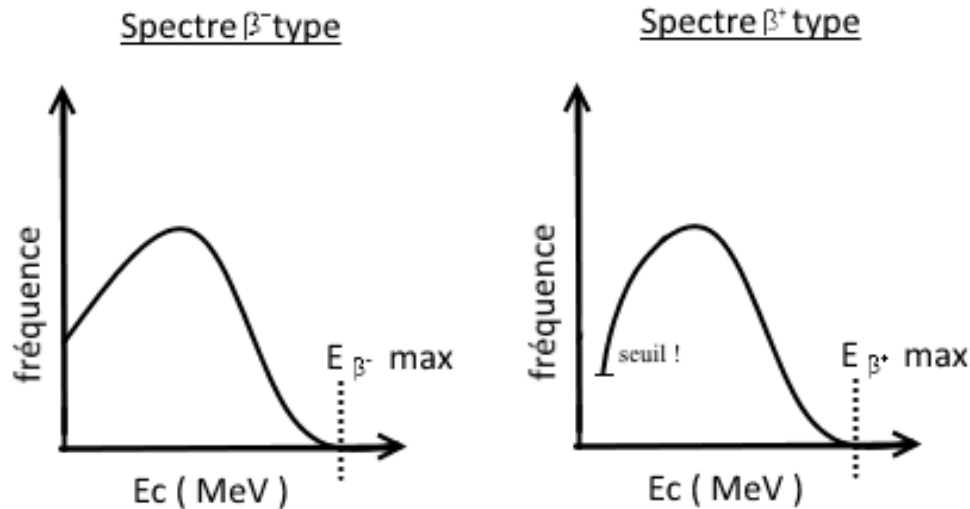
Ne pas confondre !

On note que pour une transformation pure, c'est-à-dire avec émission de la particule β^+ et d'un neutrino uniquement, on a du point de vue énergétique :

$$E_{\beta^+} + E_\nu + 1,022 \text{ MeV} = \Delta mc^2$$

$$\begin{aligned} \text{Et faire attention en QCM : } \Delta m(\text{noyau}) &= 0,511 + E_{\beta^+ \text{ max}} \\ \Delta m(\text{atome}) &= 1,022 + E_{\beta^+ \text{ max}} \end{aligned}$$

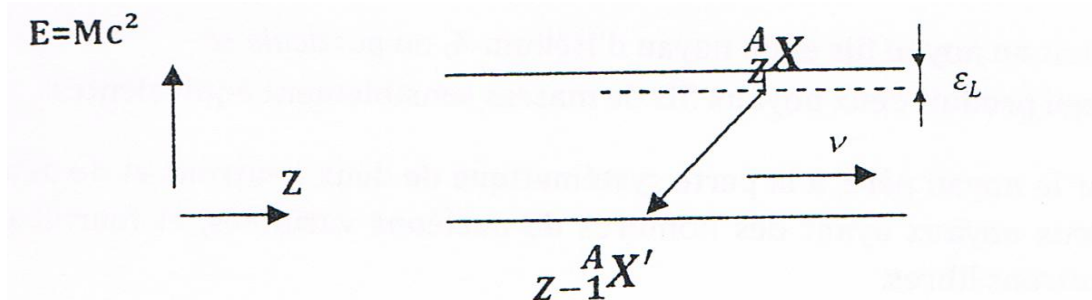
On peut désormais comparer les spectres continus des transformations β :



Rq : pour la β^- le spectre débute à 0, alors que pour la β^+ il commence à un seuil > 0 .

- **Capture électronique (Z-1) = Conversion externe**

Elle se produit quand il y a un **excès de protons** par rapport à la vallée de stabilité (comme pour β^+). Mais un **proton est transformé en neutron** par capture d'un électron par le noyau et émission d'un **neutrino**.



On l'écrit:



soit au niveau des nucléons



Le noyau va capter un électron situé sur une couche profonde du cortège électronique, cet électron possède une énergie de liaison ϵ_L , donc la masse qui est absorbée par le noyau vaut $0,511 - \epsilon_L$.

Le trou laissé par la capture de l'électron est comblé par des **réarrangements électroniques** successifs à partir d'électrons plus périphériques; cela s'accompagne **d'émission de photons de réarrangements** (photons X de réarrangement donc on observe des raies caractéristiques et des électrons Auger) dont l'énergie totale est environ égale à celle de l'énergie de liaison de l'électron capturé ϵ_L .

Le **seuil de l'émission de la CE** est donc égal à ϵ_L ce qui est plus faible que celui de la β^+ (de l'ordre du keV).

Rq : on parle de Capture électronique ou de **Conversion externe (CE dans les 2 cas)**.

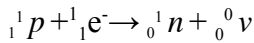
Lorsque l'on observe une capture électronique pure (c'est à dire qu'il n'y a pas d'émission γ associée ou de conversion interne), le neutrino étant indétectable, seuls les rayonnements X de réarrangement du noyau fils et l'émission d'électrons Auger consécutifs à ce réarrangement peuvent être observés !!

Formule à retenir : $\Delta Mc^2 = E_\nu + \epsilon_L$

Spectre : spectre de raies (+/- électrons Auger)

!/\ Dans le cas des émissions β^+ et de la capture électronique, attention à ne **pas oublier les seuils** !!

Nota bene : Ces transformations répondent toutes au schéma



Il suffit de « faire tourner » la formule avec l'électron changeant de signe lorsqu'il change de côté et le neutrino devenant un anti-neutrino s'il change de côté.

Transformations non isobariques ($A \neq cte$)

Le noyau père se subdivise en **deux noyaux fils** (soit A différents pour le noyau père et les fils).

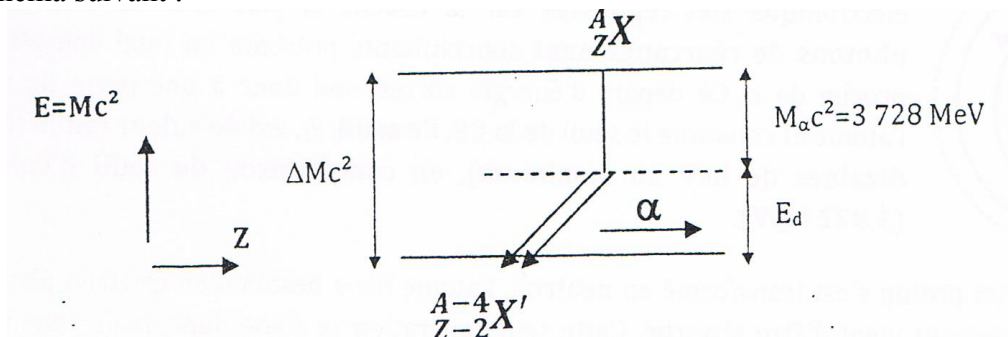
Il s'agit surtout de :

- l'émission α : qui produit un noyau fils et une particule α (noyau d'hélium) et un nombre variable de **neutrons libres**.
- la fission spontanée : le noyau père se divise en deux noyaux fils de **masses presque égales**.

● **Émission alpha** ($A-4$ $Z-2$)

Elle se produit pour des **atomes lourds** dont le **numéro atomique est supérieur à 52** (exception pour le Béryllium ${}_4^8\text{Be}$). Une particule α est émise, elle est composée de **deux protons et de deux neutrons** (d'où une charge positive) puis elle capte deux électrons pour former un atome d'hélium ${}_2^4\text{He}$. Donc le noyau fils possède A-4 nucléons et Z-2 protons (schématisé par la double flèche sur la gauche).

Soit le schéma suivant :



La particule α émise correspond à la masse d'un atome d'hélium (He^{++}) soit $M_\alpha = 4,0026 \text{ uma}$ soit une énergie de $4,0026 \times 931,5 = \mathbf{3728 \text{ MeV}}$. Il y a donc un **seuil de 4 uma** !

L'énergie disponible (E_d) est répartie entre **l'énergie de recul du noyau fils** et **l'énergie cinétique de la particule α** émise. On a $E_d = (\Delta M - M_\alpha) c^2$ ou $E_\alpha = \frac{M_{X'}}{M_{X'} + M_\alpha} \cdot E_d$

On constate que la période du radioélément est d'autant plus courte que l'énergie est grande.

Rq : le spectre **d'émission α** est un **spectre de raies** car il y a émission d'une particule monoénergétique alors que celui **des β** est un **spectre continu**.

● *Fission spontanée*

Elle concerne uniquement des noyaux très lourds pour lesquels le numéro atomique **Z est supérieur à 93** (surtout quand $Z^2/A \geq 45$).

Le noyau initial se fragmente de façon spontanée en **deux noyaux fils plus légers** et quelques neutrons. Les **noyaux de fission** sont en majorité **radioactifs** mais les seuls naturels sont :

$^{235}_{92}\text{U}$ et $^{238}_{92}\text{U}$.

La fusion nucléaire est à l'origine d'une **importante quantité d'énergie**, bien plus importante que lors des phénomènes de fissions. Savoir ceci peut permettre de vérifier la cohérence d'un résultat de QCM.

Rq: la probabilité de transformation par fission spontanée est extrêmement faible.

La désexcitation de noyaux excités

La majorité des noyaux issus de mutations radioactives sont dans un **état excité** c'est à dire avec un excès d'énergie, le noyau reste à l'état excité pendant un certain temps, on parle d'**isomères de l'état fondamental** (notés *), puis restitue cette énergie au milieu sous forme d'un **photon γ** ou cette énergie est transférée à un électron de l'atome fils : la **conversion interne**. Si le noyau fils est stable, la réaction est dite pure.

● *L'émission γ*

Ici, la différence énergétique entre un niveau excité du noyau et un niveau plus proche de l'état fondamental est emportée par un **photon γ d'énergie $h\nu = \Delta E$** .

Rq : Les photons ionisants sont appelés X ou γ **selon l'origine énergétique de leur émission**, un photon X tire son énergie d'une variation d'énergie au niveau électronique tandis qu'un photon γ tire son énergie directement ou non d'une variation d'énergie au niveau du noyau.

● *Conversion interne*

A ne pas confondre avec la capture électronique (conversion externe), la conversion interne est un phénomène **de désexcitation** spécifique de l'élément. Lors de ce type de désexcitation, l'énergie ΔE de désexcitation du noyau n'est pas émise sous forme de photon γ , mais est directement transmise à un électron de l'atome fils, ce dernier étant alors éjecté du cortège électronique avec une énergie cinétique, l'énergie de liaison de l'électron constitue un seuil.

$$E_c = \Delta E - \varepsilon_\lambda$$

avec ε_λ l'énergie de liaison de l'électron

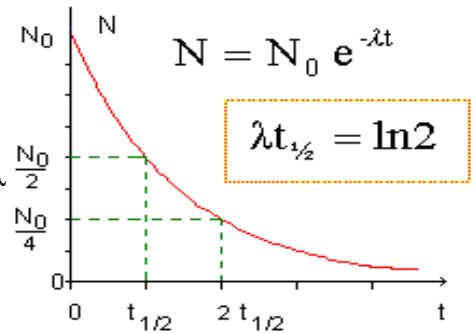
L'électron émis est appelé **électron de conversion interne**, et on observe un **spectre de raies**.

Comme dans le cas de la conversion externe, on observe un **réarrangement électronique** suite à l'émission de l'électron de conversion interne, avec émission de **photons X de réarrangement** et d'**électrons Auger**. Électrons Auger et électrons de conversion interne correspondent au même événement, la seule différence étant l'origine différente de l'onde électromagnétique responsable de l'éjection de l'électron. L'une provient du noyau (conversion interne) et l'autre du cortège électronique (électron Auger).

Loi de décroissance radioactive

● *Élément instable sans filiation*

Chaque noyau instable est susceptible de se désintégrer à tout moment. On considère une population de N atomes instables, le nombre d'atomes transformés $-dN$ pendant un temps très court dt , et λ la **constante radioactive** qui représente la probabilité pour qu'un noyau quelconque se transforme par unité de temps. Ces valeurs sont liées par la formule suivante :



Le nombre N va diminuer au cours du temps, on pose N_0 le nombre d'atomes à $t = 0$, on a :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

On définit la **période** $T_{1/2}$, le **temps nécessaire pour diviser par 2 le nombre d'atomes**.

$$T_{1/2} = \ln(2)/\lambda = 0,693/\lambda$$

La période d'un radioélément est d'autant plus longue que la constante radioactive est faible.

Au bout de **n périodes** la valeur initiale N_0 a été **divisée par 2^n** . Ainsi le nombre d'atomes restant au bout de n période T est :

$$N(t) = N_0 / 2^n$$

Rq : Pour calculer le nombre d'atomes ou l'activité à un instant t il est préférable d'utiliser :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

lorsque $t < T$ (la période) et

$$N(t) = N_0 / 2^n$$

lorsque $t > T$. Avec t le temps écoulé.

On définit l'**activité** $A(t)$ comme le nombre de transformations radioactives par unité de temps.

$$A = \lambda \cdot N$$

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Et au bout de n périodes :

$$A(t) = A_0 / 2^n$$

Les unités d'activité sont le **Becquerel** (unité officiel du SI, 1 Bq = 1 transformation par seconde) et le Curie encore utilisé en France.

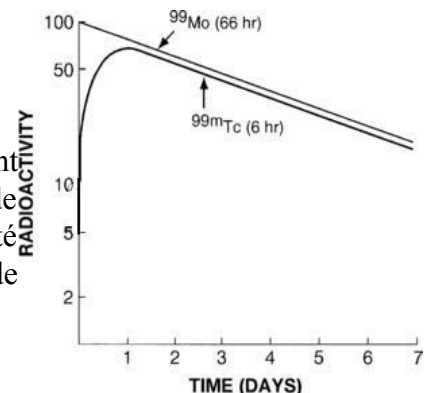
$$1 \text{ mCi} = 37 \text{ kBq}$$

La période peut donc également être définie comme le **temps au bout duquel l'activité a diminué de moitié**. On qualifie l'activité/radioactivité comme négligeable au bout de **10 périodes** c'ad après une décroissance d'un facteur 2^{10} soit 1024 mais attention **elle ne s'annule jamais !!!**

● *Plusieurs éléments instables en filiations radioactives*

Période du père << période du fils

L'élément père disparaît rapidement, l'activité/quantité du père devient « négligeable » à partir d'une durée correspondant à 10 périodes de l'élément père. A partir de ce moment, l'évolution de l'activité/quantité du fils correspond à une décroissance exponentielle selon sa période propre T_f et sa constante radioactive propre λ_f



Période du père >> période du fils (quand $P_{\text{père}} = \text{au minimum } 10 \text{ fois } P_{\text{fils}}$)

Il apparaît au bout d'un certain temps un **équilibre**, à ce moment il y a pratiquement autant d'atomes fils qui disparaissent qu'il s'en produit par transformation d'atomes père, on parle d'**équilibre de régime**. Les activités des 2 radioéléments sont dans un rapport constant voisin de 1, donc quasiment égales. **L'activité du fils A_f est légèrement supérieure à celle du père A_p** et s'en rapproche d'autant plus que l'écart entre les périodes est grand.

→ A partir du moment où l'équilibre de régime est établi, la décroissance du radioélément fils se produit avec une période apparente **identique à la période du père T_p** et donc une constante radioactive apparente λ_p .

/!\ Mais les **nombre de noyaux** père et fils sont très différents, c'est le **rapport des populations de noyaux du père et du fils reste constant**. Le nombre d'atomes est proportionnel à la période.

$$N_p/N_f = T_p/T_f = I_f/I_p$$

/!\ Si l'élément père a une période bien supérieure à l'échelle humaine tandis que le fils à une échelle très courte en comparaison, on parlera d'**équilibre séculaire**, où $A_p \approx A_f$

Transformations radioactives

ISOBARIQUES

β^-

$$E_{\beta\text{-max}} = \Delta Mc^2$$

$$E_{\beta\text{-moy}} = \Delta Mc^2/3 = E_{\beta\text{-max}}/3$$

→ émission de rayons de spectre continu

β^+

$$E_{\beta^+\text{max}} = \Delta Mc^2 - 1,022 \text{ MeV}$$

$$E_{\beta^+\text{moy}} = 0,4 \cdot E_{\beta^+\text{max}}$$

→ spectre continu
→ seuil de 1,022 MeV
→ émission de 2 photons γ de 0,511 MeV: même direction mais sens opposé (annihilation)

CE

$$\Delta Mc^2 = E_\nu + \epsilon_L$$

(pure)

→ seuil très faible
→ observation rayons X de réarrangement et d'e- Auger

NON ISOBARIQUES

émission α

- noyaux lourds $Z > 52$
exception pour ${}^8_4\text{Be}$
- seuil de 4 UMA
- émission de particule α :
noyau d'Hélium (${}^4_2\text{He}$)

/!\ spectre de raies

fission spontanée

noyaux très lourds $Z > 93$
= fragmentation spontanée des noyaux

III. Interactions rayonnements Ionisants-Matière

Un rayonnement ionisant (RI) va produire des ionisations dans la matière qu'il traverse. C'est-à-dire qu'il va transformer les atomes ou les molécules de la matière en particules électriquement chargées (ion). Selon le RI, on obtiendra différents types d'interactions.

Les différents types de RI

Les radiations se distinguent en :

Radiations **directement** ionisantes comportant des particules **chargées (obligatoires car électrostatiques)**

Radiations **indirectement** ionisantes qui comportent des particules **non chargées** et où l'ionisation se fait par l'**intermédiaire de particules secondaires chargées**, mises en mouvement. (**non obligatoires donc aléatoires et d'atténuation selon e^x**).

Rappels :

Un atome est constitué de son noyau chargé positivement qui comprend les protons et les neutrons et de son cortège électronique chargé négativement qui comprend les électrons. Un atome est toujours neutre, on a donc autant de protons que d'électrons. Les électrons et le noyau sont liés par l'interaction électromagnétique car leurs charges électriques sont opposées. A l'échelle microscopique, ces charges positives et négatives ne sont pas localisées au même endroit. Cette dissymétrie de disposition des charges engendre un champ électrique. Un ion est un atome qui a gagné ou perdu un ou plusieurs électrons. C'est donc une particule chargée positivement (s'il a perdu des électrons) ou négativement (s'il a gagné des électrons).

Les différents lieux d'interaction

- Le champ électrique de l'atome
- Les électrons
- Le noyau
- Le champ électrique du noyau

1) Interaction électron-matière

Les interactions d'électrons avec la matière sont de type électrostatique, obligatoire. C'est-à-dire que connaissant les caractéristiques d'un faisceau d'électrons, on peut calculer une distance au delà de laquelle tous les électrons auront déjà interagit. Les électrons peuvent être émis par transformations radioactives, ou lors des phénomènes de désexcitation (électron Auger, conversion interne...)

Rappel radioactivité

Émission β^+ : émission d'un positron (ou anti-électron, ou positon)

Émission β^- : émission d'un électron

Ou bien être issus d'accélérateur de particules : un accélérateur de particules sert à accélérer des faisceaux de particules chargées (électrons, positons, protons, ions...) pour les faire entrer en collision et étudier les particules élémentaires générées au cours de cette collision.

Effet Tcherenkov

L'effet Tcherenkov, c'est cette lumière bleue vive qu'on aperçoit autour des éléments radioactifs dans les films (ou en réalité si vous êtes moins chanceux...).

Il est dû à un électron libre un peu fifou qui se balade trop près du nuage électronique d'un atome, polarisant celui-ci (la charge négative de l'électron sauvage va repousser le nuage électronique lui-même chargé négativement) le nuage va s'éloigner de l'électron sauvage et donc un côté de l'atome sera plus négatif que l'autre, immédiatement suivi d'un retour rapide à la normale, la dépolarisation. Notons que c'est tout à fait différent de l'ionisation. Ces dépol-repol engendrent l'émission de petits photons de faible énergie et de spectre continu. Si la vitesse de l'électron est supérieure à la vitesse de la lumière dans milieu, cela engendre un front d'ondes cohérent (un peu comme les avions supersoniques) dans le domaine du visible (c'est mieux pour le voir à l'oeil nu), se déplaçant avec l'électron.

En tout cas ça ralentit très peu l'électron sauvage, c'est juste joli comme effet, et capté avec un simple appareil photo, on le met en œuvre pour l'imagerie de pitis z'animaux. *Attention: les photons de l'effet Tcherenkov n'étant détectables que si la vitesse de l'électron incident est supérieure à la vitesse de la lumière dans le milieu (piscines de stockage de radioéléments not.), ne pas se laisser piéger par les QCM du genre "ce radioélément peut être utilisé dans l'imagerie du petit animal..."*

○ « Collision » électron- électron

Il y a des forces d'attraction et de répulsion qui s'exercent entre des particules chargées. Lorsque ces forces s'exercent entre deux électrons en mouvement, leur trajectoire respective est déviée.

Cette force d'attraction ou de répulsion est donnée par la loi de Coulomb : $F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{x^2}$

avec : x distance entre les électrons

q_1 & q_2 charges de l'électron incident et cible, respectivement

k constante

Assez logiquement, c'est une attraction si l'électron incident ($F < 0$) est un positon et une répulsion ($F > 0$) lorsque c'est un électron négatif (comme les aimants toussa toussa)

L'électron cible acquiert une énergie E_Q prélevée à l'énergie cinétique E_C de l'électron incident.

L'énergie résiduelle après interaction de l'électron incident est : $E_C - E_Q$

NB : Plus l'électron incident va **vite**, plus la collision sera brève donc **le transfert d'énergie faible**. On peut avoir des collisions électron-électron qui vont aboutir à une **ionisation** ou une **excitation** du milieu traversé.

→ Lorsque l'énergie cédée par l'électron incident est supérieure à l'énergie de liaison de l'électron cible, celui-ci est alors arraché, éjecté du cortège électronique. C'est une **ionisation** et cet électron sera appelé **électron secondaire** (il peut à son tour créer d'autres ionisations secondaires si son énergie est suffisante)

→ Lorsque l'énergie transmise est inférieure, l'électron cible est propulsé sur une couche plus externe, on a alors une **excitation**. L'atome est passé de son état stable à un état instable en emmagasinant de l'énergie. Il est dit excité.

Dans les deux cas, une vacance apparaît sur une orbitale électronique.

- $DE \geq EI$ à ionisation
- $DE < EI$ à excitation

Pour l'ionisation, on aura un réarrangement électronique :

La place vacante sera comblée par un électron de couche périphérique avec émission de fluorescence X (photon de **réarrangement**).

NB : Il y a plus de faibles transferts que de forts, avec une moyenne de **3 excitations pour 1 ionisation = 1 ionisation sur 4 interactions**.

Exemple : l'électron incident a une énergie cinétique supérieure à l'énergie d'ionisation d'un électron de la couche K ; celui-ci est alors expulsé. Sa place sur la couche K devient vacante. Si un électron de la couche L vient occuper la place laissée libre par l'électron de la couche K, l'électron de la couche L perd une énergie qui est émise sous forme d'un photon d'énergie **h ν** .

Notation :

L'indice K, L,... indique la couche d'arrivée.

Les indices α , β ... indiquent si l'électron de remplacement vient de la couche immédiatement supérieure ou des couches suivantes.

Les niveaux de départ et d'arrivée étant parfaitement définis, il en résulte que les rayonnements émis sont **caractéristiques** de l'atome cible. On parle donc de **raies caractéristiques**.

Pour l'excitation : on a retour à l'état fondamental par émission de rayonnements électromagnétiques (rayonnement lumineux ou rayons X selon son énergie) à photon de **désexcitation**.

Faisceau d'électrons incidents /\ Tombe souvent en QCM

× Parcours d'un faisceau d'électrons mono-énergétiques

Dans un faisceau incident parallèle d'électrons mono-énergétiques qui pénètre dans la matière, le nombre de particules diminue plus ou moins linéairement en fonction de la profondeur à cause de leur trajectoire en zig-zag. On pourra calculer la profondeur **moyenne** (de pénétration des électrons dans un milieu homogène grâce à la formule suivante) :

$$\text{avec } \rho \bar{R} (\text{cm}) \approx \frac{E(\text{MeV})}{20} \text{ masse volumique du milieu,}$$
$$E \text{ énergie cinétique de l'électron .}$$

La profondeur maximale au delà de laquelle on ne trouve aucun électron incident en mouvement est égale à : $R_{\text{max}} \approx 1,5 \times R$

Rappel : $R_0 (\rho)$ de l'eau = 1 !

× Parcours d'un faisceau d'électrons poly énergétiques

En calculant le parcours moyen du faisceau on pourra avoir une idée de l'épaisseur de la matière. On calculera le parcours moyen en prenant **l'énergie moyenne des électrons** et le parcours maximal en prenant **l'énergie maximale des électrons**.

Paramètre des interactions électrons-matière

Pour décrire un faisceau d'électrons on utilisera différents paramètres :

- **Énergie moyenne d'ionisation d'un milieu $\bar{E}$:**

Pour l'eau un électron perd en moyenne **32 eV** par ionisation. C'est la somme des énergies dépensées en moyenne pour divers phénomènes : rupture de liaison **13,6 eV**, énergie cinétique d'un électron secondaire, excitations...

- **$n = E_c / \bar{E}$ Nombre total d'ionisations**

Nombre total n d'ionisations produites par l'électron :

- **Densité linéique d'ionisations moyenne DLI $\overline{DLI} = \frac{n}{R}$:**

Nombre moyen d'ionisation par **unité de longueur de trajectoire**.

Avec DLI en ionisation/unité de longueur

- **Transfert d'énergie linéique moyen TEL :**

Quantité d'énergie transférée au milieu cible, par la particule incidente, par unité de longueur de trajectoire. Cette définition indique que plus le TEL est grand, plus une grande quantité d'énergie est cédée sur une petite distance. Ce qui explique qu'il **reflète directement la nuisance biologique d'un rayonnement donné**. $\overline{TEL} = \overline{DLI} \cdot \bar{E}$

Nota bene : Avec ces approximations il en ressort une **DLI moyenne de 6,25 ionisations/μm** et un **TEL moyen de 200 eV/μm** (càd 2 MeV/cm) pour n'importe quel électron dans l'eau. (très utile à savoir pour gagner du temps en QCMs).

2) Freinage électron-champ du noyau : la production de rayons X

/!\ Tous les détails de ce cours sont à connaître, les schémas, même les dates et noms des découvreurs de RX ! Sssssssélection !

Les RX sont découverts par Roentgen qui travaillait sur les rayons cathodiques (tube de Crookes).

Dernière décennie du XIXème siècle ++ riche en découvertes :

- **fin 1895** : Roentgen RX
- **1896** : Becquerel « rayons uraniques » (radioactivité naturelle) 1ère radiographie réalisée
- **1897** : Thomson électron
- **1898** : Pierre & Marie Curie « activité du radium » → terme *radioactivité*.

Un RX, quézako ?

Le principe même de la création des RX est d'accélérer un électron (très très vite) dans le vide via une haute tension (dans un canon à électron quoi) pour les faire interagir avec une cible à haut numéro atomique Z.

Les interactions s'y faisant :

Collision, avec les électrons atomiques à l'origine des RX dits *caractéristiques* (par réarrangement électronique post-ionisation/excitation).

Freinage, avec le champ électrique du noyau atomique, donnant les RX de *freinage*.

Généralités sur les RX de freinage

× Mécanisme de production :

Lorsqu'un électron d'énergie cinétique E_c passe à proximité d'un noyau, sa trajectoire est déviée et il subit une accélération due à la force attractive centripète d'origine électrostatique.

Or il s'avère qu'une **particule accélérée rayonne de l'énergie**. L'énergie émise sous la forme d'un rayonnement dit de freinage est prélevée sur l'énergie cinétique E_c de l'électron qui poursuit sa trajectoire avec une énergie cinétique plus faible E'_c telle que :

$$E'_c - E_c = h\nu.$$

L'émission de ce rayonnement entraîne donc le ralentissement de l'électron.

× Le spectre continu des RX de freinage

Toutes les distances entre le noyau et la trajectoire de l'électron incident sont possibles. Donc toutes les valeurs de $h\nu$ sont permises, de 0 lorsque l'électron passe loin du noyau jusqu'à $E_{\max}$ quand toute l'énergie cinétique de l'électron est communiquée au photon X.

En effet, si la particule passe loin du noyau elle est moins déviée, l'accélération est plus faible et le rayonnement de freinage est donc de faible énergie, si elle passe très près du noyau elle est fortement déviée et accélérée et le photon de freinage a alors une énergie élevée.

Le spectre d'énergie de rayonnement de freinage est donc un spectre continu. A ce spectre on peut ensuite rajouter les raies, dues au réarrangement du cortège électronique, comme vu précédemment.

> Si la **valeur nulle** est la plus probable (électron pas ou peu accéléré), cela n'apparaît PAS sur le spectre car ces photons très peu énergétiques **sont réabsorbés dans la cible et ne sont pas perçus ! (différence entre le spectre d'émission théorique et observé!!)**

> La **valeur Emax** varie seulement par la valeur de l'énergie cinétique des électrons incidents. Plus l'énergie cinétique des électrons incidents est élevée plus l'Emax des rayonnements de freinage sera élevée.

Notons que les interactions par collision produisent des pics sur la courbe.

Le rayonnement X de freinage est caractérisé par :

- **L'énergie maximale Emax** des photons qui le constituent
- **Son spectre continu**
- **L'indicatrice d'intensité énergétique**

→ ***Énergie maximale $E_{\max}$ des rayons X de freinage :***

$E_{\max} = h\nu_{\max} = e.U = \frac{hc}{\lambda} \lambda_{\min} (nm) = \frac{hc}{eU} = \frac{1240}{U(V)} = \frac{1,24}{E_{\max}(KeV)}$ Toute l'énergie cinétique de l'électron incident est transmise au photon. Le ralentissement de l'électron est donc total. L'électron est arrêté. Et donc si toute l'énergie de l'électron incident est transformée en rayonnement, nous obtenons :

d'où : → *relation de Duane-Hunt*

Avec: - h la constante de Planck ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s)

- c la vitesse de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8$ m/s)

- e est la charge électrique élémentaire de l'électron ou 1 *u.e.s.f.* = $1,6 \cdot 10^{-19}$

Coulomb. (la charge électrique est une propriété fondamentale de la matière qui respecte le principe de conservation.)

- U est la tension appliquée au tube à rayons X

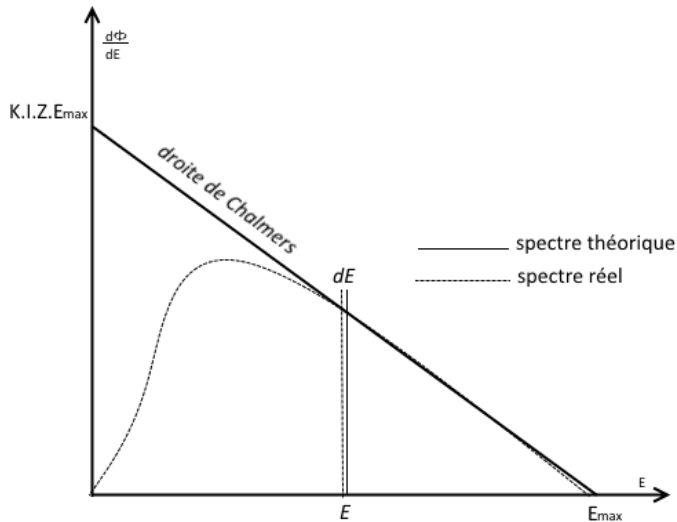
/!\ à partir de l'énergie maximale des électrons il nous est possible de déterminer la longueur d'onde MINIMALE des RX de freinage, puisque, plus un rayonnement est énergétique plus sa longueur d'onde est FAIBLE et sa fréquence est élevée !!!

→ **Spectre continu et flux énergétique :**

→ pour les QCMs sait-on jamais, apprenez les formules et à quoi elles correspondent, mais le raisonnement reste moins à comprendre qu'à appliquer **ici** (aussi pour trouver ce qui est proportionnel à quoi, apprenez la formule et ça vient tout seul).

Le flux énergétique du faisceau s'exprime par : $\frac{d\phi}{dE} = KIZ (E_{max} - E)$

avec **K** constante de proportionnalité, **I** intensité du courant, **Z** numéro atomique de la cible.



C'est une relation linéaire nommée **droite de Chalmers**, théorique car elle ne prend pas en compte l'auto-absorption des photons X les moins énergétiques (pas représentés sur le spectre réel).

Cette relation est conforme à la réalité jusqu'à $E_{max} \approx 100keV$.

En intégrant cette expression entre $E=0$ et $E=E_{max}$ (je vous passe l'intégration, passez en P2 pour ♥) on obtient le **flux énergétique total Φ** , tel que $\Phi = \frac{1}{2}KIZE_{max}^2$.

Sachant que E_{max} (en keV) = U (en kV) on retrouve donc : $\Phi = \frac{1}{2}KIZU^2$

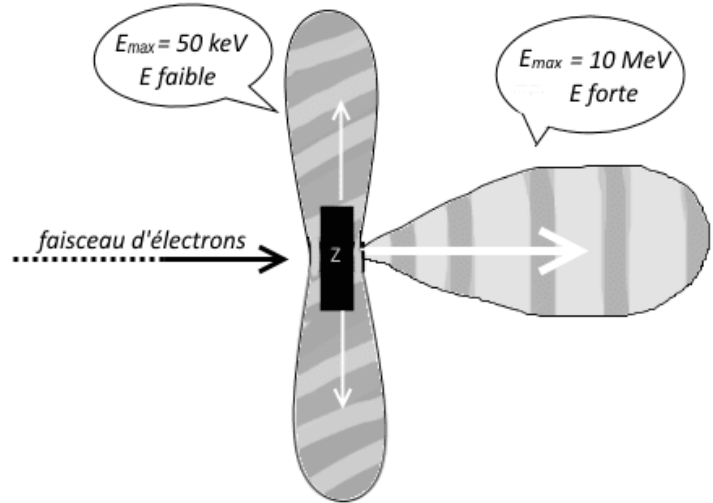
→ Le **rendement ρ** est le rapport entre Φ la puissance émise sous forme de RX et P la puissance consommée pour les produire. Soit $\rho = \frac{\Phi}{P} = \frac{1}{2}KZU$ car, rappel $P=UI$.

Le rendement est donc proportionnel au numéro atomique de la cible et à la valeur U de la haute tension accélératrice des électrons.

→ Vérifiez vos QCM : le rendement est généralement **très faible** (à hauteur de 1 %), le reste de l'énergie est dépensée sous forme de chaleur. Le rendement peut néanmoins monter jusqu'à environ 100 % pour les très très hautes tensions accélératrices ($50 MeV \sim 50 \cdot 10^6 V$).

→ **Indicatrice d'intensité énergétique :**

L'indicatrice d'intensité énergétique correspond à la direction dans laquelle les RX vont être émis. Elle dépend de l'énergie cinétique des électrons incidents, donc de la valeur de la haute tension accélératrice. Pour les faisceaux d'électrons de faibles énergies cinétiques ($E < 50$ keV) les RX sont émis perpendiculairement au faisceau d'électrons. Pour ceux de forte énergie cinétique, les RX sont émis parallèlement au faisceau d'électrons.



● **Générateur de RX**

× Tube à rayons X utilisé en radiodiagnostic

Les tubes à rayons X (majoritairement type **tube de Coolidge**) fonctionnent de la manière suivante : dans une enceinte de verre où règne le vide, des électrons sont émis par un filament métallique recouvert d'un oxyde alcalino-terreux (fort pouvoir émissif d'électrons) dans lequel circule un courant électrique transmis par un sous-volteur (10 volts, autonome, basse tension).

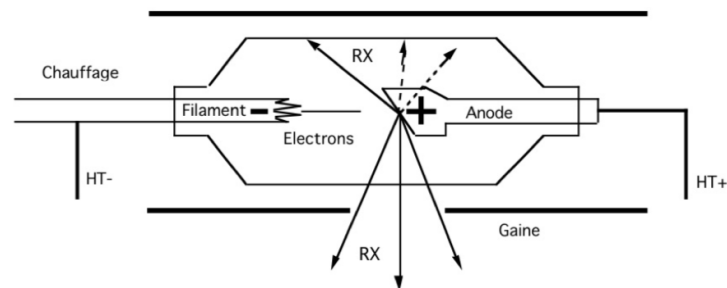
Le filament forme la cathode du tube (-) d'où s'échappent les électrons par effet **thermoélectrique**. Pour une température donnée, l'intensité augmente proportionnellement à la haute tension accélératrice puis devient constante (U_s , tension de saturation).

Elle peut être calculée selon la loi de Richardson : $i_s = AT^2 e^{-bT}$ avec A et b : constantes
 T température absolue du canon à électrons
 i intensité du courant de saturation

La valeur du flux d'électrons dépend seulement de la **température du filament**, car la haute tension accélératrice U est d'emblée $\gg$ à la tension de saturation U_s .

On parle de réglage des « **mAs** », réglage en mAmpères de l'intensité du courant de chauffage et temps d'alimentation en seconde.

Les électrons sont accélérés en direction de l'anode (ou anticathode $\oplus$) par un champ électrique. ils entreront en collision avec la cible, située sur l'anode)



Ainsi l'énergie maximale des RX dépend de la valeur de la HT accélératrice :

→ **élevée** : photons X énergétiques/pénétrants/durs (~ 100 kV , ex. radio d'os)

→ **basse** : photons X peu énergétiques/peu pénétrants/mous (~ 50 kV, ex. mammographies)

La HT est obtenue via un transformateur-survolteur qui élève la tension de :

- 50-100 kV (radiographie)
- 80-180 kV (scanner X ou TDM)
- +++ kV (radiothérapie)

La tension obtenue est alternative, et doit être **redressée** afin d'être toujours positive. Pour cela on **supprime** les phases négatives, ou on les **renverse** de façon à ce qu'elles soient positives. Ensuite on **filtre** le tout pour avoir une tension à peu près constante.

× Paramètres qui déterminent le flux et l'énergie des RX émis :

- Plus l'**intensité du courant** électronique augmente, plus le **flux d'électrons** est important, plus le **flux de RX** est important.
- Plus la valeur de la **haute tension accélératrice** est élevée, plus l'**énergie maximale des photons X** augmente.
- **Caractéristiques de la cible** [le numéro atomique (Z) de l'atome cible (élevé), point de fusion...]

→ *Caractéristique de la cible : anode ou anticathode :*

L'anode ou anticathode est composée de tungstène ou wolfram qui ont pour caractéristique d'avoir un **haut point de fusion et un numéro atomique élevé**. Elle va être enchâssée dans un châssis en cuivre qui va permettre la diffusion de la chaleur après l'interaction des électrons. On utilisera des anodes dites tournantes pour dissiper l'élévation de température sur tout le système et éviter qu'elle soit concentrée en un point en abîmant notre coûteuse cible !

→ *Modification du faisceau émis par réglage du tube à RX :*

On peut intervenir sur :

- la **limite supérieure du spectre**
- le **flux énergétique total des RX**
- avec les **filtres métalliques sélectifs**

× Générateur d'électrons et de RX utilisés en radiothérapie

En radiothérapie, on devra utiliser des électrons et des rayons X d'énergie plus élevée (de l'ordre du MeV) que pour le radiodiagnostic, car le but va être de « détruire » certains tissus, cellules cancéreuses.

Pour augmenter leur énergie il va falloir accélérer les électrons, pour cela on utilisera, soit des **accélérateurs linéaires, soit des accélérateurs circulaires**.

→ Accélérateurs linéaires :

L'appareil est constitué d'un alignement de tubes sous vide. Entre deux tubes voisins est appliquée une tension alternative (potentiels alternativement positifs ou négatifs de sorte que deux tubes successifs soient toujours à des potentiels de signes opposés). Il y règne donc un champ électrique alternatif.

A l'intérieur d'un tube, le champ est nul et les particules "volent" à vitesse constante. En passant d'un tube au suivant elles seront systématiquement soumises à un champ accélérateur, et ce champ accélère les particules.

→ Accélérateurs circulaires : bêtatron, cyclotron :

L'énergie reçue par mètre de trajectoire est limitée par des facteurs physiques. Ainsi en « enroulant » la trajectoire, on obtient l'équivalent d'un accélérateur rectiligne ayant des milliers de kilomètres de longueur (jusqu'à 100 MeV !)

Les **Cyclotrons** peuvent accélérer des **particules lourdes chargées**.

Le **Bêtatron** accélère **uniquement des électrons négatifs**.

× Interaction des particules lourdes chargées

Ces interactions suivent aussi le modèle **électrostatique**, elles interagissent de manière obligatoire avec la matière. Les particules lourdes chargées sont majoritairement représentées par les **protons**, les **deutons** (noyau de ^2H), et les **particules α^{++}** .

Elles interagissent principalement avec les électrons des atomes cibles, engendrant une ionisation ou une excitation.

Les interactions avec les noyaux sont secondaires. Étant beaucoup plus lourdes, elles sont peu sujettes au rayonnement de freinage. Les particules α^{++} ont une charge deux fois plus importante que les électrons.

● ***Collisions des particules lourdes chargées***

Les interactions des particules lourdes chargées se font essentiellement avec les électrons du cortège. Du fait de leur vitesse réduite et de leur masse importante, les interactions sont nombreuses, mais le transfert d'énergie et la déviation des particules lourdes chargées sont faibles. On peut donc considérer que le parcours d'une particule lourde chargée est **rectiligne dans la matière**.

Pour une énergie donnée, la trajectoire est rectiligne et de longueur constante.

Lors des interactions, une partie de l'énergie de la particule sera cédée à l'électron. On observera donc les deux phénomènes connus que sont l'ionisation et l'excitation.

● ***Parcours des particules lourdes chargées*** [au programme en 2018-2019 sauf formule]

La trajectoire rectiligne des particules lourdes chargées et leurs nombreuses interactions avec les électrons font que leur parcours est très court (contrairement aux électrons qui peuvent subir des déviations de 180°), mais beaucoup plus ionisant. Ex. les particules alpha ne sont dangereuse qu'en contamination interne, et la protonthérapie permet une grande précision.

$$\rho \uparrow = R \text{ moy } \downarrow$$

$$E \uparrow = R \text{ moy } \uparrow$$

Le transfert d'énergie est maximal **en fin de parcours** (cf **pic de Bragg**, le pic de transfert max d'énergie).

Plus une particule lourde chargée est lourde, plus son parcours est long. Il en est de même pour la vitesse. Plus la vitesse de la particule est importante, plus son parcours est long. Inversement, plus la particule est chargée, moins son parcours sera long (elle subira plus d'interactions donc plus de perte d'énergie).

Entre deux particules lourdes chargées **de même vitesse**, nous avons la relation :

$$R_2 = R_1 \cdot m_2 / m_1 \cdot (Z_1 / Z_2)^2$$

R1 et R2 : parcours des 2 particules

m1 et m2 : masses des 2 particules

Z1 et Z2 : charges des 2 particules

Les énergies cinétiques étant proportionnelles aux masses, si un proton (^1H) a le **même parcours** qu'une particule α (4H) de même vitesse, c'est que son énergie cinétique est 4 fois inférieure à celle de la particule α . (car la masse du proton est 4 fois inférieure à celle de la particule α) (voir exemple 2 du poly).

● **Transfert d'énergie linéique(TEL)**

On appelle TEL l'énergie transférée par la particule au milieu par unité de longueur de trajectoire. Le TEL est d'autant plus grand que la particule est lourde et chargée. En fin de parcours la vitesse de la particule diminue. Ainsi le transfert d'énergie à la matière environnante augmente, engendrant une forte augmentation du TEL qui s'arrête brutalement . Il s'agit du pic de Bragg.

La relation de **Bethe** permet de donner une valeur au TLE :

$$\text{TEL} = K.nZ.(z^2/v^2)$$

K : constante de proportionnalité

n : nombre d'atomes par unité de volume du milieu

Z : numéro atomique du milieu

z : charge de la particule incidente

v : vitesse de la particule incidente unité usuelle : keV/μm

Remarque : Les particules α ayant une énergie élevée et un parcours très court, elles sont caractérisées par un TEL très élevé.

4) Interactions Photon-Matière

Les interactions photon-Matière suivent un **modèle probabiliste**, c'est-à-dire qu'on ne peut pas calculer une distance maximale au delà de laquelle tous les photons auront interagit. On peut seulement calculer des probabilités d'interactions. On parle aussi **d'effets aléatoires, stochastiques, non obligatoires**.

● **Interaction d'un photon unique**

Excitation d'un atome :

Un électron atomique passe de son niveau fondamental (stable) à un état excité (instable) grâce à l'énergie (faible) transmise par un photon.

L'électron subit ensuite une désexcitation (retour à l'état fondamental stable), et restitue l'excédent d'énergie sous la forme de photon(s) de désexcitation :

- émission d'un photon unique (cf LASER).
- émission de plusieurs photons d'énergies caractéristiques de l'atome concerné.

L'énergie restituée étant faible (domaine UV/ visible), elle est facilement observable ou détectable.

● **Effet photoélectrique**

Un photon expulse un électron d'une couche interne d'un atome et lui transmet toute son énergie. L'électron expulsé est appelé le photoélectron, il part avec l'énergie cinétique : $\frac{1}{2}mv^2$

Bilan énergétique : $E_{\text{photoélectron}} = E_{\text{photon}} - \text{liaison électron}$

Le **photoélectron** est **directement ionisant** pour les atomes environnants. Le **photon** est alors dit **indirectement ionisant**.

L'électron expulsé peut être remplacé par un électron des couches électroniques plus externes de l'atome, avec émission d'un **photon de fluorescence** dont l'énergie est suffisante pour expulser un électron de la couche périphérique : l'électron Auger.

La probabilité de l'effet photo-électrique est d'autant plus forte que :

- l'énergie du photon est faible.
- le numéro atomique Z du milieu est fort
- la masse spécifique du milieu est forte.

● *Effet Compton*

Un photon incident d'énergie $E=h\nu$ expulse un électron d'une couche périphérique d'un atome en lui transmettant une partie de son énergie. Le photon change de direction et devient un photon diffusé d'énergie $E'=h\nu'$. L'électron expulsé (dit électron Compton) part avec l'énergie cinétique : $\frac{1}{2}mv^2$

Cela donne un spectre **continu**.

La probabilité de l'effet Compton est d'autant plus forte que :

- l'énergie du photon est entre 0,2 et 10 MeV.
- le numéro atomique **Z** du milieu est élevé
- la masse spécifique du milieu est forte.

Bilan énergétique : $h\nu = h\nu' + \frac{1}{2}mv^2$ où $\nu > \nu'$

Cas particuliers :

→ *Choc tangentiel :*

Le photon incident ne change pas de direction, $\theta=0$, où θ est l'angle entre la direction du photon incident et celle du photon diffusé.

$h\nu = h\nu'$ et l'énergie cinétique de l'électron est nulle.

→ *Choc frontal :*

Ici, $\theta= 180^\circ$, le photon diffusé repart avec une énergie $h\nu'$ minimale. $\varphi=0$, où φ est l'angle entre la direction du photon incident et celle de l'électron Compton. L'électron Compton repart avec une énergie cinétique maximale. Le photon diffusé pourra à son tour interagir avec la matière environnante.

● *Effet de matérialisation ou de création de paire*

Un photon incident d'énergie E (supérieure à **1,022 MeV**), sous l'effet de champ électrique intense entourant le noyau se matérialise en un électron + un positon. Ces 2 particules ont la même masse : 0,511 MeV, mais ont des charges opposées.

Pour que la création de paires ait lieu, il faut donc que l'énergie du photon incident $E > 2 \times 0,511$ donc $E > 1,022 \text{ MeV}$, l'énergie supplémentaire étant transformée en énergie cinétique.

Le positon, qui a une durée de vie très brève, rencontre un électron. C'est le phénomène d'annihilation (destruction) des deux particules. Il y a apparition de **2 photons de 0,511 MeV**, émis simultanément dans des directions opposées.

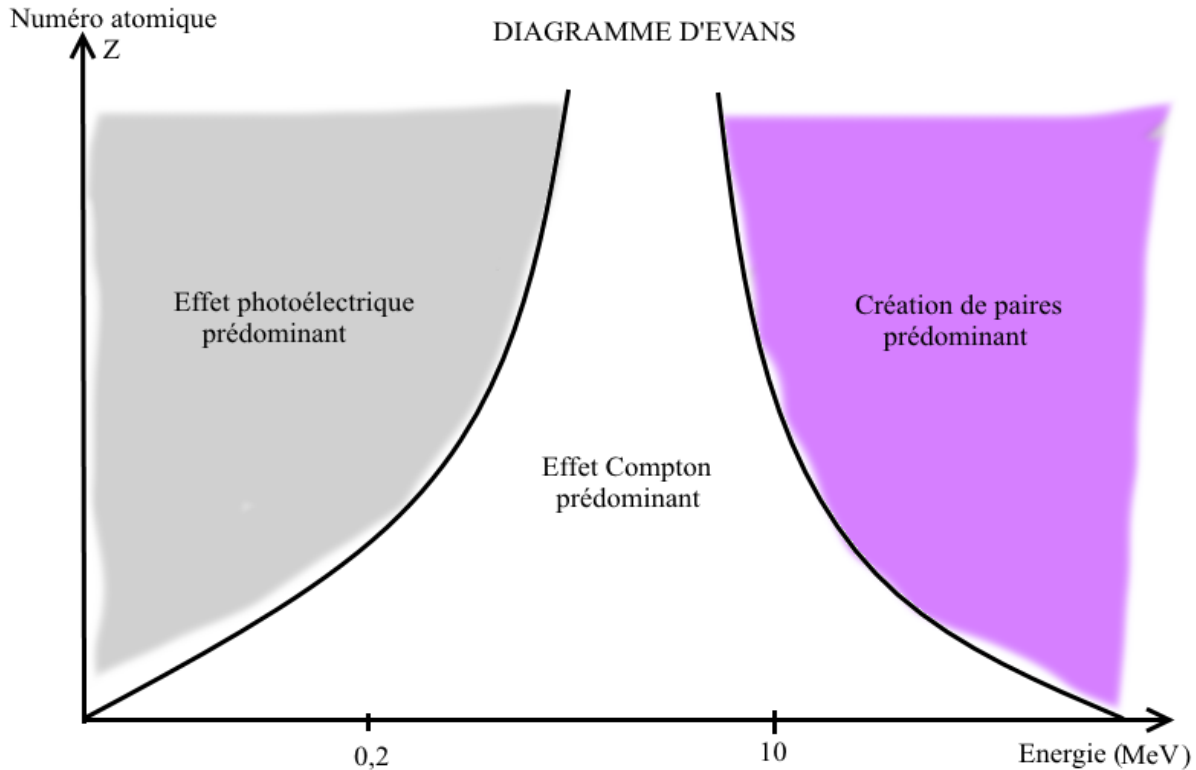
Ces derniers pourront à leur tour réagir avec les atomes environnants.

La probabilité de la matérialisation est d'autant plus forte que :

- à partir de **1,022 MeV**, l'énergie est élevée (au-dessous la probabilité est nulle)
- le numéro atomique **Z** du milieu est élevé

Atténuation d'un faisceau de photons

Un faisceau de photons peut donc être atténué selon les 3 principaux mécanismes vus précédemment : **effet photoélectrique, effet Compton et création de paires**. Selon l'énergie du photon incident, et le numéro atomique du milieu (Z), ces mécanismes n'ont pas la même probabilité de se réaliser.



Plus l'énergie est faible, plus la probabilité d'atténuation par **effet photoélectrique** est importante.

Plus l'énergie est élevée, plus la probabilité d'atténuation par **création de paires** est importante.

On considère un matériau d'épaisseur x qui reçoit N_0 photons X et qui en transmet N_x .

- **Loi d'absorption**

μ est le **coefficient d'atténuation linéique total**, il représente la **probabilité d'absorption par unité de longueur**.

$$N_x = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

N_x/N_0 représente le % de photons transmis.
 $100 - N_x/N_0$ représente le % de photons absorbés.

- **Coefficient d'atténuation linéique total μ :**

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

μ représentant la probabilité d'atténuation du photon, il est la somme des probabilités des 3 principaux effets d'atténuation.

μ dépend donc aussi de l'énergie des photons et de la nature du milieu traversé (Z).

Remarque : Si l'énergie est inférieure à 1,022 MeV, alors $\mu = \mu_{\text{photoélectrique}} + \mu_{\text{Compton}}$ ($\mu_{\text{matérialisation}} = 0$)

- **Coefficient d'atténuation massique μ_m (souvent cm^2/g):**

$$\mu_m = \mu / \rho \quad \text{où } \mu \text{ est le coefficient d'atténuation linéique total}$$

ρ la masse volumique du milieu.

Rappel pour exercices :

$$d = \rho / \rho_{\text{eau}} \quad \text{avec } \rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g / cm}^3$$

$$\text{donc } \rho = d \cdot \rho_{\text{eau}}$$

- **Couche de demi atténuation (ou demi absorption) : CDA :**

Elle est égale à l'épaisseur $x_{1/2}$ du matériau qui transmet la moitié des photons incidents.

$Nx/N_0 = 1/2 = \exp(-\mu \cdot x_{1/2})$

d'où $-\mu \cdot x_{1/2} = \ln(1/2) \quad -\mu \cdot x_{1/2} = \ln(2)$

$$\text{CDA} = \ln(2) / \mu = 0.693 / \mu$$

Comme μ , la CDA dépend de l'énergie des photons incidents et de la nature du milieu traversé.

n CDA l'atténue donc d'un facteur 2^n

- **Coefficient d'atténuation linéique total μ :**

Soit μ la somme des 3 coefficients d'atténuation linéique.

Si E ↑ :

- μ photo-électrique ↓
- μ Compton ↑ 100 keV ↓
- μ matérialisation ↑ (au-delà de 1,022 MeV)

Si Z ↑ : tout ↑

(Rq: Les formules et leurs applications concernant l'atténuation d'un faisceau de photons sont très semblables à celles de la décroissance radioactive!!!)

5) Interactions Neutron - Matière

Les neutrons sont des nucléons, stables lorsqu'ils sont liés dans un noyau atomique, mais instables lorsqu'ils sont libres.

Les neutrons libres sont produits par des réactions nucléaires : la fusion (deux noyaux atomiques s'assemblent pour former un noyau plus lourd) ou la fission (un noyau atomique lourd se scinde en plusieurs noyaux plus légers).

Les neutrons sont des particules de charge électrique nulle, ils ne peuvent donc pas interagir avec le champ d'un atome ou d'un noyau, et que très faiblement avec les électrons.

Le mode d'interaction quasi-unique du neutron est donc **la réaction nucléaire** :

- **diffusion** du neutron
- **absorption** du neutron

Diffusion des neutrons

La diffusion des neutrons rappelle la collision entre des boules de billard. Un neutron frappe un noyau, lui transfère de l'énergie et rebondit dans une direction différente (caractère indirectement ionisant).

L'énergie absorbée par le noyau dépend de l'angle d'incidence. Le noyau récupère donc une certaine quantité d'énergie, ce qui lui permet de se déplacer en gagnant de la vitesse.

Pour que la perte d'énergie par le neutron soit maximale, il faut que la **masse du noyau soit la plus proche possible de celle du neutron**. Les neutrons ayant une masse faible, **les noyaux légers** sont les plus efficaces pour ralentir les neutrons (^1H) (ex. : eau, matériaux riches en hydrogène...). L'eau arrête beaucoup plus aisément un faisceau de neutrons que ne le fait le plomb !!!

Absorption des neutrons

2 mécanismes :

- **induction de fission de noyaux lourds**
- **capture neutronique** (vu précédemment)

+ le neutron est lent (« **neutron thermique** ») → Probabilité d'absorption ↑
+ le neutron est rapide → Probabilité de fission ↑

Atténuation d'un faisceau de neutrons

φ : nombre de neutrons n'ayant subi aucune interaction

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\sigma_{\text{total}} x}$$

φ_0 : nombre de neutrons incidents

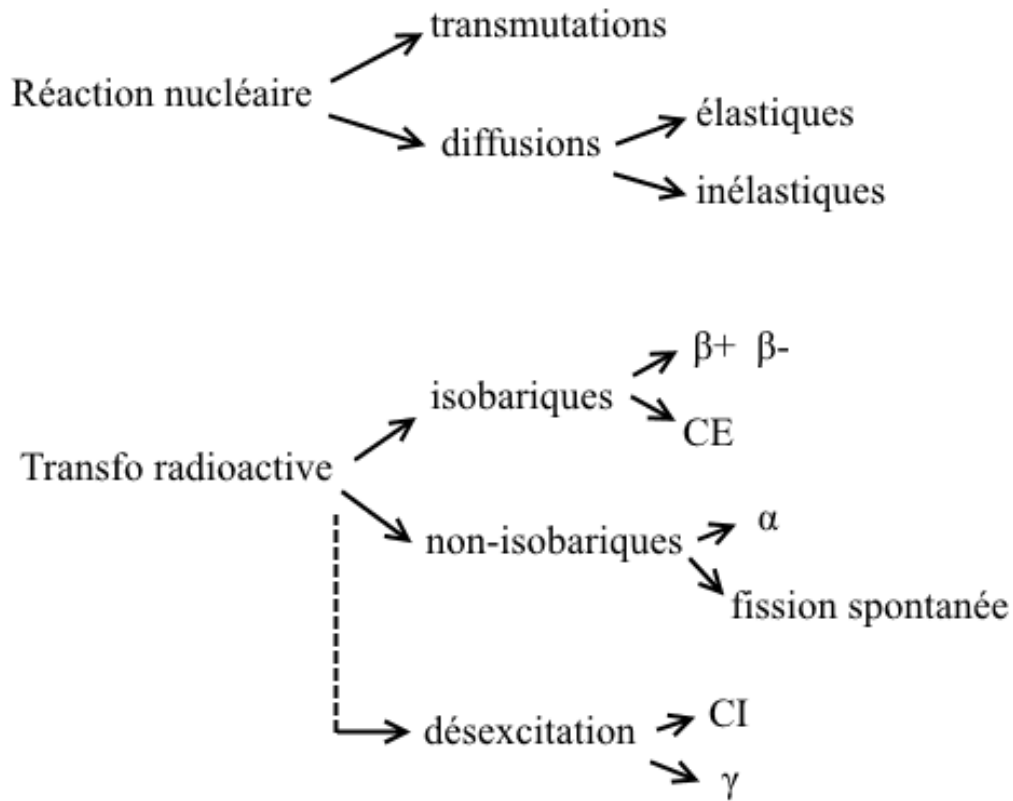
x : épaisseur traversée

σ_{total} : probabilité d'interaction des neutrons par unité de longueur

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{diffusion}} + \sigma_{\text{absorption}} \quad \text{et} \quad \sigma_{\text{absorption}} = \sigma_{\text{fission}} + \sigma_{\text{capture}}.$$

LE TABLEAU RÉCAPITULATIF

<u>Particules chargées</u>		<u>Particules neutres</u>	
interaction obligatoire, parcours finis		interaction aléatoire, atténuation exponentielle	
<u>Particules chargées légères</u> (e- ou e+)	<u>Particules chargées lourdes</u>	<u>Photons</u>	<u>Neutrons</u>
<u>Effet Tcherenkov :</u> - entre particules et champs d'un atome - spectre continu - condition : $v > c/n$	- pic de Bragg - si $v_1 = v_2$ alors $R_2 = R_1 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2$	<u>Diffusion thomson :</u> - négligeable	<u>Diffusion :</u> - neutron-neutron - ralentissement - Z ptt, noyau léger
		<u>Effet photoélectrique</u> - transfert total $\mathcal{E}$ - spectre de raies	
<u>Collision électrostatique :</u> entre deux particules chargées • $F = k \cdot \frac{q_1 q_2}{x^2}$ • 3 excitations / 1 ionisation • $R_{max} \approx 1,5 \bar{R}$ • $\bar{R} (cm) \approx \frac{E(MeV)}{2Q}$ • $E_{moy} d'io : \bar{E} (eau) = 32 eV$ • nb tot d'io : $n = \frac{E_c}{\bar{E}}$ • $6,25 \frac{\mu}{m} \approx DLI = \frac{\mu}{R}$ • $2 \frac{MeV}{cm} \approx TEL = \bar{DLI} \cdot \bar{E}$		<u>Effet Compton :</u> - transfert partiel $\mathcal{E}$ - spectre continu	
<u>Freinage :</u> production de RX selon un spectre continu • $E_{max} = eU$ avec $e = 1$ uesf (eV = V) • flux énergétique faisceau $\frac{d\varphi}{dE} = KIZ (E_{max} - E)$ • flux total : $\varphi = \frac{1}{2} KIZU^2$ • rendement : $Q = \frac{\varphi}{P} = \frac{1}{2} KZU$ • $i_s = AT^2 e^{-\frac{b}{T}}$		<u>Matérialisation :</u> - $h\nu > 1,022$ Mev	<u>Absorption :</u> - fission ou capture - Z grand
<u>Réaction nucléaire</u>		<u>Réaction photonucléaire :</u> $N_x = N_0 \cdot e^{-\mu x}$ $CDA = \frac{0,693}{\mu}$	



Neutrons :

Diffusion → noyaux légers (m=) + mise en mouv protons.

Absorption → induction fission noyaux lourds (U)

→ capture neutronique $^{10}_5\text{B}(n, \alpha)^7_3\text{Li}$

Atténuation : $\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\sigma_{total} \cdot x}$

$$\sigma_{total} = \sigma_{diffusion} + \sigma_{absorption} \text{ et } \sigma_{absorption} = \sigma_{fission} + \sigma_{capture}$$

Rq : pour les électrons avec un spectre continu (B+ ; B-) on calculera R_{moy} avec E_{moy} et R_{max} avec E_{max}

IV. Expositions de l'Homme aux Rayonnements Ionisants

RI = rayonnements ionisants

Ils provoquent : - **ionisation directe**,

- **ionisation indirecte**,

- **excitation**.

D'où un transfert d'énergie qui a des conséquences sur la matière vivante : notre corps peut subir des dommages (nécrose, cancérisation...) en fonction des doses appliquées. Il est donc important de connaître quelques mécanismes et effets qu'ils induisent afin de pouvoir s'en protéger.

1) Grandeurs et unités utilisées en radiobiologie

<u>Dose absorbée D</u> (J/Kg ou Gray)	<u>Équivalent de dose /</u> <u>dose équivalente H</u> (Sv ou mSv)	<u>Dose efficace E</u> (Sv ou mSv)	<u>Débit de dose</u> (Gy/s ou Sv/s)
— Grandeur physique — Rend compte du transfert d'énergie à la matière	— Grandeur biologique — Fait intervenir la nature du RI dans l'effet biologique — $H = D \times W_R$	— Indicateur des dommages causés à l'ensemble des tissus et dans le temps — $E = \sum(H_t \times W_t)$	— Dose administrée par unité de temps

■ **La dose absorbée D**

On distingue les grandeurs physiques, liées uniquement aux rayonnements (énergie...), et les grandeurs biologiques que l'on fait intervenir lorsqu'on considère les effets induits par les RI sur la matière vivante.

La dose absorbée est une grandeur physique qui rend compte de la **quantité d'énergie transférée à la matière**. Elle dépend de deux paramètres :

- l'énergie transférée (en joules : J)

- la masse de matière irradiée (kg)

d'où son unité, le joule par kilogramme J/kg ou Gray (Gy)

La quantité d'énergie absorbée est additive : on prend en compte les doses unitaires absorbées par chaque portion de matière vivante. Ainsi la dose totale absorbée par la matière s'écrit :

$$dW = dW_1 + dW_2 + \dots + dW_n$$

La dose absorbée est due à des mécanismes provoqués essentiellement par **les électrons secondaires** (collisions, freinages...) mis en mouvement par les RI lorsqu'ils frappent la matière. Ces mécanismes peuvent donc avoir lieu lors d'un choc direct, mais aussi sans que le RI n'atteigne la cible, c'est le cas de RI 3 : on part du principe qu'il a heurté des atomes présents à proximité (en médecine, on est rarement dans le vide...) et que ceux-ci ont provoqué des transferts d'énergie à la matière qui s'en trouve donc irradiée. /!\ **Le RI n'a pas besoin de rentrer dans la matière pour l'irradier du fait de la production d'électrons secondaires !!**

Quelle est la nature des rayonnements incidents ? Il peut s'agir de rayons X, de photons, d'électrons... Si le rayonnement incident est constitué d'électrons, ils interviennent dans le transfert d'énergie. Cependant, on ne développera pas les mécanismes qu'ils subissent après la collision avec la matière.
Rq : La dose absorbée peut être mesurée par plusieurs techniques : c'est la dosimétrie.

La dose équivalente H ou équivalent de dose

C'est une **grandeur biologique** utilisée en radioprotection car elle permet de définir l'effet des RI sur la matière en tenant compte de la quantité d'énergie absorbée D mais aussi de la nature des RI.

On peut établir le parallèle suivant : 1 kg de plumes ou 1 kg de plomb n'auront pas les mêmes effets en tombant sur la tête d'un individu. Il en est de même pour les RI : les effets seront différents selon leur nature. On fait donc intervenir un **facteur de pondération** : W_R . (l'indice R indique que ce facteur dépend du rayonnement).

W_R est appelé « facteur de qualité » du RI considéré ; sa valeur est fixe pour chaque type de RI.

A connaître, la table suivante :

Nature du rayonnement	W_R
● X, β , γ	● 1
● Neutrons lents	● 2.3
● Neutrons rapides, protons	● 10
● α	● 20

W_R sert à pondérer l'effet biologique en fonction du type de RI. Il n'a pas d'unité.

La dose équivalente H est reliée à la dose absorbée D, qui rend compte de l'énergie du RI, et à W_R qui rend compte de sa nature par :

$$H = D \times W_R$$

H en Sieverts (Sv) ou plus souvent en mSv

W_R sans unité

D en Gy

La dose efficace E

Elle est utilisée en radioprotection pour la gestion des doses car c'est un indicateur des dommages causés par les RI à l'ensemble des tissus/organes et dans le temps.

Dans notre corps, tous nos tissus et organes n'ont pas la même nature, on comprend donc qu'ils réagissent différemment lors d'une irradiation. Pour rendre compte de ceci, on fait intervenir le **facteur de pondération tissulaire** : W_T (cette fois, l'indice T indique que ce facteur se rapporte à un tissu).

On donne pour exemple :

Nature du tissu	W_T
● Colon	● 0.12
● Estomac	● 0.12
● Surfaces osseuses	● 0.01

Le colon et l'estomac ont des radiosensibilités équivalentes, les surfaces osseuses sont beaucoup moins radiosensibles. (SNC, peau, muscle, os sont peu radiosensibles alors que les **tissus hématopoïétiques, gonades, et tissus digestifs** sont très sensibles).

Pour l'ensemble de l'organisme, la somme de tous les indices W_T est 1.

Pour s'en rappeler, se dire que globalement les tissus à fort pouvoir mitotique sont plus sensibles.

La dose efficace prend en compte l'ensemble des organes de l'organisme, c'est donc une grandeur additive que l'on calcule par :

$$E = \sum(H_T \times W_T)$$

H_T : dose équivalente (Sv ou mSv, même unité que E)

W_T : facteur de pondération tissulaire (pas d'unité)

Exemple de calcul de la dose efficace en considérant les trois tissus présentés ci-dessus :

$$E = H_{T1} \times 0.12 + H_{T2} \times 0.12 + H_{T3} \times 0.01$$

NB : - pour un risque **aléatoire/stochastique** d'irradiation, E et H sont exprimées en **Sv ou mSv** (faibles doses à moyennes doses)

- pour un risque **déterministe/obligatoire** d'irradiation, elles sont exprimées en **Gy** (moyennes à fortes et très fortes doses)

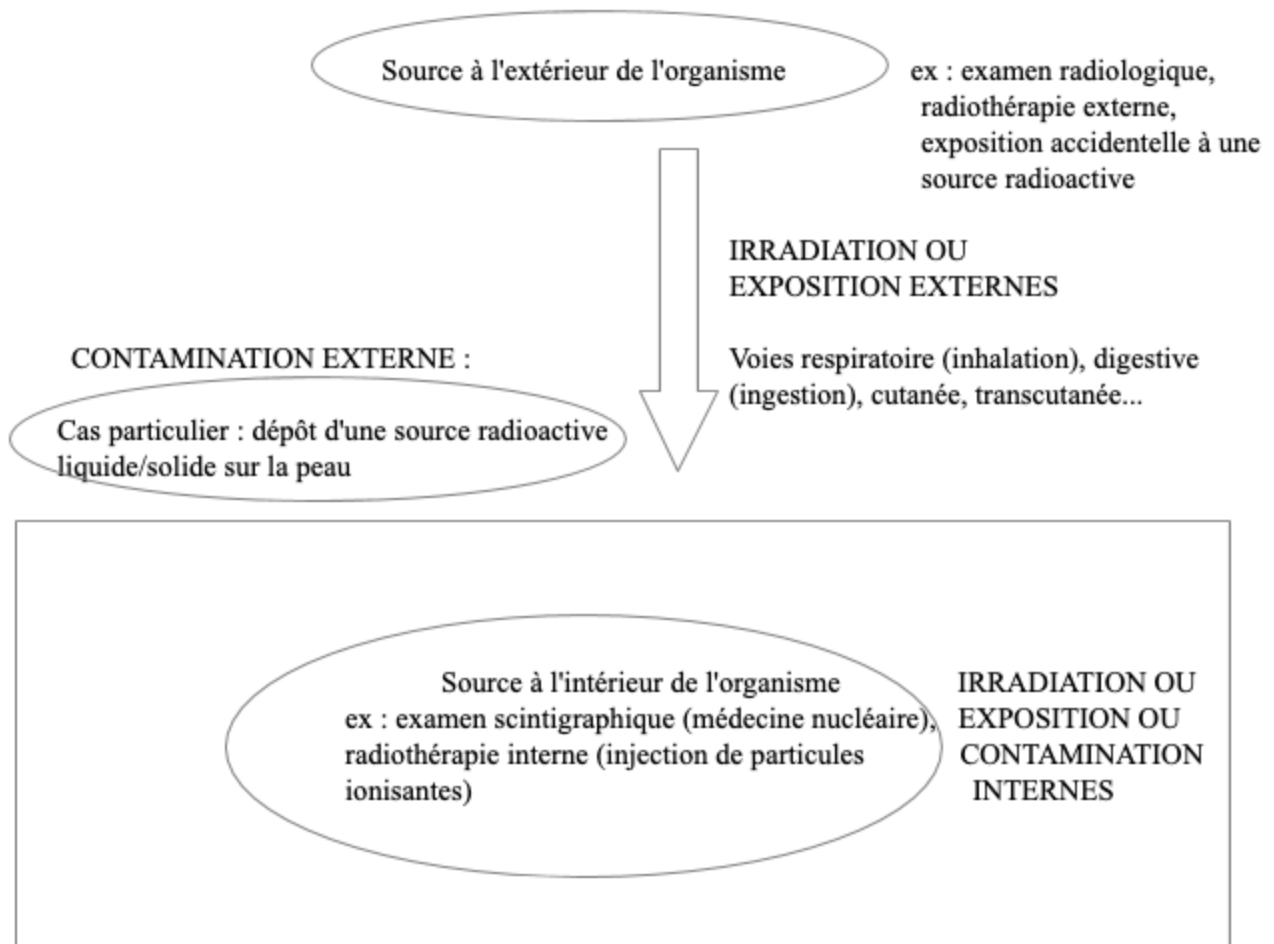
Débit de dose

Le débit de dose est la **dose administrée par unité de temps d'où sont unité : Gy/s ou Sv/s**

C'est du débit de dose que dépend l'efficacité biologique de l'irradiation : à doses totales égales, plus le débit de dose est faible et plus les effets biologiques néfastes sont atténués. Ainsi, on peut réparer des tissus abîmés en administrant de faibles débits de dose successivement alors qu'on peut les détruire par un unique débit de dose trop important (cf le bronzage ou le coup de soleil...).

2) Modalités d'irradiation

L'irradiation de notre corps peut être interne ou externe et, dans ce cas de figure, les RI peuvent emprunter des voies différentes, comme le montre le schéma suivant :



Rqs: → ces processus peuvent être accidentels ou naturels, comme nous le verrons par la suite.

→ la contamination interne diminue au cours du temps. Ceci s'explique par deux paramètres ; on doit d'abord prendre en compte l'influence du radioélément considéré : sa décroissance radioactive est caractérisée par sa **période physique** T_p (unité : temps). On doit aussi compter avec l'influence de l'organisme lui-même, c'est à dire avec sa capacité d'éliminer le radioélément ou le complexe formé par le couple substrat/radioélément. Ceci est caractérisé par la **période biologique** T_B (unité : temps)

Cette décroissance radioactive totale s'effectue avec la **période effective** T_E : c'est le temps au bout duquel 50% du radioélément a disparu de l'organisme. On précise que T_E est toujours inférieure à la plus courte des périodes T_B ou T_p . On calcule T_E par la relation :

$$\frac{1}{T_E} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_B}$$

période effective : décroissance de la contamination interne

période physique : décroissance du radioélément

période biologique : décroissance de la contamination due aux processus biologiques

→ En cas de contamination interne il convient de tenir compte de T_E

Il existe deux principaux modes d'irradiation :

- irradiation **naturelle**, principale cause d'irradiation avec : *irradiation externe d'origine cosmique
- irradiation **artificielle** *irradiation externe d'origine tellurique
- *irradiation interne d'origine corporelle

Irradiation naturelle

L'irradiation naturelle représente la principale source d'irradiation des populations ! Sa valeur étant d'environ 2,4 mSv/an.

**** Irradiation externe d'origine cosmique***

Origines : espaces interstellaire, interplanétaire et planétaire. Il se produit différents phénomènes avec la haute atmosphère de la Terre, tels que ionisation, excitation ou réaction nucléaire génératrice de ^{14}C et ^3H .

Nature : RI énergétiques : photons et particules chargées (électrons par exemple).

Moyenne mondiale et en France au niveau de la mer : **0,4 mSv/an**

L'irradiation externe d'origine cosmique augmente avec l'altitude : elle **double** chaque fois que l'on s'élève de **1500m**.

**** Irradiation externe d'origine tellurique***

Origine : radioéléments des sols. Ceci explique que l'irradiation externe d'origine tellurique dépende des régions, car la nature des sols varie. A titre d'exemple, certaines régions du sud de l'Inde, d'Iran et d'Europe centrale peuvent montrer une irradiation tellurique plus de 100 fois supérieure à la moyenne mondiale. De plus, ce mode d'irradiation est la cause de la radioactivité de l'eau qui se charge de particules ionisantes en s'infiltrant dans les sous-sols.

Nature : ^{40}K , uranium, thorium, Radon.

Remarque : le radon représente un danger à prendre en considération car il diffuse facilement du fait de sa nature gazeuse, et est émetteur de particules α . Il est particulièrement présent dans les régions granitiques (ex : Bretagne et massif central).

Moyenne mondiale et en France : **0,4 mSv/an**

**** Irradiation interne d'origine corporelle***

Origines : consommation d'eau (on a vu précédemment que celle-ci est radioactive), alimentation, inhalation de radioéléments présents dans l'air.

Nature : ^{40}K (consommation d'eau) représente environ 0,3 mSv /an et ^{222}Rn (provient des sols et inhalé via les habitations), représente à lui-seul en France d'une dose efficace de 1.2mSv/an.

Moyenne : un homme adulte de 70kg renferme différents radioéléments correspondant à une dose efficace de **1,6 mSv/an**.

Irradiation artificielle (résultant des activités humaines)

La source la plus importante de cette catégorie est la radioactivité et **les rayons X en médecine**, responsables d'une dose efficace de 1,6 mSv/an/hab. On doit cependant faire attention au fait que tout le monde n'est pas soumis à de telles techniques médicales, et que certains patients y sont beaucoup plus exposés que d'autres c'est pourquoi cette donnée (1,6 mSv/an/hab) doit être considérée, ni plus ni moins, comme une moyenne approximative. Certains sujets reçoivent une dose efficace de 0 mSv/an, d'autres des doses supérieures à 100 mSv/an (tels que sujets suivant une radiothérapie, technique nécessitant la mise en œuvre de fortes doses afin de détruire les tissus malades.) On notera également que d'après de récents rapports de l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire) cette dose a augmenté au fil des années du fait de la fréquence croissante du recours au scanner X.

Il existe d'autres causes mineures de l'irradiation artificielle :

- production électricité par les centrales nucléaires, dont transport et stockage des déchets radioactifs (compte uniquement pour environ 0,001mSv/an en France)
- utilisation rayons X et radioactivité dans l'industrie
- retombées essais nucléaires atmosphériques militaires (compte environ pour 0,02 mSv/an en Fr)
- conséquences Tchernobyl

On distingue plusieurs cas de figure pour ce dernier point : en Ukraine, sur le site de l'accident, le personnel d'intervention, pas ou peu protégé, a reçu une dose supérieure à 1 Sv en quelques heures, alors qu'en France, le maximum observé est de 1,25 mSv en 50 ans, et concerne surtout les enfants en bas-âge au moment de l'accident. On considère que ces retombées n'ont eu aucune influence sur l'incidence du cancer de la thyroïde en France.

Irradiation totale

On peut dresser un tableau récapitulatif des différents modes d'irradiation :

<i>Irradiation naturelle</i>	<i>Irradiation artificielle</i>
Externe cosmique : 0,4 mSv/an/hab Externe tellurique : 0,4 mSv/an/hab Interne corporelle : 1,6 mSv/an/hab	Médecine : 1,6 mSv/an/hab Causes mineures : négligeable
TOTAL : 2,4 mSv/an/hab	TOTAL : 1,6 mSv/an/hab
Irradiation totale : 4 mSv/an/hab	

Rq : Retenez bien que cette irradiation totale **varie** selon les **individus** et les **régions** de la planète.

3) Radiobiologie

I. Action des RI sur les molécules

* Rappel sur les radicaux libres

On considère une liaison de type moléculaire entre deux éléments A et B. Elle est formée de deux électrons, chaque élément mettant en commun un électron : A—B

Cette molécule peut subir une rupture homolytique sous l'effet des UV ou des peroxydes ou autre, et chaque élément récupère un électron, on a alors A° et B° indépendants.

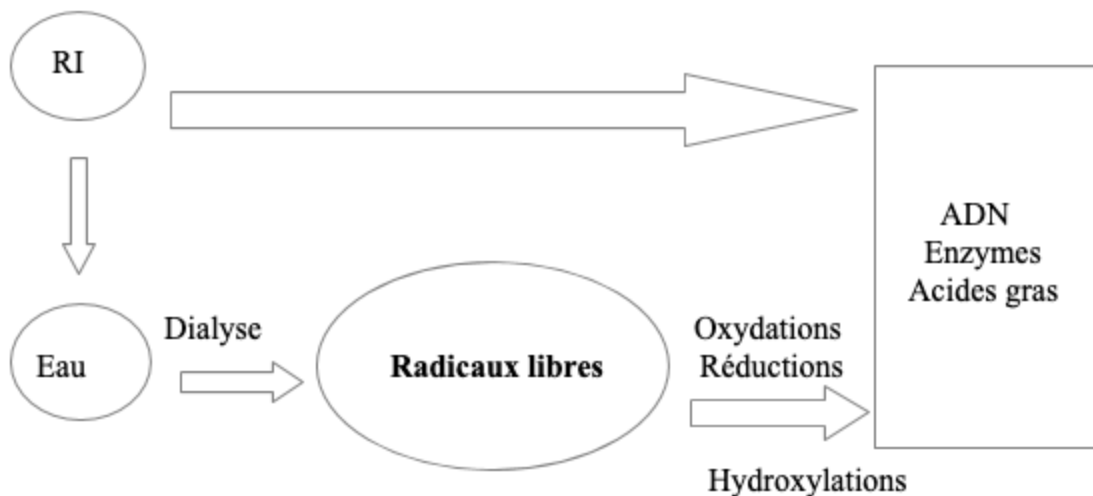
De manière générale, un radical libre est un élément ou groupement qui possède un électron célibataire sur une de ses orbitales.

* Les molécules cibles des RI

Sous l'effet des RI, l'eau peut subir une réaction de radiolyse qui conduit à l'apparition de radicaux libres qui déclencheront des réactions différentes dans l'organisme :

- H° est susceptible de provoquer des réductions,
- OH° des hydroxylations,
- H₂O₂° des hydroxylations ou des oxydations.

Ces groupements chimiques créés vont donc provoquer des modifications et altérations des molécules biologiques telles que **l'ADN, les enzymes et acides gras**. Cependant, ces macromolécules peuvent interagir directement avec les RI, sans passer par le stade « radicaux libres », comme on peut le schématiser de la manière suivante :



Il est à préciser que les radicaux libres sont responsables de 50% à 70% des lésions auto-induites de l'ADN ; il est donc primordial d'éviter leur formation. Or, celle-ci est favorisée par les peroxydes, responsables de réactions radicalaires, et ces peroxydes sont très susceptibles de se former dans notre organisme, c'est **l'effet oxygène**.

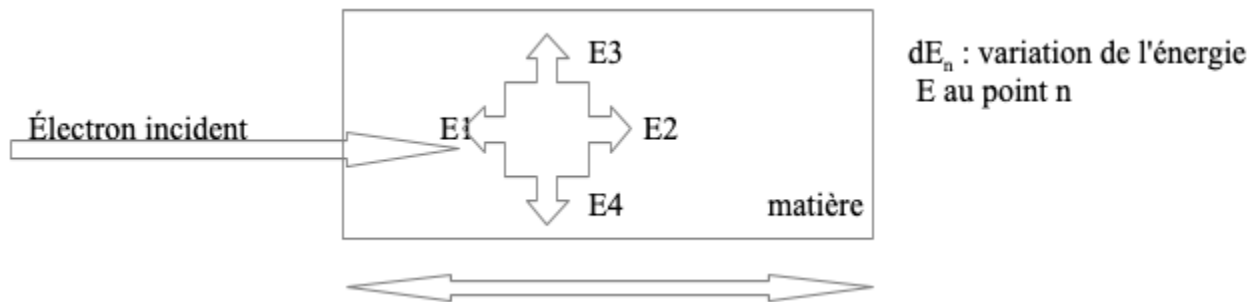
En effet, l'oxygène dissous dans notre corps stimule la création de peroxydes. D'où de très nombreuses dégradations des molécules biologiques, notamment de l'ADN, ce qui peut avoir de très lourdes conséquences.

Action des RI et des radicaux libres sur l'ADN

**** Rappel sur les notions de TEL et de DLI d'un électron***

La DLI est la Densité Linéique d'Ionisation, le TEL est le Transfert d'Énergie Linéique.

Le TEL est la somme de tous les transferts ayant lieu sur une certaine longueur l lorsqu'un électron vient réagir avec une cible. Il cède de l'énergie en plusieurs points mais peut aussi en récupérer ensuite, selon les processus mis en œuvre.



Le TEL se définit aussi par le rapport de la variation d'énergie provoquée sur l'intervalle dl de distance sur lesquels se produisent les mécanismes étudiés.

**** Principales actions des RI sur l'ADN***

La création de radicaux libres libère des électrons : en effet, lors de la rupture homolytique, il se produit un remaniement d'électrons, qui se déplacent d'un atome à un autre au niveau de ce qu'on appelle un site d'ionisation. Ces particules libérées sont particulièrement ionisantes, on constate en effet une augmentation de leurs TEL et DLI. Si ce processus a lieu sur une molécule d'ADN, il provoque la plupart du temps une **rupture du ou des brins**. Ces électrons deviennent extrêmement ionisants en fin de parcours (TEL et DLI augmentent considérablement, phénomène de grappes d'ionisation)

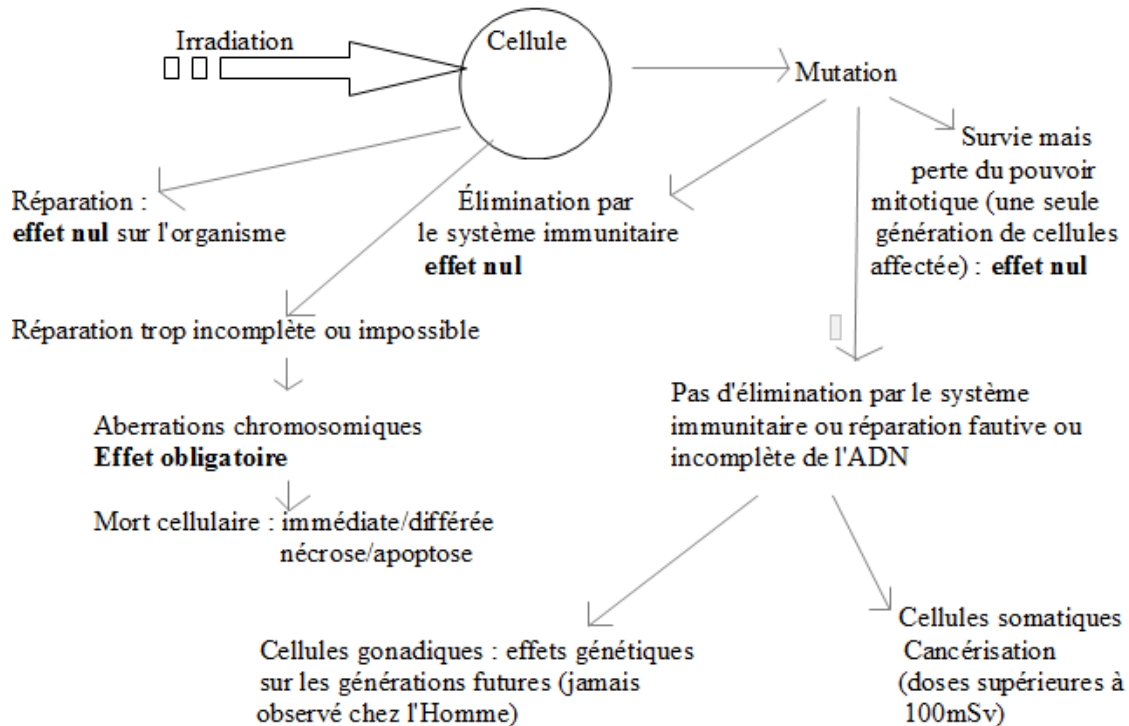
95% des lésions auto-induites affectent la **molécule simple brin** et se réparent facilement.

5% des lésions auto-induites affectent la molécule sur **son double brin** et se réparent difficilement, imparfaitement voire pas du tout : les risques de mutations, d'aberrations chromosomiques et de mort cellulaire augmentent.

Pour un débit de dose élevé, l'ionisation devient particulièrement agressive et ne laisse que très peu de temps aux mécanismes de réparation. Ces cas parfois pathologiques sont minoritaires et notre patrimoine génétique est remis en état dans la majorité des cas. De ce fait au total, le dommage final est très inférieur au dommage initial.

Conséquences cellulaires de l'action des RI sur l'ADN

Suite à une altération de son patrimoine génétique, la cellule peut avoir des devenir différents en fonction de sa capacité à réparer les dommages causés. Ainsi, elle peut soit en sortir indemne, soit mourir selon divers mécanismes que nous allons schématiser :



Conséquences tissulaires de l'action des RI

Un tissu est un ensemble de cellules, spécialisées dans une même fonction. On comprend donc que les conséquences d'une irradiation dépendent de :

- nombre de cellules atteintes
- nombre de cellules souches survivantes qui pourront régénérer des cellules saines
- durée de vie des cellules (malades et saines)
- efficacité des processus de réparation

La loi de Bergonié et Tribondeau montre que tous les tissus n'ont pas la même radiosensibilité (cf W_T). Ainsi, les tissus les plus sensibles sont ceux dont **l'activité mitotique est intense** (multiplication des cellules mutées ou atteintes), tels que la **moelle osseuse hématopoïétique, les gonades et le tube digestif**. Au contraire, les tissus à renouvellement lent (foie, tissu nerveux, muscles), sont les moins sensibles.

Cette différence s'explique surtout par le fait que lors de la mitose, le matériel génétique se regroupe sous forme de chromosomes individualisés, ils deviennent alors des cibles matérielles pour les RI et les radicaux libres.

Rq au sujet de la radiobiologie : on constate parfois une disproportion entre les faibles énergies absorbées par les tissus et l'importance des effets biologiques observés ; cette différence est due surtout aux dommages causés aux structures biologiques essentielles telles que l'ADN.

Autre remarque, dans la majorité des cas, les RI ont une capacité significative à tuer « proprement » les cellules cancéreuses et ils montrent une très faible probabilité de mutation cancéreuse sur les cellules saines aux alentours, ceci constitue les bases de la radiothérapie.

4) Radiopathologie

RAPPEL SUR LES UNITÉS UTILISÉES EN RADIOLOGIE :

Gray : dose d'énergie absorbée par un kg de matière lorsqu'il est exposé à un RI qui apporte une énergie d'un Joule. ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$).

Sievert : sert à apprécier les effets biologiques d'une dose de RI

Effets précoces et obligatoires ou déterministes

Ce sont les effets qui apparaissent chez tous les sujets (caractère obligatoire) qui sont exposés à une dose de **RI supérieure à une dose dite « seuil »**, très forte dose de l'ordre de 1 Gy et au delà. Ils **sont caractéristiques** donc on peut les identifier avec certitude comme radio-induit.

Ils apparaissent dans un laps de temps **relativement court** après l'irradiation (quelques heures à quelques mois).

La gravité des effets provoqués par ces RI est **dépendante de la dose de rayons reçus** (relation dose/effets, linéaire ou non)

Effets tardifs et aléatoires ou stochastiques

Ces effets **apparaissent tardivement** après l'irradiation et seulement chez certaines personnes sujettes à l'irradiation (d'où leur caractère stochastique). Leurs caractéristiques sont contraires aux effets précoces et obligatoires.

Ce sont des effets à **long délai d'apparition**, de quelques années à quelques dizaines d'années.

Ce sont des effets qui peuvent arriver même lors d'exposition à des doses très faibles, on parle alors **d'effets sans seuil**.

Ces effets sont principalement liés à des transformations cellulaires à type de mutation.

Ils ne sont **pas caractéristiques** (donc difficiles à identifier comme radio-induits).

Enfin leur **gravité est indépendante de la dose**, MAIS la fréquence d'apparition de ces effets est proportionnelle à la dose.

Cas des faibles doses et des très faibles doses

Il est important de retenir qu'en dessous de **100 mSv**, aucune pathologie radio-induite (notamment les cancers) n'a pu être mise en évidence formellement. En effet les faibles doses et a fortiori les faibles débits de dose sont dénués d'effets pathologiques car ils lèsent peu l'ADN et les rares lésions qu'ils occasionnent sont essentiellement simple brin et donc réparables.

5) Radioprotection

La radioprotection s'attache essentiellement à protéger des effets de l'irradiation artificielle.

Principes fondamentaux de radioprotection

Il existe 3 grands principes qui reposent sur des accords de grandes organisations internationales :

Principe de justification : Toute irradiation doit être justifiée par les avantages recueillis par la ou les personnes qui reçoivent l'irradiation. Le rapport bénéfice/risque doit être favorable à l'utilisation de RI.

Principe d'optimisation : irradiation doit être la + faible possible par rapport à l'objectif visé.

Principe de limitation : les doses délivrées et reçues ne doivent pas dépasser les limites de doses individuelles.

Mesures pratiques et de bon sens

Lors de l'utilisation des RI :

- Réduction du temps d'exposition
- Augmentation de la distance à la source (la dose variant à l'inverse du carré de la distance)
- Interposition d'écrans adaptés à la nature des rayonnements

Normes d'exposition selon les individus

Catégorie	Limite dose corps entier	Limite dose peau et extrémités
Travailleurs	20 mSv/an ou 100 mSv/5ans	500 mSv/an
Public	1 mSv/an	

Note : sous le terme générique « Travailleurs » sont compris toutes les personnes travaillant au contact de radioéléments ou à proximité de sources de rayon X (industries, hôpitaux, cabinets de radiologie).

Radioprotection de « Travailleurs »

Surveillance de l'exposition externe individuelle : port obligatoire de dosimètre.

Surveillance de l'exposition interne individuelle : examens radio-toxicologiques (urines et selles), anthropogammamétrie (spectrométrie de l'ensemble du corps).

Surveillance médicale : un examen clinique et deux bilans biologiques par an.

Surveillance des patients irradiés à des fins diagnostiques ou thérapeutiques

On applique dans ces cas les principes fondamentaux de la radioprotection et on y ajoute :

Le principe de substitution : à performances égales toute méthode non irradiante doit être préférée à une méthode irradiante.

Les patients doivent également bénéficier d'une information compréhensible.

Structures françaises de radioprotection

- **ASN** : intervient en cas d'incidents, gestion des situations d'urgence. Protège le public, les travailleurs et l'environnement des risques liés à l'utilisation du nucléaire.
- **IRSN** : fait de la recherche et des expertises, fait progresser la connaissance des RI et leurs effets.

V. Détection des rayonnements ionisants

Un détecteur est un « volume d'un milieu sensible dans lequel ont lieu les interactions avec les rayonnements incidents ». Selon le type de rayonnement que l'on cherchera à analyser nous utiliserons différents types de détecteurs.

Il y a trois phénomènes physiques qui peuvent être détectés :

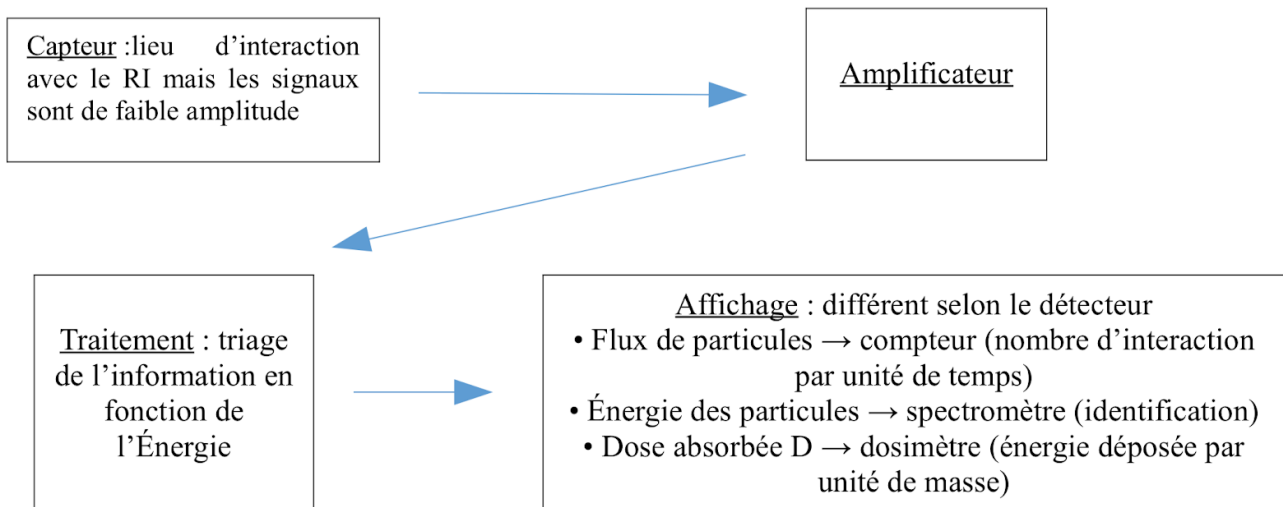
- **les ionisations**
- **les excitations**
- **la chaleur**

Ainsi, le rayonnement incident va engendrer une ionisation, une excitation ou de la chaleur dans le volume sensible du détecteur et c'est la libération d'énergie qui suit qui sera détectée.

Selon le type de détecteur plusieurs informations peuvent être fournies :

- **Compteur** : mesure le nombre d'interactions de RI avec le volume sensible du détecteur par unité de temps. Le taux de comptage s'exprime en coups/s.
- **Dosimètre** : mesure l'énergie déposée par unité de masse de matière du volume sensible du détecteur. On distingue la dosimétrie d'ambiance notée H^* de la dosimétrie individuelle notée H_p .
- **Activimètre** : mesure l'activité d'une source radioactive.
- **Spectromètre** : mesure l'énergie des RI et identifie leur nature. Ces détecteurs fonctionnent en mode compteur proportionnel.

Schéma général d'un détecteur :

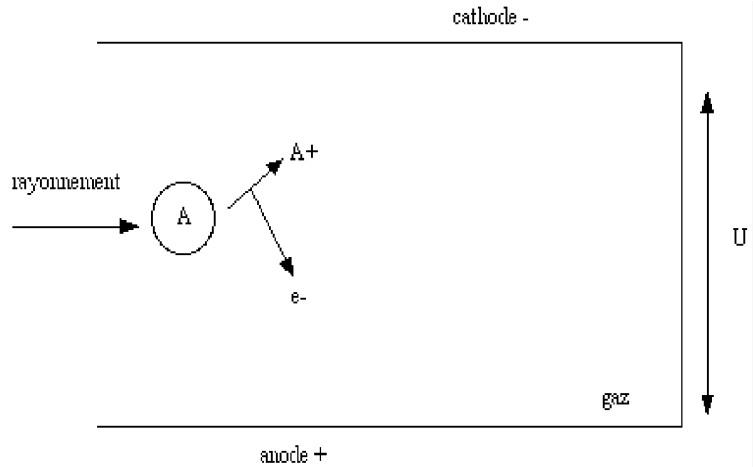


1) Détection des Ionisations

Détecteurs à gaz

Le mode de fonctionnement est très schématiquement le suivant :

- Le gaz est sensible : il peut faire des interactions avec notre rayonnement
- Lors d'une interaction un (ou des) électron est arraché à l'atome et migre vers l'anode, alors que l'atome alors transformé en cation migre vers la cathode.
- Les électrons seront + ou - attirés par l'anode selon l'importance de la tension U :



- Plus U est grande plus les électrons seront attirés et iront vite. Ils créent alors un signal électrique d'amplitude q **proportionnelle au nombre de charges recueillis** (mais qui peut varier selon la tension U pour une même E déposée).

- Si U faible : e- peu attirés, il y a de fortes chances pour que A+ et e- se recombinent

Le détecteur à gaz fonctionne selon plusieurs modes ou régimes :

* Chambre d'ionisation (tension faible)

La tension U (environ 100V) a été augmentée de telle façon que tous les électrons sont attirés donc recueillis par l'anode (pas de recombinaison). Donc on a une ionisation simple, sans recombinaison et tous les électrons créés sont collectés.

La tension U n'est pas assez forte pour qu'il y ait un phénomène de multiplication, on recueille l'électron formé par l'interaction, mais cela représente quelque chose de très faible que nous aurons du mal à mettre en évidence.

On ne peut donc pas **mesurer** le nombre d'interactions. Par contre, si l'on attend qu'un nombre suffisant d'interactions se soient produites on peut avoir un signal visible, **global**. On peut grâce à ce signal **calculer** :

- **n (nombre d'interactions) = qi (charge recueillie) / e (charge de l'e-)**
- l'énergie totale déposée : **Etot = nbre ionisations E (E moy d'ionisation)**

On mesure donc la dose, l'énergie transférée au détecteur, il peut alors servir de **dosimètre** et être utilisé comme **activimètre**. **Mais ce n'est pas un compteur**. Son mode de fonctionnement est continu et non amplifié.

* Compteur proportionnel (tension moyenne)

Si U augmente encore (environ 1000V), on recueille toujours tous les ions mais la vitesse avec laquelle ils arriveront sur les bornes sera plus importante. Ils vont donc interagir avec le gaz et former des ions et des e- secondaires : *phénomène de multiplication*.

Pour une interaction on recevra plus d'ions, le signal sera donc plus important (mais proportionnel d'un facteur q/qi à l'E absorbée), on pourra donc **dénombrer** les interactions sachant qu'il y a un **facteur de proportionnalité** (on peut l'utiliser en **mode compteur ou activimètre**).

Peut être utilisé en amont d'un **spectromètre** pour réaliser une spectrométrie. Comme tout spectrophotomètre celui-ci fonctionne selon un mode d'impulsion.

Utilisé pour les photons de faible énergie.

* Compteur Geiger (tension forte)

La tension U est tellement augmentée (environ 3000 V) que la multiplication est très importante : les photons primaires entraînent l'ionisation de tous les atomes du détecteur, ce que l'on appelle une **avalanche d'électrons**. Ainsi, dans le domaine Geiger, quelle que soit la tension U utilisée, le nombre de coups détectés par seconde sera toujours important et identique (présence d'un plateau) il n'y a donc pas de facteur de proportionnalité. Le spectrophotomètre mesure un pic constant **pour chaque interaction** quelle que soit l'énergie mise en jeu. On ne peut donc pas calculer l'énergie mise en jeu lors de l'interaction mais on peut **compter** les interactions (encore très employé en radioprotection). Il peut être utilisé pour la localisation d'une source.

ATTENTION : entre le domaine du compteur proportionnel et le domaine du compteur Geiger il existe un régime de fausse proportionnalité. Et au-dessus du domaine Geiger, il y a un régime de décharge permanente où le détecteur est inutilisable. Les GM (Geiger-Müller) ne peuvent donc être utilisés que si le **débit de dose n'est pas trop important**.

inconvénient principal des détecteurs à gaz = faible rendement

Détecteurs à semi-conducteurs

Cas de la diode à jonction P-N

Recueille les mêmes informations que le **compteur proportionnel** à gaz, c-à-d on peut mesurer toutes les impulsions et leur énergie. Une énergie de 3eV suffit à créer une paire e-/ion +.

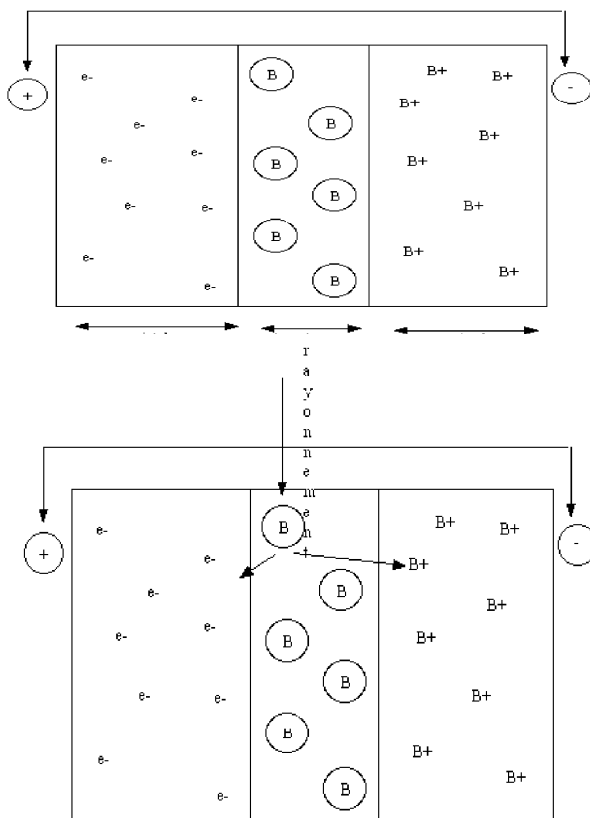
On l'utilise en **dosimétrie opérationnelle, active** mais on peut aussi, comme il est proportionnel, l'utiliser en amont d'un spectromètre pour réaliser une **spectrométrie**.

Il peut aussi être utilisé comme compteur lors d'un fonctionnement en mode impulsion.

Avantages : rendement plus élevé (matériau plus dense).

Inconvénients : dépendent de la température, doit être maintenu froid.

Principe de fonctionnement schématique du détecteur à semi-conducteur :



A la jonction p-n (zone dépeuplée) un champ électrostatique est créé par les ions (e^- et B^+) en forte densité. On applique une tension inverse pour étirer cette zone, qui représente le volume sensible de ce détecteur.

Film photographique

* Principe de fonctionnement de l'autoradiographie

Un film photographique est constitué de cristaux d'AgBr.

Lorsqu'un rayonnement β interagit avec, ils se séparent en Ag° et Br° neutres.

Les Ag° restent sur le film alors que les Br° partent.

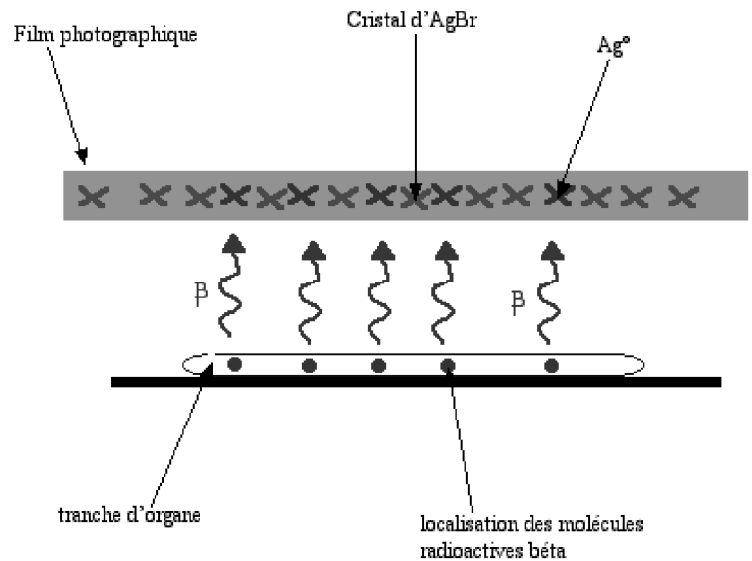
On trempe le film dans un *révélateur* qui permet de visualiser les Ag° seuls, puis dans un *fixateur* qui permet d'éliminer les AgBr restants.

* Principe de fonctionnement de la radiographie

On bombarde le film de photons qui interagissent pour certains avec le film $\rightarrow$ noircissement du film.

S'il y a un obstacle entre le film et le faisceau de photons, on a une tache blanche sur le film, car les photons vont interagir avec l'obstacle.

Ces films peuvent être utilisés comme dosimètres pour l'exposition à des photons (**Dosimétrie passive**).



2) Détection des désexcitations

On utilise des **scintillateurs** :

La scintillation en **milieu liquide** permet la détection de particule β ou α , source radioactive dissoute dans le liquide (technique de laboratoire)

la scintillation en **milieu solide** pour la détection des photons, source à l'extérieur du détecteur (imagerie nucléaire)

La scintillation en milieu solide

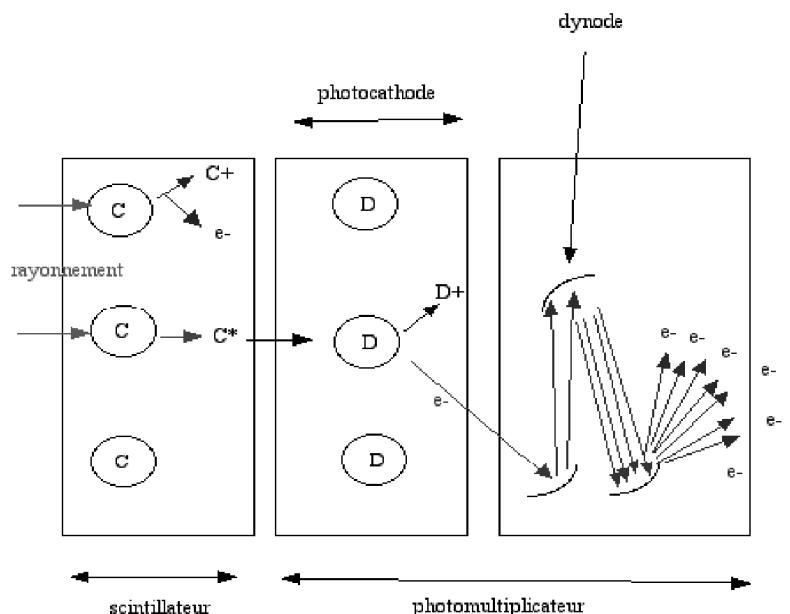
Principe de fonctionnement :

- Les photons arrivent sur le scintillateur et peuvent faire des ionisations (qui ne nous intéressent pas ici) ou **des excitations**.

- L'atome excité se désexcite en **émettant des photons** (dans le spectre visible ou proche) en quantité **proportionnelle** à l'énergie reçue.

- Ces photons vont interagir avec les atomes du **photomultiplicateur** qui émet alors des électrons, ces derniers sont amplifiés par des **dynodes**.

- Une dynode frappée par des électrons émet plusieurs électrons (multiplication), si on met plusieurs dynodes, on a au final un grand nombre d'électrons qui atteignent l'anode.



La charge que l'on obtient à l'anode est **proportionnelle** au nombre de photons qui ont interagi avec la photocathode et donc avec l'énergie déposée dans le cristal scintillant car le rendement énergétique du scintillateur est fixe.

On peut l'utiliser en amont d'un spectromètre pour réaliser de la **spectrométrie**, on peut aussi peut l'utiliser en **compteur**. Leur rendement est proche de 100%, de ce fait on les utilise comme **détecteurs d'ambiances**.

Détecteurs radiothermoluminescents, radiophotoluminescents et à luminescence stimulée optiquement

Ils sont tous constitués de cristaux qui « mémorisent la dose ». Ce qui les différencie les uns des autres, c'est le procédé utilisé pour la désexcitation provoquée des cristaux, soit par la **chaleur**, **l'énergie lumineuse** ou la **lumière LASER**.

La quantité de lumière émise lors de la désexcitation est proportionnelle à la dose de RI, c'est pourquoi on les utilise en **dosimétrie passive individuelle**. Leur **lecture est différée**.

3) Spectrométrie

Un détecteur est inutile sans spectrophotomètre qui permet le traitement du signal.

La grappe d'électrons forme ce que l'on appelle une impulsion qui se différencie par :

sa taille, proportionnelle à l'énergie absorbée par le détecteur.

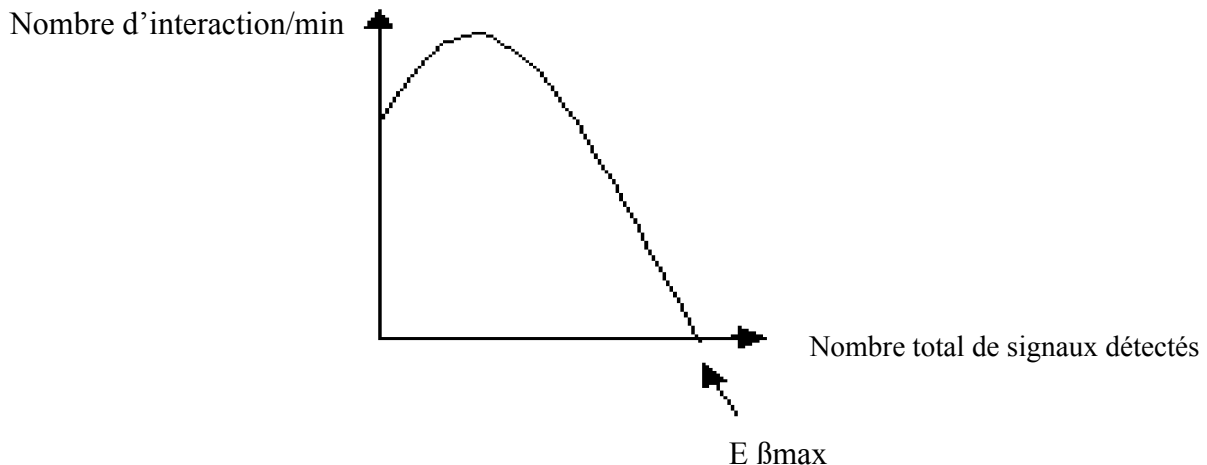
sa fréquence qui donne une indication de l'activité de la source.

Les compteurs proportionnels à gaz, les détecteurs à scintillation, et certains détecteurs à semi-conducteurs peuvent être utilisés comme spectrophotomètre.

Cas des particules chargées

- Interaction **obligatoire** avec le détecteur
- Intensité de l'impulsion proportionnelle à l'énergie totale des particules détectées
- le spectromètre mesure la hauteur de chaque impulsion et pour chacune d'entre elles il calcule le nombre d'impulsions .

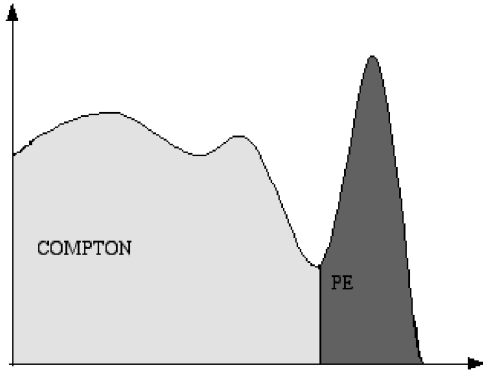
Par exemple pour les β qui sont polyénergétiques on obtient un spectre de la forme :



Connaissant la durée du recueil on calcule l'activité de la source en désintégration/seconde (surface sous la courbe = nombre total de signaux détectés).

Cas des photons

- interaction **non obligatoire** avec le détecteur (notion de rendement)
- interaction par effet Compton, produisant des impulsions d'énergie variable (électrons *polyénergétiques secondaires*)
- interaction par effet photoélectrique (électrons monoénergétiques secondaires), impulsion d'énergie maximale et constante (le photon donne toute son énergie)
- interaction par matérialisation, signal d'intensité constante (électrons monoénergétiques créés)



Le **pic photoélectrique** nous permet de connaître l'**énergie du photon incident** et l'**intensité du rayonnement**.

Attention si deux catégories de photons sont détectées simultanément il faut pratiquer une correction graphique car le Compton du plus énergétique se surajoute à l'énergie du PE (et au Compton) du moins énergétique.

Rq: ce qu'il faut retenir à tout prix sur la spectrométrie gamma c'est que la quasi totalité des interprétations qu'on peut faire se feront à partir de l'étude de **la position du pic photoélectrique**. La position de ce pic sur l'axe des abscisses renseigne sur **l'énergie des photons** tandis que la surface sous le pic renseigne sur **le nombre d'interactions** par effet photoélectrique de **photons primaires**.

4) Mesures à l'aide d'un détecteur

Il y a des corrections à faire à ce qui nous est transmis par le spectromètre selon l'efficacité du détecteur, son orientation par rapport à la source, la présence ou non de signaux parasites...

Ne pas oublier l'aspect statistique du comptage, l'écart type relatif est : $\sigma = 100/\sqrt{n}$ avec n = nombre de mesures, nombre de coups comptés par le détecteur, en effet on a à faire à des phénomènes aléatoires dont la distribution statistique des valeurs mesurées du comptage **suit la loi de Poisson**. De plus, ne jamais oublier qu'il existe une différence entre la théorie et la pratique.

* Correction de mouvement propre (bruit de fond)

Dans le nombre d'événements que l'on mesure, il y en a une partie qui ne provient pas de la source mais de l'environnement et qui constitue le bruit de fond :

$$n_{\text{vrai}} = n_0 - n_{\text{non lié à la source}}$$

* Temps mort du détecteur

Si une interaction intervient après une autre avec un délai de temps trop court, (équivalent au temps nécessaire au détecteur pour traiter la première information) elle ne sera pas comptabilisée par le détecteur (ou alors donne une impulsion très forte). C'est un facteur propre à chaque détecteur.

$$N_{\text{corrigé}} = \frac{n_{\text{vrai}}}{1 - n_{\text{vrai}} * T}$$

* Géométrie d'un détecteur

Le détecteur n'est pas toujours face à la source et ne détecte pas toujours tout ce qui est émis par la source, car la source émet dans toutes les directions, c'est-à-dire dans 4π stéradians, il faut donc appliquer une correction nommée facteur géométrique G.

$$G = (N_{\text{émis dans la direction du détecteur}}) / (N_{\text{émis par la source}}) = S / 4\pi d^2$$

Où N : nombre de photons

S : surface du volume sensible du détecteur vu depuis la source ponctuelle

d : distance de la source au détecteur

Rq: On voit bien ici aussi une variation à l'inverse du carré de la distance à la source.

* Rendement d'un détecteur

De surcroît certains photons qui atteignent le détecteur peuvent ne pas interagir avec lui, c'est à dire le traverser sans aucune réaction.

Le rendement d'un détecteur est alors défini de la manière suivante :

$$R = N_{\text{détectés}} / N_{\text{atteignant le détecteur}}$$

Le rendement d'un détecteur dépend principalement :

du coefficient d'atténuation linéique μ du matériau du volume sensible du détecteur
de l'épaisseur du volume sensible traversé par le rayonnement

* Rendement global et finalisation de la mesure d'activité

In fine le rendement global dépend du facteur GR (géométrique.rendement)

L'activité d'une source sera donc donnée par :

$$A(\text{Bq}) = N_{\text{corrigé}} - N_{\text{non lié à la source}} / GR$$

Où, dans le cas d'un compteur :

A est l'activité exprimé en Bq

$N_{\text{corrigé}}$ est le taux de comptage corrigé du temps mort

$N_{\text{non lié à la source}}$ correspond au bruit de fond

GR est le produit du facteur géométrique et du rendement exprimé en coups/s/Bq

Rq : dans le cas d'un dosimètre par exemple GR s'exprimera non plus en coups/s/Bq mais en Gy/Bq.

	<u>Formules</u>	<u>Remarques</u>
<u>Aspect statistique</u>	$\sigma(\%) = \frac{100}{\sqrt{c}}$	Plus σ est petit plus l'imprécision diminue
<u>Temps mort</u>	$n_c = \frac{n_0}{1 - n_0 \cdot t}$	
<u>Bruit de fond</u>	$n_v = n_c - n_f$	
<u>Facteur géométrique</u>	$G = \frac{N \text{ émis en direction du détecteur}}{N \text{ émis par la source}} = \frac{S}{4\pi d^2}$	Plus on s'éloigne de la source moins on capte de photons Plus la surface de détection est grande plus on capte de photons
<u>Rendement</u>	$R = \frac{N \text{ détectés}}{N \text{ atteignant le détecteur}}$	
<u>Activité</u>	$A = \frac{n_c - n_f}{GR}$	

QCM: L'atome (14 QCM)

QCM 1 : À propos de l'atome :

- A. Le ^{127}I et le ^{131}I ($Z=53$) sont des isotopes.
- B. Le ^{127}I et le ^{131}I ($Z=53$) sont des isobares.
- C. Le ^1H et le ^2H ($Z=1$) sont des isomères.
- D. L'interaction forte intervient dans la cohésion du noyau.
- E. L'interaction électromagnétique intervient dans la cohésion du noyau (attraction entre protons).

QCM 2 : À propos de l'atome :

- A. Le défaut de masse est aussi appelé énergie de liaison du noyau.
- B. Ce défaut de masse est principalement dû aux nucléons.
- C. L'énergie de liaison du noyau correspond à l'interaction forte : elle assure la cohésion du noyau.
- D. L'énergie de liaison moyenne par nucléon est proportionnelle au nombre de nucléons.
- E. L'énergie de liaison par nucléon est nulle pour l'atome d'hydrogène ^1_1H .

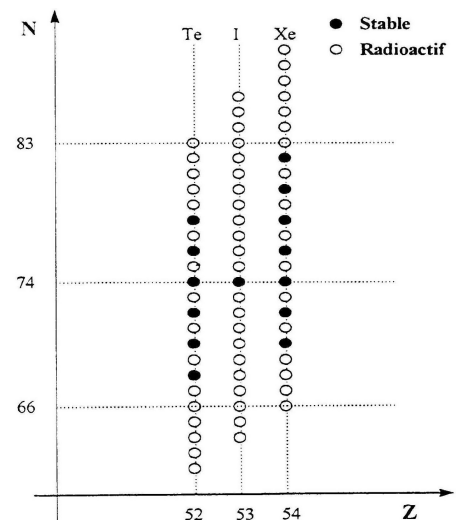
QCM 3 : Un noyau de ^{235}U ($Z=92$) subit une fission spontanée, et fournit ainsi un noyau de ^{88}Kr ($Z=36$), un autre noyau X et cinq neutrons.

Données : $E/A(^{235}\text{U})=7,6\text{MeV}$; $E/A(^{88}\text{Kr})=E/A(\text{X})=8,6\text{MeV}$; Bore : ^{10}B ($Z=5$).

- A. L'autre noyau de fission X a un nombre de masse égal à 56 et un numéro atomique égal à 142.
- B. Le noyau fils aura 88 électrons.
- C. L'énergie libérée lors de cette fission produit de la chaleur.
- D. Les cinq neutrons libérés peuvent former l'atome de Bore.
- E. L'énergie de liaison totale sera plus importante dans le noyau de ^{88}Kr que dans le noyau initial.

QCM 4 : Soit le diagramme N/Z des isotopes de 3 éléments successifs: Tellure, Iode et Xénon. Les isotopes stables sont représentés par des disques noirs et les isotopes instables par des disques blancs. Dans les items ci dessous chaque isotope sera désigné par son symbole et son nombre de neutrons (par exemple Te 75n signifie isotope du Tellure comportant 75 neutrons).

- A. Le I 74n peut provenir de la désintégration du Te 73n.
- B. Le Te 78n peut provenir du I 77n par capture électronique.
- C. Le I 74n peut donner le Xe 73n par désintégration β^- .
- D. Le I 75n semble pouvoir se désintégrer selon les modes β^+ et β^- .
- E. En considérant, malgré N et Z des noyaux donnés, qu'une émission α est possible, on se « déplace » à partir du noyau père de deux crans vers la gauche et deux crans en dessous (comme par exemple les positions respectives du Xe 77n et Te 75n sur le tableau donné).



QCM 5 : L'atome en général :

- A. Un quark Up a une valeur de $+\frac{1}{3}$.
- B. Un quark Down a une valeur de $-\frac{2}{3}$.
- C. Les propriétés des rayonnements ne peuvent s'expliquer qu'en leur accordant un double aspect : ondulatoire et corpusculaire.
- D. La relation fondamentale de l'illustre Einstein, $E=mc^2$, signifie que la masse correspond à de l'énergie et vice versa.
- E. Un neutron est constitué de deux quarks « bas » et d'un quark « haut ».

QCM 6 : À propos de l'atome:

- A. L'énergie de liaison d'un électron représente l'énergie qu'il faut fournir à cet électron pour qu'il cesse d'être soumis à l'influence électromagnétique du noyau.
- B. Cette énergie de liaison n'est pas constante pour tous les électrons : par exemple l'énergie de liaison d'un électron sur la couche K du carbone sera plus grande que celle d'un électron sur la même couche d'un atome de plomb.
- C. Pour un atome donné, l'énergie de liaison sera plus élevée pour un électron de la couche K que pour un électron en orbite sur la couche M.
- D. Si on transfère de l'énergie à un électron lié on peut provoquer une excitation (énergie donnée < à énergie de liaison) ou une ionisation (énergie donnée strictement = à énergie de liaison).
- E. Après une ionisation ou après une excitation, on assiste à un réarrangement des électrons des couches de l'atome par transitions successives (émettrices de photons) selon des schémas spécifiques de chaque atome.

QCM 7 : L'atome, un peu plus en profondeur...

- A. H (N=1 et Z=1) et H (N=2 et Z=1) sont des isotopes, c'est-à-dire qu'il appartiennent à un même élément mais peuvent différer par leur numéro atomique.
- B. Les deux interactions qui expliquent la cohésion du noyau sont l'interaction électromagnétique et l'interaction faible.
- C. L'énergie de liaison assure la cohésion du noyau.
- D. L'énergie de liaison du noyau est le résultat de l'interaction forte.
- E. Si on considère des atomes isobares, il est possible qu'un isotope instable, « compris » entre deux isotopes stables, puisse subir une désintégration β^+ ou β^- .

QCM 8 : Les réactions suivantes sont possibles :

- A. $^{16}_8\text{O} (^3_2\text{He}, p) ^{18}_9\text{F}$: transmutation permettant d'obtenir un nouveau noyau.
- B. $^{14}_7\text{N} (p, \alpha) ^{11}_6\text{C}$: diffusion inélastique permettant d'obtenir un nouveau noyau.
- C. $^{27}_{13}\text{Al} (p, d) ^{24}_{12}\text{Mg}$.
- D. $^{98}_{42}\text{Mo} (n, \gamma) ^{99}_{42}\text{Mo}$.
- E. $^{14}_7\text{N} (d, n) ^{15}_8\text{O}$: réaction permettant d'obtenir un neutron d'énergie de masse égale à celle de la particule incidente.

QCM 9 :

- A. $^{98}_{42}\text{Mo} (n, p) ^{98}_{42}\text{Mo}$ est possible.
- B. $^{14}_7\text{N} (d, n) ^{15}_8\text{O}$ est possible.
- C. Pour disposer d'une source de neutrons, on peut utiliser la réaction nucléaire suivante : $^{130}_{52}\text{T} (n, 1\gamma 1\beta^-) ^{131}_{53}\text{I}$.
- D. Les réactions nucléaires qui font intervenir des particules chargées comme rayonnement incident, sont surtout réalisées dans des réacteurs nucléaires ; les réactions qui font intervenir des particules non chargées sont réalisées dans des accélérateurs de particules.
- E. Un bêtatron accélère exclusivement les électrons négatifs.

QCM 10 : Soit une particule de masse m animée d'une vitesse $v = 0,1c$ (c vitesse de la lumière dans le vide). Approximations utiles : masse d'un proton au repos : environ 940 MeV et $1/\sqrt{1-\varepsilon}$ tend vers $1 + (1/2)\varepsilon$ quand ε tend vers 0

- A. En mécanique relativiste, l'énergie totale d'une particule est égale à la somme de son énergie au repos et de son énergie cinétique.
- B. En mécanique relativiste, l'énergie cinétique est égale au produit du facteur de Lorentz, de la masse de la particule et de la vitesse de la lumière dans le vide au carré.
- C. Si la particule est un électron, son énergie cinétique est environ égale à 5 keV
- D. Si la particule est un électron, son énergie cinétique est environ égale à 2,5 keV
- E. Si la particule est un proton, son énergie cinétique est environ égale à 4,7 keV.

QCM 11 : A propos de la constitution du noyau :

- A. Il existe six quarks connus entrant dans la composition du noyau.
- B. Les hadrons regroupe l'ensemble des particules formées de quarks, dont les baryons.
- C. Un quark Up et un quark Down ont des charges électriques qui s'annulent.
- D. L'interaction forte se fait par l'intermédiaire des gluons entre les quarks.
- E. L'interaction forte permet la cohésion du noyau, à ne pas confondre avec l'énergie de liaison qui est un défaut de masse.

QCM 12 : A propos du réarrangement électronique :

- A. Il est à l'origine de photons γ , dits photons de fluorescence.
- B. Les photons émis peuvent-être observés sont forme de spectre de raies.
- C. Il peut-être à l'origine d'électrons Auger par collisions d'électrons lors du réarrangement.
- D. Le spectre des électrons Auger émis est continu.
- E. Les éléments lourds produisent plus d'électrons Auger, dus à leur important cortège électronique.

QCM 13 : A propos des généralités :

- A. Les noyaux instables se situent près d'une ligne courbe appelée « vallée d'instabilité ».
- B. L'énergie de première ionisation correspond à l'énergie minimale nécessaire pour exciter un atome.
- C. Les électrons de la bande de valence contribuent à la cohésion locale d'un solide (par exemple un cristal).
- D. Lorsqu'une particule rencontre son antiparticule, il se produit une réaction d'inhibition avec disparition de matière et le plus souvent de l'émission d'énergie sous forme de photons γ .
- E. 4 lois de conservations sont à respecter pour les réactions nucléaires alors qu'il y en a 5 pour les transformations radioactives.

QCM 14 : A propos de la tomographie par émission de positons :

- A. Comme son nom l'indique elle repose sur l'émission de deux positons, émis systématiquement à 180° l'un de l'autre.
- B. Elle peut être utilisée suite à l'émission de β^+ .
- C. La réaction d'annihilation a lieu quand deux particules de même charge et de même masse se rencontrent.
- D. Cette technique n'est que très peu utilisée aujourd'hui car très radioactive pour le corps humain.
- E. Les deux photons sont émis dans le même sens mais dans deux directions opposées.

CORRECTION DES QCM (Atomes)

QCM 1 : AD

- B. Ce sont des isotopes car ils ont le même numéro atomique Z.
(astuce : iSotope : même Z, isobAre : même A)
- C. Ce sont des isotopes.
- E. L'interaction électromagnétique est responsable de la répulsion des protons entre eux (attraction pour les charges opposées), et la cohésion est assurée par l'interaction forte dans le noyau entre les quarks par les gluons (donc l'interaction forte est plus « **attractive** » que l'interaction électromagnétique).

QCM 2 : ABE

- C. Attention à ne pas confondre interaction forte et énergie de liaison du noyau. L'énergie de liaison du noyau est un défaut de masse.
- D. La courbe de E_l/A en fonction de A n'est pas linéaire, donc ce n'est pas proportionnel.

QCM 3 : Aucune

- A. C'est l'inverse : $A(\text{nombre de masse}) = 142$ et $Z(\text{numéro atomique}) = 56$
- B. Non il en aura 36, c'est la loi de conservation de la charge électrique et rester neutre. Il y en aurait 88 l'élément serait négatif puisqu'il n'y a que 36 protons.
- C. L'énergie libérée est sous forme d'énergie cinétique. C'est la loi de la conservation de quantité de mouvement
- D. Les 5 neutrons sont libérés et partent séparément avec leur énergie cinétique.
- E. $E_l(\text{Kr}) = 8,6 \times 88 = 756,8 \text{ MeV} < E_l(\text{U}) = 235 \times 7,6 = 1786 \text{ MeV}$.

QCM 4 : BDE

- A. Une désintégration s'accompagne forcément d'une transition proton $\rightarrow$ neutron ou neutron $\rightarrow$ proton ; ici l'I 74n a un p^+ et un neutron de plus que le Te 73n.
- C. I 74n est stable.
- D. Vrai : • Si c'est une β^- on obtient le Xe 74n représenté par un disque noir, et donc stable (gain d'un proton et perte d'un neutron pour que le nombre de masse A reste le même).
• Si c'est une β^+ on obtient le Te 76n lui aussi représenté par un disque noir, et donc stable (gain d'un neutron et perte d'un proton).

QCM 5 : CDE

- A. Faux, $+2/3$
- B. Faux, $-1/3$
- D. VRAI, on peut considérer l'énergie de liaison d'un noyau comme une masse (ou énergie) perdue par les nucléons au moment de la formation de l'atome.

QCM 6 : ACE

- B. L'énergie de liaison augmente avec le nombre de couches électroniques que comprend l'atome : le Pb comprend plus de couches que le C donc l' E_l est plus forte dans le cas du Pb (NB : $E_l(K) = 13,6 \cdot Z^2$).
- D. Énergie égale ou supérieure à l'énergie de liaison pour une ionisation.

QCM 7 : E

- A. Faux, isotope signifie numéro atomique identique donc même élément mais nombre de masse différents.
- B. Faux, c'est l'interaction forte.
- C. Faux, c'est l'interaction forte.
- D. Faux, c'est l'équivalent énergétique du défaut de masse d'un atome.

QCM 8 : AD

proton : ${}^1_1\text{p}$, neutron ${}^1_0\text{n}$, la particule alpha ${}^4_2\alpha$ et le deuton : ${}^2_1\text{d}$ → PAR COEUR PRIMANT!

B. La diffusion inélastique permet d'obtenir un noyau X' correspondant à l'état excité du noyau X initial. Or ici après la réaction le nouveau noyau obtenu (carbone) est différent du noyau initial ; il s'agit donc d'une transmutation.

C. Le nombre de protons n'est pas conservé ($13+1 \neq 12+1$) ainsi que le nombre de nucléons ($27 + 1 \neq (24 + 2)$). Rappel → γ : $Z=A=0$

E. Le noyau d'hydrogène est constitué d'un proton donc sa masse est (légèrement) supérieure à celle d'un unique neutron. Par conséquent son énergie (celle de l'hydrogène) potentielle est supérieure.

QCM 9 : BE

A. Z n'est pas conservé..

C. La réaction ne produit pas de neutrons, on ne peut donc pas s'en servir pour disposer d'une source de neutrons.

D. C'est l'inverse : particules neutres → réacteurs nucléaires et particules chargées → accélérateurs.

QCM 10 : AD

B. Si on traduit cette phrase en formule, on obtient $E = \gamma mc^2$: il s'agit de la formule de l'énergie totale et non celle de l'énergie cinétique $E_c = (\gamma - 1)mc^2$

C. Ici pas besoin de calculer γ , mais il faut quand même se souvenir sa formule.

Grâce à l'approximation donnée (toujours donnée si besoin), on sait que $\gamma = 1 + (1/2)(v^2/c^2)$, et $v^2/c^2 = (0,1c)^2/c^2 = 0,01$.

On a donc $E_c = (\gamma - 1)mc^2 = (1 + (1/2)0,01 - 1)mc^2 = 0,005mc^2$.

Pour l'électron : $E_c = 0,005 \cdot 511 \text{ keV}$ (à connaître par cœur!) = env. 2,5 keV

E. Pour le proton, $E_c = 0,005 \cdot 940 \text{ MeV} = \text{env. } 4,7 \text{ MeV}$. Attention aux unités !

QCM 11 : BDE

A. Il y a six quarks connus, mais seulement deux participent à la formation du noyau (Up et Down).

C. Un quark Up a pour charge $2/3$ et un quark Down $-1/3$. La valeur de la charge est différente, il faut deux Down pour contre-balancer un Up (ça fait des p'tits neutrons !).

QCM 12 : B

A. Petite mise au point pratique:

- photons de luminescence, ou X : suite à un réarrangement électronique : origine électronique
- photon de fluorescence : suite à une désexcitation du cortège électronique : origine électronique
- photon gamma (γ) : suite à une désexcitation nucléaire ou annihilation : origine nucléaire

C. Par effet photoélectrique : un photon X transmet son énergie à un électron et le rend ionisant.

D. Pour les électrons Auger on a aussi un spectre de raies : comme pour les photons, c'est dû au fait que les couches du cortex électronique ont des énergies précises et caractéristiques de l'atome.

E. Ça paraît logique, mais c'est faux. Retenez : légers = Auger, lourds = photons. Attention cependant, les atomes légers peuvent aussi émettre des photons et vice-versa.

QCM 13 : CE

A. Ce sont les noyaux STABLES et la « vallée de STABILITÉ ». Reste concentré.e petit.e piou :).

B. Faux, pour IONISER un atome.

D. Faux, une réaction d'annihilation, le reste de la phrase est juste !

QCM 14 : B

A. On observe une émission de photons et non de positons ! D'où le terme photons d'annihilation.

C. Même masse mais charges différentes.

D. Elle est très utilisée dans la localisation de radioélément.

E. Faux, c'est l'inverse.

QCM: Radioactivité et transformations isobariques (18 QCM)

QCM 1 : Soit la désintégration radioactive du Na ($Z=11$ et $A=32$) en Mg ($Z=12$ et $A=32$) et X.

- A. X correspond à un rayonnement électromagnétique.
- B. La masse du Mg obtenu est supérieure à celle du Na.
- C. En supposant que le noyau père était immobile, on peut dire que la somme vectorielle des énergies cinétiques des éléments fils sera nulle aussi.
- D. En théorie, la moitié des noyaux pères sera désintégrée au bout d'un temps appelé demi-vie.
- E. X a un numéro atomique nul.

QCM 2 : On veut tester un nouveau médicament contre le saturnisme. Pour cela, on décide de rétablir les canalisations en plomb dans les toilettes des Ranguillois, pour faire contracter la maladie à un grand nombre de personnes. On cherche donc à produire du plomb.

Donnée : Pb ($Z=82$ $A=206$) et le Ne est un gaz rare stable.

- A. On peut le produire par transformation radioactive à partir d'un atome Y ($Z=81$ $A=205$).
- B. On peut le fabriquer par désintégration radioactive à partir du polonium Po ($A=210$ et $Z=84$) en obtenant également un noyau alpha ($Z=2$ et $A=4$).
- C. On peut l'obtenir à partir d'une désintégration radioactive d'un atome Z de numéro atomique 82 et de nombre de neutrons de 124.
- D. Ayant 10^8 noyaux de Po à un instant t , une demi-vie plus tard on aura obtenu 10^4 noyaux de Pb.
- E. Considérant que la moralité de cette action est douteuse, on peut plutôt fabriquer (toujours par désintégration radioactive) du fluor ($Z=9$ et $A=11$) pour les dents des enfants à partir du Ne ($Z=10$).

QCM 3 : Au temps t , une source radioactive contient 10×10^{10} atomes de l'élément père.

Au temps $t+60\text{min}$, il en reste $7,5 \times 10^{10}$. (on prendra $\ln 2 = 0,700$ environ)

- A. Au temps $t+60\text{min}$, il est apparu $2,5 \times 10^{10}$ atomes d'éléments fils.
- B. La période de cet élément est de 2h.
- C. La constante de radioactivité de cet élément est de 0,0058 min.
- D. Au temps $t+120\text{min}$, il reste 5×10^{10} d'éléments pères.
- E. Au temps $t+240\text{min}$ il est apparu $7,5 \times 10^{10}$ éléments fils.

QCM 4 : Soit la réaction nucléaire : ${}^{39}_{19}\text{K} ({}^2_1\text{H} ; n) {}^{40}_{20}\text{Ca}$

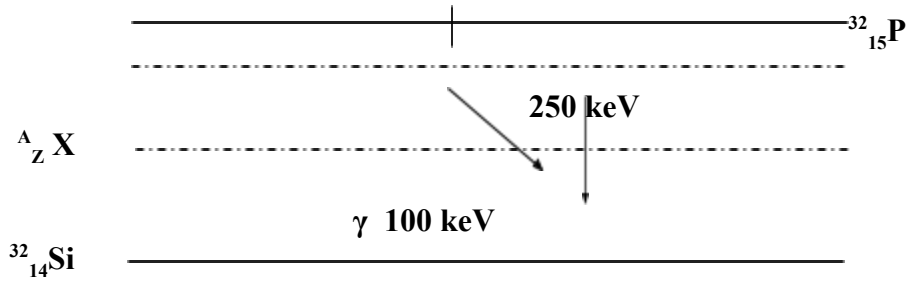
- A. Cette réaction est indispensable car elle permet d'obtenir du calcium en grande quantité. Celui-ci pourra alors être utilisé en médecine, par exemple dans le traitement de décalcifications osseuses.
- B. Le noyau composé a pour numéro atomique 41.
- C. Le nombre de nucléons du noyau composé est de 20.
- D. Les neutrons ainsi produits pourront être ralentis en interagissant avec l'hydrogène de l'eau.
- E. Sur la base des données fournies on peut prévoir que si le K a une vitesse de 10 m/s, le Ca produit aura aussi une vitesse de 10 m/s.

Donnée : le ${}^{40}\text{Ca}$ représente environ 96% du calcium naturel.

QCM 5 : Soit le ${}^{20}\text{O}$ qui se transforme en ${}^{20}\text{F}$ par émission β^- pure. L'énergie moyenne des particules β^- émises est de 70 keV :

- A. La différence de masse entre le noyau de ${}^{20}\text{O}$ et celui de ${}^{20}\text{F}$ est d'environ 210 keV.
- B. Un événement associé à cette transformation peut être l'apparition d'un isomère métastable.
- C. Il est possible que le ${}^{20}\text{F}$ soit émetteur β^- .
- D. Les neutrinos émis en même temps que les particules β^- ont une énergie comprise entre 0 et 210 keV environ.
- E. Le défaut de masse de l'oxygène est supérieur à celui du fluor car l'oxygène précède le fluor dans la classification périodique des éléments.

QCM 6 :

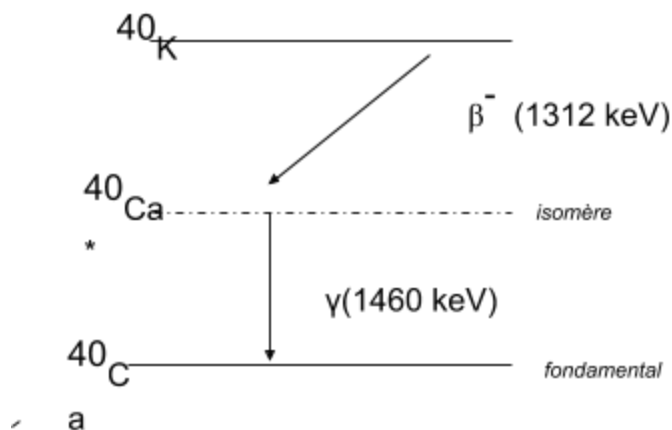


- A. Il ne peut s'agir que d'une désintégration β^+ .
- B. S'il s'agit d'une désintégration β^+ , le noyau de $^{32}_{14}\text{Si}$ a une masse inférieure à celle du $^{32}_{15}\text{P}$ de 1,372 MeV.
- C. Le noyau X est le $^{32}_{14}\text{P}$ excité qui donnera du $^{32}_{14}\text{Si}$ par émission d'un photon de 100 keV.
- D. Un événement associé à cette transformation est la possibilité d'émission d'électrons de conversion interne d'énergie cinétique $E_c = 100 - \epsilon$ (en keV), avec ϵ l'énergie de liaison de l'électron concerné.
- E. S'il s'agit d'une désintégration β^+ , l'énergie moyenne des particules détectées est de 100 keV.

QCM 7 : Soit un atome de Radium $^{226}_{88}\text{Ra}$ qui subit une désintégration α pure donnant un atome de Radon (Rn), une particule α^{++} d'énergie cinétique 5,252 MeV et de masse 3,726 MeV, ainsi que deux électrons.

- A. La transformation est dite non isobarique : l'atome de Radon obtenu est le $^{224}_{86}\text{Rn}$.
- B. La particule α^{++} éjectée est un noyau d'hélium qui captera dans le milieu deux électrons pour former un atome d'hélium aussi nommé particule α .
- C. L'atome de Radium perd environ 10 MeV pour former celui de Radon.
- D. Si l'on observe plusieurs désintégrations du même radioélément, les particules α^{++} détectées auront une énergie cinétique comprise entre 0 et 5,252 MeV; leur parcours dans la matière est alors fonction de leur énergie et augmente lorsque l'énergie augmente.
- E. Ce type de désintégration ne concerne que les atomes dits lourds, de numéro atomique supérieur à 52.

QCM 8 : Soit le schéma suivant de désintégration du ^{40}K qui produit l'atome ^{40}Ca stable. La structure électronique du Potassium présente les énergies de liaisons suivantes : couche K = 80 keV, L = 65 keV, M = 20 keV et N = 7 keV.



- A. Le noyau de Potassium possède un neutron de moins que le noyau de Calcium.
- B. Le noyau de Calcium a une masse inférieure à celle de l'atome de Potassium de 3283 keV.
- C. L'énergie moyenne des particules β est sensiblement de 525 keV.
- D. L'énergie moyenne des antineutrinos est sensiblement de 875 keV.
- E. Si des électrons de conversion interne sont produits, leur énergie minimale sera de 1380 keV.

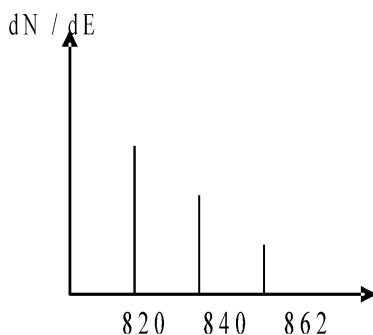
QCM 9 : On considère la désintégration suivante :



- A. L'ensemble des particules α émises sont monoénergétiques.
- B. La masse de la particule alpha est de 3726 MeV.
- C. Si le photon γ émis à une énergie de 3,2 MeV et que l'énergie cinétique de la particule α est de 2,9 MeV, alors la différence de masse observée entre l'atome de Thorium et de Radium est d'environ 3733,1 MeV.
- D. Cette transformation non isobarique s'observe pour les atomes avec $Z > 52$, à l'exception du ${}^8_4\text{Be}$.
- E. Le photon γ émis peut donner un électron de conversion interne en passant dans le champ d'un atome car il est directement ionisant.

QCM 10 : Soit un atome X qui se désintègre en un atome Y avec $(m_X - m_Y)c^2 = 0,880 \text{ MeV}$. Cette désintégration pure présente un spectre de raies. (Énergie de liaison des électrons périphériques de X : K=60 keV; L=40 keV; M= 18 keV).

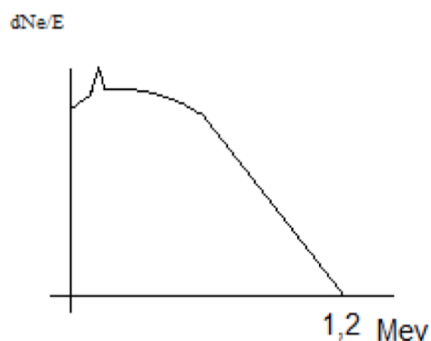
- A. Il s'agit d'une désintégration β^+ .
- B. La différence de masse entre X et Y est seulement due à une perte par énergie cinétique de la particule émise.
- C. L'énergie cinétique de la particule émise est toujours de 820 keV.
- D. Le spectre de raies peut se représenter de la manière suivante :



- E. Cette désintégration ne présente qu'un mini seuil de 60 keV.

QCM 11 : Soit les spectres d'émission suivants : Donnée : Le rendement du détecteur est de 100%.

Spectre 1



Spectre 2



- A. Le spectre d'émission n°1 correspond à un spectre d'émission β^+ .
- B. Le spectre d'émission n°2 correspond à un spectre d'émission β^+ .
- C. L'émetteur β^- représenté sur l'un des deux schéma produit une désintégration β^- pure.
- D. L'énergie moyenne de l'émission β^+ est de 0,48 MeV.
- E. L'énergie moyenne transférée au milieu par les particules β^- , en supposant que l'on détecte 1000 particules β^- , est de 480 MeV.

QCM 12 : À propos des transformations non isobariques.

- A. Une particule α a la masse d'un atome d'hélium.
- B. Une désintégration α présente une perte fixe de 3728 MeV.
- C. L'atome ^{44}X peut donner l'atome ^{40}Y par désintégration α .
- D. Il existe des noyaux pouvant présenter une désintégration α ou une fission nucléaire spontanée.
- E. Les atomes ^{235}U et ^{144}Ba sont les seuls atomes naturels spontanément fissibles.

QCM 13 : À propos de la décroissance radioactive :

- A. L'activité (A) correspond au nombre de désintégrations d'une population d'atomes instables par unité de temps.
- B. La constante radioactive (λ) correspond à la probabilité qu'un noyau se désintègre pendant une unité de temps.
- C. La période radioactive (T) correspond au temps au bout duquel l'activité est divisée par 2.
- D. La période (T) est d'autant plus courte que la constante radioactive (λ) est faible.
- E. Soit une population d'atomes radioactifs et N_0 leur nombre initial, au bout de 2 périodes (2T), N_0 est divisé par 4.

QCM 14 : Une population de noyaux instables X de période radioactive $T=4\text{h}$ et d'activité initiale $A_0=24\,000\text{ Bq}$ se désintègre en formant des noyaux Y stables.

Si à $t = 0$ aucun noyau Y n'est encore formé, on a :

- A. à $t=12\text{h}$, une activité de 3000 Bq pour X.
- B. à $t=12\text{h}$, une activité de 8000 Bq pour X.
- C. au bout de 4T, une activité de 1500 Bq pour X.
- D. à $t=8\text{h}$, une activité de 6000 Bq pour Y.
- E. une constante radioactive λ pour X égale à $0,17325\text{ s}^{-1}$.

QCM 15 : À propos de la filiation radioactive.

Soit dans un espace clos la transformation radioactive d'un élément père A instable en un élément fils B instable aussi. On a :

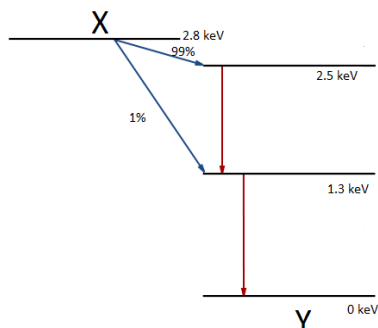
- Pour A : $T_A=10\text{h}$, $A_0 = 32\,000\text{ Bq}$ et $N_0 = 64 \times 10^6$

- Pour B : $T_B=10\text{min}$.

- A. Ici la période du père est plus de 10 fois supérieure à celle du fils, on aboutira donc à un équilibre de régime, ce qui signifie qu'il se détruira presque autant de noyaux fils qu'il ne s'en produira par désintégration des noyaux pères.
- B. Lors d'un équilibre de régime, les activités du père et du fils sont presque identiques.
- C. Au bout de 10 périodes ($10 T_A$), B va évoluer seul car il n'y a plus de noyaux A.
- D. A $t=30\text{h}$, l'activité de B est de 4000 Bq.
- E. Au bout de 30h, il s'est formé 56×10^6 noyaux de B.

bonus : calculez $\lambda(A)$!

QCM 16 : Un générateur de Y à l'état excité (de période 3h) contient du X (de période 33h). Compte tenu du schéma de désintégration simplifié du X ci-contre , il apparaît que :
Rappel : $\exp^{-\varepsilon}$ tend vers $(1-\varepsilon)$ quand ε tend vers 0.



- A. Dans le générateur sont émis des photons de 1,2 keV.
- B. Dans le générateur à l'équilibre, toutes les 3h, l'activité de Y à l'état excité décroît d'un facteur compris entre 0,87 et 0,90.
- C. Dans le générateur à l'équilibre, toutes les 3h, l'activité de Y à l'état excité décroît d'un facteur compris entre 0,91 et 0,94.
- D. L'activité de Y à l'état excité est exactement égale à l'activité de X.
- E. L'énergie cinétique maximale des électrons émis par X est de 2,8 keV.

QCM 17 : énoncé commun aux qcm 17 et 18 :

	Symbole	Énergie de masse (MeV)	Période
Arsenic 68	$^{68}_{33}\text{As}$	63283.12	152 secondes
Germanium 68	$^{68}_{32}\text{Ge}$	63275.02	270 jours
Gallium 68	$^{68}_{31}\text{Ga}$	63274.92	27 jours
Zinc 68	$^{68}_{30}\text{Zn}$	63272;00	
Cuivre 68	$^{68}_{29}\text{Cu}$	63276.46	
Nickel 68	$^{68}_{28}\text{Ni}$	63278.52	

- A. Le Zinc 68 est un isotope stable du Gallium 68.
- B. Il existe une filiation radioactive Nickel 68 – Cuivre 68 – Zinc 68
- C. L'Arsenic est excédentaire en proton.
- D. Le Nickel peut subir une capture électronique.
- E. L'Arsenic est susceptible de produire une émission alpha.

QCM 18 : A propos du tableau précédent

- A. Il peut exister un équilibre de régime entre l'Arsenic 68 et le Germanium 68.
- B. Il peut exister un équilibre de régime entre le Germanium 68 et le Gallium 68.
- C. Le nombre de noyau du père et du fils est identique dans la réaction du Germanium vers le Gallium.
- D. Le nombre de noyau du père et du fils est identique dans la réaction du Germanium vers le Gallium.
- E. Le nombre d'atomes de $^{68}_{32}\text{Ge}$ est environ 10 fois plus important que celui du $^{68}_{31}\text{Ga}$.

CORRECTION DES QCM (Radioactivité et transformations isobariques)

QCM 1 : CD

- A. D'après les lois de conservation on déduit que c'est un rayonnement particulaire : émission d'un électron (particule β^-). Cependant rien n'indique qu'il ne puisse pas être accompagné d'un rayonnement électromagnétique ($R\gamma$).
- B. Le noyau fils a toujours une masse inférieure au noyau père.
- C. Vrai. Selon la loi de conservation de la quantité de mouvement.
- E. Pour l'électron $A = 0$ et $Z = -1$.

QCM 2 : B

- A. Le noyau père a toujours une masse supérieure au noyau fils.
- C. Il s'agit du Pb !!
- D. On obtient $0,5 \times 10^8$ noyaux de Pb ($10^8/2$).
- E. On n'a pas de transformation radioactive à partir d'un élément stable !!

QCM 3 : ABDE

- B. On remarque qu'on a $N(t+60) = 7,5 \times 10^{10}$, on peut donc déduire qu'on aura :
 $N(t+120) = 5 \times 10^{10}$. Or $N(t+120) = N(t)/2$ donc $T_{1/2} = 120 \text{ min} = 2 \text{ h}$.
- C. Valeur exacte mais la constante radioactive s'exprime en temps⁻¹ (ici en min⁻¹).

QCM 4 : D

- A. Compte tenu de l'abondance de l'isotope obtenu, la réaction est totalement inutile (il représente 96% du calcium naturel).
- B. C. Les chiffres sont inversés $Z=20$ et $A=41$
- E. On ne peut connaître la vitesse du Ca car il nous manque la vitesse des autres éléments pour pouvoir appliquer la loi de conservation des énergies cinétiques.

QCM 5 : C

- A. 210 keV correspond à la différence de masse entre les atomes :

- Différence de masse entre les noyaux : perte d'une particule β^- de masse 0,511 MeV et d'énergie cinétique E_{β^-} et d'un antineutrino d'énergie $E_{\nu} = E_{\beta^- \text{ max}} - E_{\beta^-}$

$$\Delta m_{\text{noyau}} c^2 = m_{\beta^-} c^2 + E_{\beta^- \text{ max}} = m_{\beta^-} c^2 + 3 \times E_{\beta^- \text{ moy}} = 511 + 210 = 721 \text{ keV}$$

- Différence de masse entre les atomes : les atomes perdent une particule β^- de masse 0,511 MeV et d'énergie cinétique E_{β^-} et un antineutrino d'énergie $E_{\nu} = E_{\beta^- \text{ max}} - E_{\beta^-}$ mais captent un électron de masse 0,511 MeV, $\Delta m c^2 = E_{\beta^- \text{ max}} = 210 \text{ keV}$.

- B. La transformation est pure, donc par définition l'élément fils est à son état fondamental.
- D. Ce sont des antineutrinos qui sont émis, l'énergie est quant à elle juste.
- E. Le défaut de masse (énergie de liaison du noyau) du F est $>$ à celui de l'O car il est plus stable.

QCM 6 : DE

A. Il peut s'agir aussi d'une capture électronique

B. Faux, il s'agit de la masse de l'atome et non du noyau. Pour la désintégration β^+ , le noyau perd un β^+ de masse $mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$ et d'énergie maximale (complétée par le neutrino) $E_{\beta^+ \text{ max}} = 0,250 \text{ MeV}$ et un photon de $0,1 \text{ MeV}$ donc

$$\Delta m_{\text{noyau}} c^2 = 0,511 + 0,250 + 0,100 = 0,861 \text{ MeV.}$$

L'atome perd quand à lui en supplément un électron de masse $mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$ d'où

$$\Delta m_{\text{atome}} c^2 = 0,511 + 0,861 = 1,372 \text{ MeV.}$$

C. Le noyau X est le $^{32}_{14}\text{Si}$ excité (le nombre de protons a déjà changé).

E. Vrai $E_{\beta^+ \text{ moy}} = 0,4 \times 250 = 100 \text{ keV.}$

QCM 7 : C

A. L'atome obtenu est le $^{222}_{86}\text{Rn}$.

B. La particule α^{++} = particule α = 2 neutrons + 2 protons et atome d'Hélium = 2 neutrons + 2 protons + 2 électrons (masse de la particule α = masse du **noyau** d'Hélium $\neq$ masse **atome** d'Hélium).

C. Vrai : $\Delta Mc^2 = E_{c\alpha} + m_{\alpha} c^2 + 2m_e c^2 = 5,252 + 3,726 + (2 \times 0,511) = 10 \text{ MeV.}$

D. Les particules α^{++} sont monoénergétiques (d'énergie $5,252 \text{ MeV}$) et auront donc un parcours constant et finit dans la matière.

E. A l'exception du ^8_4Be .

QCM 8 : BDE

A. C'est l'inverse. L'instabilité β^- se caractérise par la transformation d'un neutron en proton. Ainsi, le $^{40}_{19}\text{K}$ possède un neutron de plus que le $^{40}_{20}\text{Ca}$.

B. $\Delta m_{\text{noyau}} c^2 = 511 \text{ keV} + E_{c\beta \text{ max}} + E_{\gamma} = 511 + 1312 + 1460 = 3283 \text{ keV.}$

ATTENTION : ici on calcul l'excès de masse au niveau du **noyau**, il faut donc prendre en compte le départ de l'électron dans le bilan énergétique.

C. $E_{\beta \text{ moy}} = E_{\beta \text{ max}} / 3 \approx 437 \text{ keV}$ avec $E_{\beta \text{ max}} = 1312 \text{ keV}$

D. $E_{\nu \text{ moy}} = 2 E_{\beta \text{ max}} / 3 \approx 875 \text{ keV}$ (2/3 car c'est l'énergie «manquante» car 1/3 pour β , ce qui est à l'origine d'ailleurs de la découverte du neutrino ici l'antineutrino). Autre méthode : $E_{\nu \text{ moy}} = E_{\beta \text{ max}}$

– $E_{\beta \text{ moy}}$

E. On rappelle que la conversion interne et le fait que l'énergie de désexcitation n'apparaît pas sous forme de photon γ mais transférée à un électron de l'atome fils. Ici la couche qui demande le plus d'énergie pour éjecter un électron est la couche K (car la plus proche du noyau) donc l'énergie minimale est $1460 - 80 = 1380 \text{ keV}$

QCM 9 : ABCD

B. VRAI Attention à ne pas confondre particule α et atome d'hélium-4. La première (qui possède $2n+2p$) a une masse de 3726 MeV, le second (qui a en plus $2e$) a une masse de 3728 MeV. *NB : il est peu probable que cette subtilité fasse l'objet d'une question le jour du concours mais mieux vaut le comprendre.*

C. VRAI L'atome perd 2 électrons+la particule $\alpha + E_{c\alpha} + E\gamma$ soit $\Delta mc^2 = 0,511 \times 2 + 3726 + 2,9 + 3,2 = 3733,1$ MeV.

E. Item monstrueusement faux. Pour la conversion interne, le photon γ n'est pas émis, c'est l'électron qui passe au travers du noyau et un photon est un rayonnement indirectement ionisant.

QCM 10 : Aucune

A. $0,880 \text{ MeV} <$ au seuil de $\beta + (1,022 \text{ MeV})$. De plus un spectre de raies associé à une désintégration pure, ne peut faire penser qu'à une capture électronique.

B. La différence de masse est aussi due à l'énergie de liaison de l'électron absorbé.

C. L' E_c de la particule (le neutrino) peut aussi être de 840 keV et de 862 keV. L'électron capturé peut provenir des trois couches K, L, M (surtout de K et de L) et $E_c = 880 - \epsilon_L$.

D. Les raies caractérisent l'émission des X, leurs énergies est proche de l'énergie de liaison de l'électron absorbé.

E. La désintégration par capture électronique présente 3 mini seuils de 60, 40 et 18 keV (en fonction de la couche où sera capté l'électron).

QCM 11 : BD

A. C'est un spectre d'émission β^- . Effectivement on observe sur le spectre, beaucoup de particules d'énergie nulle, ce qui est caractéristique d'une émission β^- . En effet, ceux-ci subissent les forces d'attractions protons-électrons, ce qui dès le départ diminue leur énergie cinétique.

B. VRAI, p'tite astuce = on voit que le spectre ne commence pas sur la ligne des ordonnées ou des abscisses en effet il faut retenir que les E_c des β^+ sont comprises entre une énergie un peu supérieure à 0 et une énergie maximale (ici 1,2 MeV).

C. L'émetteur β^- présente une raie, l'émission n'est donc pas pure (cette raie faisant probablement référence à la présence d'électrons de CI).

E. $E_{\beta\text{-moy}} = E_{\beta\text{-max}}/3 = 1,2/3 = 0,4 \text{ MeV}$. On détecte 1000 particules, d'où l'énergie moyenne libérée au milieu par les particules = $1000 \times 0,4 = 400 \text{ MeV}$.

QCM 12 : BD

A. D'un **noyau** d'hélium-4 ; $\alpha = 2n + 2p$ et ${}^4_2\text{He} = 2n + 2p + 2e = \alpha + 2e$.

B. VRAI Il est préférable de connaître cette valeur ($M_\alpha c^2 = 3728 \text{ MeV}$).

On peut la retrouver ainsi : $M_\alpha c^2 = 3726 \text{ MeV}$ ($4 \times 931,5$) et $2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$.

La somme (càd masse d'un atome d'hélium-4) est donc proche de 3728 MeV.

C. La désintégration α s'observe pour des noyaux dont $Z > 52$, or ici X possède 44 nucléons, donc forcément moins de 52 protons...

E. Les deux seuls atomes naturels spontanément fissibles sont ${}^{235}\text{U}$ et ${}^{238}\text{U}$.

QCM 13 : ABCE

D. $T = \ln 2 / \lambda$ donc quand T augmente, λ diminue et inversement.

QCM 14 : AC

B. Au bout de 12h on a 3T donc : $A(3T) = A_0/2^3$ soit $A(3T) = 24000/8 = 3000$ Bq.

C. Vrai : $A(4T) = A_0/2^4 = 24000/16 = 1500$ Bq.

INFO : Pour plus d'efficacité, on peut aussi se servir de la question A.

On passe de 3T à 4T donc on peut tout simplement diviser les 3000 Bq en A par 2.

C'est plus rapide mais il ne faut pas se tromper au départ. A toi de voir!

D. ATTENTION!!! Y est stable, il ne désintègre pas, il n'a donc pas d'activité!

E. Attention aux unités λ (en s^{-1}) = $\ln 2/T$ (**en s**) soit $\lambda = 0,693/(4 \times 3600) = 4,8125 \times 10^{-5} s^{-1}$.

QCM 15 : ABDE

C. On est en équilibre de régime, au bout de 10T le père et le fils continuent de se « côtoyer », de plus s'il n'y a plus de A il n'y a plus de B non plus.

E. Vrai : pour $t = 30h$ on a 3T donc $N(A \text{ à } 3T) = N_0/2^3 = (64 \times 10^6)/8 = 8 \times 10^6$ à ce même moment, il s'est donc formé : $(64 \times 10^6) - (8 \times 10^6) = 56 \times 10^6$ noyaux de B.

bonus: On va utiliser $\lambda = A_0/N_0$ soit $\lambda(A) = (32 \times 10^3)/(64 \times 10^6) = 0,5 \times 10^{-3} s^{-1}$

QCM 16 : AC

A. Vrai, $2,5 - 1,3 = 1,2$ keV

B. Faux, $A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda t}$, $A(t)/A(0) = 1 - 0,693 \cdot (3/33) = 0,937$

D. Faux, certes la période du père est 10 fois supérieure à celle du fils mais les activités sont sensiblement égales et non strictement.

E. Faux, c'est 1,2 keV (2,8-1,3).

QCM 17 : BC

A. Faux : isobare car même nombre de masse mais numéro atomique différent.

B. Vrai : pour savoir le sens des filiations radioactives il faut savoir que le noyau père est toujours plus lourd que le noyau fils, et ainsi on peut déduire qui se transforme en quoi.

D. Faux car il est excédentaire en neutron.

E. Faux : les émissions alpha concernent les atomes lourds : quand $Z > 53$ à l'exception du ${}^8_4\text{Be}$.

QCM 18 : BE

A. Faux la période du père doit être supérieure à celle du fils ce qui n'est pas le cas ici.

C et D. Faux : dans tous les cas le nombre de noyau n'est pas identique. Il ne faut pas confondre avec l'activité qui elle, est pratiquement égale dans le cas d'équilibre de régime.

E. Vrai : à l'équilibre le nombre d'atome est proportionnel à la période. Ainsi on voit que le fils à une période 10 fois moins importante que celle du père et donc 10 fois moins d'atome.

!!\ je répète à ne pas confondre avec l'activité qui est égale ici car équilibre de régime

QCM: Interactions photons-matière (9 QCM)

QCM 1 : On fabrique un écran pour se protéger face à un rayonnement de photons mono-énergétiques de 500 keV issus d'un radioélément émetteur β^+ .

- A. A l'intérieur de l'écran les photons interagissent par effet Compton majoritairement et aussi par effet photoélectrique.
- B. Si cet écran atténue d'un facteur 512 un faisceau initial de 1024 photons, 512 photons ressortent de l'autre côté de l'écran.
- C. Une couche de plomb ($\mu = 0,231 \text{ mm}^{-1}$) de 3 cm offre une protection optimale vis à vis des photons.
- D. Derrière l'écran de protection en plomb, nous ne sommes tout de même pas à l'abri des photons comptons diffusés, de ceux de 500 keV qui traversent, des photons de réarrangement, de désexcitation et même des photons d'annihilation.
- E. Un écran d'eau de 2 cm suffit à bien se protéger sachant que le parcours moyen des photons de 0,5 MeV d'énergie dans l'eau ($r=1$) est de 0,5 cm.

QCM 2 : Une interaction rayonnement matière aboutit à l'éjection d'un électron atomique avec une énergie cinétique de 200 keV et d'un rayonnement diffusé d'énergie 900 keV.

- A. Le photon initial avait une énergie de 1,1 MeV.
- B. L'interaction est sûrement un effet photoélectrique.
- C. Le photon initial peut se matérialiser en 2 particules : un électron négatif et un électron positif.
- D. L'électron éjecté peut produire des effets photoélectriques.
- E. Le rayonnement diffusé peut interagir par effet Compton sur des électrons liés ou non.

QCM 3 : Soit un photon, d'énergie 0,3 MeV, qui interagit avec la matière.

- A. Ce photon va interagir de façon plus importante avec les noyaux du milieu qu'avec les électrons atomiques.
- B. L'effet photoélectrique est le plus probable car le photon va disparaître après l'interaction.
- C. La matérialisation près du champ électrique d'un noyau atomique est tout à fait probable.

Le photon interagit avec un électron lié. Il en résulte, entre autres, un photon diffusé de 150 keV. Energie de liaison de l'électron = 50 keV.

- D. Un électron Compton de 200 keV est libéré.
- E. Le photon diffusé peut interagir ailleurs dans la matière par effet Photoélectrique.

QCM 4 : Concernant la création de paire.

- A. La matérialisation consiste en une collision photon matière.
- B. Pour un photon incident d'énergie donnée, elle est plus probable dans 1 mL de fer solide que dans 1 mL d'eau.
- C. Au décours d'une matérialisation, deux particules sont formées, l'une est directement ionisante (l'électron) et l'autre est indirectement ionisante (le positron).
- D. La création de paire est caractérisée par la libération de 2 photons de 0,511 MeV, qui proviennent du phénomène d'annihilation.
- E. Des électrons d'énergie proche de 1 MeV auront une plus grande probabilité d'interagir par effet Compton que par matérialisation.

QCM 5 : Soit un faisceau de photons monoénergétiques, d'énergie 0,3 MeV, qui passe à travers une fenêtre bétonnée de 6 cm d'épaisseur (CDA du béton = 2 cm), elle-même fermée par un volet en bois de 8 cm d'épaisseur (CDA de ce bois = 4cm).

- A. La CDA du béton étant inférieure à celle du bois, le béton va donc atténuer de façon plus efficace le faisceau de photons incident.
- B. Si 128 photons ont été dirigés vers les 2 milieux précédents, 124 photons seront donc arrêtés.
- C. Les photons ne peuvent interagir que par effet Compton.
- D. Si l'on modifie l'énergie des photons incidents, la quantité de photons transmis est similaire car les CDA des deux milieux restent identiques.
- E. Aux photons inchangés transmis derrière ces 2 milieux, s'ajoutent des photons diffusés Compton et des photons d'annihilations.

QCM 6 : Un faisceau de photons γ monoénergétiques (1 MeV) traverse un écran de verre (CDA = 40cm) avant d'irradier un tissu humain.

- A. Les proportions des effets Compton et photoélectriques sont équivalentes au sein du tissu humain irradié.
- B. Après avoir traversé la plaque de verre, s'ajoute au faisceau transmis un rayonnement diffusé constitué entre autres : d'électrons Auger et d'électrons diffusés.
- C. Les photons du faisceau transmis après avoir traversé une épaisseur de 400 cm de verre, produisent essentiellement des effets photoélectriques au niveau du tissu humain.
- D. Si on remplace la plaque de verre par du plomb, le faisceau transmis est davantage atténué.
- E. Les photons incidents interagiront davantage dans un écran constitué de bore ($Z=5$) par rapport à un écran de plomb ($Z=82$).

QCM 7 : Un faisceau de photons γ monoénergétiques bombarde une plaque de plomb. Pour des photons d'énergie égale à 2 MeV on donne: CDA (plomb) = 1,4cm et CDA (eau) = 14cm. On donne également les CDA du plomb pour des énergies photoniques respectives de 0,1 et 1 MeV: 0,12cm et 0,94cm.

- A. Pour une énergie incidente égale à 2 MeV, les photons interagissent davantage dans 5,6 cm de plomb que dans 560 000 μm d'eau.
- B. Un faisceau de photons incidents dont l'énergie est égale à 103 keV sera relativement plus faiblement atténué après avoir traversé 1 cm de plomb que si son énergie avait été 1,03 MeV.
- C. Le faisceau incident de 1 MeV qui traverse successivement 2 écrans de plomb de 3,76cm puis 0,12cm aura une énergie finale supérieure à 500 keV.
- D. Pour que le faisceau incident de 100 keV soit transmis avec une énergie inférieure à 12 keV il faut que celui-ci traverse un écran de plomb dont l'épaisseur est égale à 3 600 μm .
- E. Si le faisceau comportait des photons polyénergétiques, la CDA de la plaque de plomb diminuerait.

QCM 8 : Un peu de cours :

- A. Il est possible de différencier les photons X et gamma en fonction de leur vitesse.
- B. Les photons X de réarrangement sont émis selon un spectre continu.
- C. Les photons gamma de réarrangement sont émis selon un spectre continu.
- D. Les photons gamma peuvent apparaître suite à une émission Bêta – selon un spectre de raie.
- E. X et gamma ont la même vitesse.

QCM 9 : A propos de l'interaction photon matière :

- A. Les photons, comme toutes particules neutres, a une interaction obligatoire et un parcours fini.
- B. L'effet de matérialisation aboutit à la création de deux électrons d'annihilation.
- C. Quand l'énergie augmente, le coefficient d'atténuation linéique total μ diminue.
- D. Quand l'énergie augmente, le coefficient d'atténuation linéique μ photo électrique diminue.
- E. Quand l'énergie augmente, le coefficient d'atténuation linéique μ compton diminue constamment.

CORRECTION DES QCM (Interactions photons-matière)

QCM 1 : ACD

B. Cet écran atténue d'un facteur 512 les 1024 photons donc : $1024 / 512 = 2$ photons traversent.

C. Vrai. $CDA = 0,693/0,231 = 3\text{mm}$ on a donc 10 CDA ce qui est considéré comme étant le plus souvent négligeable (atténuation d'un facteur de $2^{10} = 1024$).

E. Le parcours, le parcours moyen... tout ceci ne s'applique qu'aux particules chargées, le photon n'est pas une particule (masse nulle) et n'est pas chargé, de plus il traverse l'eau sans problème. Cela revient souvent dans les annales!

QCM 2 : CE

A. Le photon avait pour énergie initiale $1,1 + E_l$ en MeV avec E_l l'énergie de liaison de l'e- éjecté.

B. Pas de photons diffusés en effet photoélectrique, il s'agit plutôt d'un effet Compton.

C. VRAI, attention on parle du photon initial (cf item A) et non diffusé !

D. Seul un photon peut produire des effets photoélectriques.

QCM 3 : E

A. L'interaction des photons avec les noyaux est une réaction photonucléaire, très peu probable.

B. On ne tient compte que de l'énergie du photon incident (0,3 MeV), et ici c'est l'effet Compton qui est le plus probable.

C. L'énergie du photon est insuffisante, il est nécessaire que le photon ait au minimum une énergie de 1,022 MeV (seuil de matérialisation).

D. Énergie de l'électron Compton = $300 - (E \text{ photon diffusé} + E \text{ liaison}) = 300 - (150 + 50) = 100 \text{ KeV}$.

QCM 4 : BD

A. Le photon incident interagit avec le champ électrique d'un noyau atomique.

C. Les deux particules sont chargées donc directement ionisantes.

E. La matérialisation concerne uniquement les photons et pas les électrons.

QCM 5 : AB

B. Vrai : 3 CDA de béton et 2 CDA de bois, soit 5 CDA, donc atténuation d'un facteur $2^5 = 32$, soit $128/32 = 4$ photons qui traversent.

C. Le seuil donné pour l'effet Compton (0,2 à 10 MeV à savoir par cœur) renseigne juste sur une plus forte probabilité lorsque ces photons ont cette énergie, mais rien n'empêche ici la réalisation de l'effet photoélectrique même si la probabilité est plus faible.

D. Les CDA vont être modifiées car elles dépendent de l'énergie. Ainsi si l'énergie augmente, les CDA augmentent donc pour une même épaisseur l'atténuation sera moins efficace.

E. Pas de matérialisation possible donc pas de photons d'annihilation.

QCM 6 : BCD

A. Faux. Pour des photons d'énergie = 1 MeV l'effet Compton prédominera.

C. Vrai. 400 cm correspondent à 10 CDA de verre donc le faisceau incident est atténué d'un facteur 1000 soit une énergie transmise de 0,001 MeV (=1 keV). L'effet photoélectrique est dans ces nouvelles conditions prédominant.

D. Vrai, car Z augmente donc il y aura plus d'interaction (de plus la masse volumique est supérieure).

E. Faux. L'effet Compton dépend du numéro atomique du matériau : il est donc plus important dans le plomb (Z= 82) que dans le bore (Z= 5).

QCM 7 : Aucune

- A. Faux. D'après les CDA données dans l'énoncé on constate que la CDA de l'eau est égale à 10 fois celle du plomb. Les épaisseurs des écrans de plomb et d'eau traversée par les 2 mêmes faisceaux sont dans des proportions identiques ($5,6\text{cm} = 0,056\text{m}$ et $560000\mu\text{m} = 0,56\text{m}$ d'où le facteur 10). Par conséquent, l'atténuation des faisceaux incidents dans les 2 milieux sera la même.
- B. Faux. 1 cm de plomb équivaut à environ 10 CDA pour un faisceau d'énergie de 0,103 MeV ; il sera donc atténué 1000 fois. Or pour le faisceau de 1,03 MeV 1cm de plomb correspond à presque 1 CDA; ce faisceau ne sera donc atténué que de moitié.
- C. Faux. L'énergie finale du faisceau sera **inférieure** à 500 keV. En effet: $3,76 = 4\text{CDA}$ de plomb inondé par des photons d'énergie de 1 MeV. Le faisceau transmis est donc atténué 16 fois et sa nouvelle énergie est de: $1\text{ MeV}/16 = 0,06\text{ MeV}$. Ce résultat est déjà inférieur à 0,5 MeV.
- D. Faux. Pour atténuer par un facteur 8 environ ($100/8=12,5$) l'intensité du faisceau celui-ci doit traverser un écran de plomb dont l'épaisseur est de 3 CDA= $0,36\text{cm}$ soit $3\,600\mu\text{m}$. Donc pour que l'énergie du faisceau transmis soit inférieure à 12 keV l'épaisseur de l'écran de plomb doit être **supérieure** à $3\,600\mu\text{m}$.
- E. Faux. On ne peut pas le savoir sans connaître les proportions dans lesquelles se font les différentes interactions du faisceau incident avec la matière.

QCM 8 : CE

- A. Faux, on les distingue selon leur origine.
- B. Faux, c'est selon un spectre de raie.
- D. Faux, il s'agit de Bêta +
- E. Vrai, **ATTENTION la vitesse du photon est *constante* quelle que soit son énergie** : il ne sera ni accéléré ni freiné par un champ de gravité, celui ci modifiera son énergie mais pas sa vitesse (attention donc dans les qcm quand on demande si un facteur change en fonction de la vitesse du photon, c'est faux!).

QCM 9 : CD

- A. Faux : ceci est le cas pour les particules chargées. Les particules neutres telles que les photons sont caractérisées par une interaction non obligatoire et une atténuation exponentielle.
- B. Faux : photons et non électrons.
- E. Faux : il augmente dans un premier temps puis diminue ensuite.

QCM: Interaction électrons-matière (11 QCM)

QCM 1 : Un électron, de parcours maximum 15 mm dans l'eau, produit 12000 excitations.

- A. Le parcours moyen théorique de l'électron, dans l'eau, est de 1 mm.
- B. Avant toute interaction avec le milieu, l'électron initial présentait une énergie de 20 MeV.
- C. La densité linéique d'ionisations (DLI) de cet électron est de 1200 ionisations par mm.
- D. Cet électron peut produire un effet de matérialisation.
- E. Un deuton de même énergie aurait un parcours beaucoup plus court.

QCM 2 : Un électron incident, d'énergie cinétique 1 MeV, interagit d'abord avec un électron de la couche O ($E_{\text{liaison}} = 35 \text{ keV}$), puis avec un électron de la couche M ($E_{\text{liaison}} = 70 \text{ keV}$), puis avec un électron de la couche L ($E_{\text{liaison}} = 90 \text{ keV}$), et enfin avec un électron de la couche K ($E_{\text{liaison}} = 105 \text{ keV}$). Après ces interactions, il reste à cet électron incident une énergie cinétique de 100 keV.

- A. A même distance d'interaction, l'électron incident transférera plus d'énergie à l'électron de la couche K qu'à l'électron de la couche O.
- B. Il s'agit de quatre collisions, nécessitant une interaction de type « coup au but » (contact matériel entre les deux électrons).
- C. L'énergie transférée par l'électron incident à chacun de ces quatre électrons est de 225 keV.
- D. L'énergie cinétique cumulée par les quatre électrons des couches K, L, M et O est de 900 keV.
- E. Les quatre nouveaux électrons arrachés sont potentiellement ionisants dans le milieu. Ils peuvent à leur tour, si leur énergie est suffisante, créer des collisions, des effets photoélectriques, des effets Compton...

QCM 3 : À propos des interactions électrons matière.

- A. Le principal mode de perte d'énergie d'un faisceau initial d'électrons est le phénomène d'ionisations et d'excitations, qui correspond quantitativement à deux ionisations pour six excitations.
- B. Après une excitation, l'électron cible n'est pas arraché, mais il change de niveau énergétique : l'atome devient alors excité. L'atome va ensuite revenir à son niveau fondamental en restituant l'énergie excédentaire sous forme de photons de réarrangements.
- C. Pour une énergie donnée, un électron de parcours moyen 1 cm, dans l'eau, aurait un parcours moyen inférieur dans un milieu de masse spécifique supérieur à 1.
- D. Pour un faisceau d'électrons polyénergétiques, le parcours moyen nous donne une indication de l'épaisseur de matière concernée qui réduit de moitié le nombre d'électrons du faisceau incident encore en mouvement.
- E. Le transfert d'énergie linéique (TEL) est plus faible au début du parcours qu'en fin de parcours.

QCM 4 : Dans un milieu donné, un faisceau d'électrons monoénergétiques de 1 MeV a un parcours maximal de 7,5 mm.

- A. Leurs interactions sont des effets comptons, photo-électriques mais pas de création de paire car leur énergie est inférieure à 1,022 MeV.
 - B. La masse volumique de ce milieu est de $2/3$.
 - C. Ce milieu est probablement de l'eau.
- On calcule que l'énergie totale du faisceau est de 1,6 GeV.**
- D. Le faisceau contient donc 1600 électrons monoénergétiques.
 - E. Le transfert d'énergie linéique du faisceau entier est de $3,2 \times 10^5 \text{ eV}/\mu\text{m}$.

QCM 5 : Soit un faisceau de photons de 10 MeV traversant un milieu cinq fois plus dense que l'eau. Un électron donné effectue 80.000 interactions dans ce milieu.

- A. Son parcours maximal est de 15 mm.
- B. 15 mm de ce matériau arrêtent donc tous les électrons de ce faisceau.
- C. 15 mm de ce matériau protègent intégralement des risques de cette source.
- D. Les interactions sont uniquement des ionisations et excitations.
- E. L'énergie moyenne d'ionisation de ce milieu est de 500 keV.

QCM 6 : Collision électron-électron.

- A. On parle de collision d'électron, mais cela est un abus de langage car les électrons ne se touchent pas vraiment.
- B. Plus un électron est rapide, plus il est énergétique, donc plus il transmettra d'énergie à la matière.
- C. De même plus un électron est énergétique plus il transmettra d'énergie à un électron qu'il rencontrera.
- D. Ainsi l'énergie transmise lors de ce type de collision ne dépend que de la vitesse de l'électron incident.
- E. Si l'interaction a pour effet d'exciter un électron de la couche K à la couche L d'un atome, l'électron cible sera appelé électron secondaire.

QCM 7 : Soit un faisceau d'électrons avec une énergie de 1 MeV, il interagit avec une plaque de 50cm constitué d'atome A ($E_{\text{liaisonK}}=95 \text{ KeV}$, $E_{\text{liaisonL}}=80 \text{ KeV}$, $E_{\text{liaisonM}}=60 \text{ KeV}$). Énergie moyenne d'ionisation=100 KeV, masse volumique=5.

NB : ce QCM est purement théorique, les valeurs données et trouvées concernant cette plaque sont théorique, cette plaque ne représente rien de réel.

- A. Il est plus facile pour un électron incident d'ioniser un électron de la couche M pour deux raisons.
- B. Si seuls les électrons de la couche M sont ionisés, alors un électron ionisé à en moyenne une énergie de 40 KeV.
- C. La DLI (densité linéique d'ionisations) vaut 100 ionisations/cm.
- D. L'électron ionise beaucoup moins de fois par cm que si le milieu traversé était l'eau.
- E. Le TEL correspond à l'énergie transférée par unité de longueur, et il est en moyenne de 200 eV/ μm pour l'eau.

QCM 8 : Soit une source d'électrons mono-énergétique ($E_c=1,7 \text{ MeV}$) parallèles, placée face à une plaque d'acier de 1mm d'épaisseur (entre les deux il y a du vide). La masse spécifique de l'acier et de 7,850g/cm², on prendra la valeur de 8 pour les calculs.

- A. Les électrons pourront traverser la plaque.
- B. La majorité des électrons vont a priori traverser la plaque.
- C. Leur trajet dans la plaque est sensiblement le même qui si l'on avait utilisé une source d'alpha.
- D. Si la plaque d'acier est remplacée par 15mm d'eau, certains électrons vont traverser.
- E. Si le vide était remplacé par de l'air cela n'aurait rien changé.

QCM 9 : Collisions

- A. L'énergie moyenne d'ionisation de l'eau est différente selon qu'on parle d'interactions avec des électrons ou avec des particules α par exemple.
- B. Le parcours des particules chargées lourdes est rectiligne car la masse de la particule incidente est très forte par rapport à celle de l'électron cible.
- C. Pour une même vitesse, une particule α est beaucoup plus énergétique qu'un électron.
- D. Plus une particule porte de charges, plus son champ électrique est grand, plus elle fait d'interactions avec le milieu, donc plus la DLI est grande.
- E. Plus une particule est lourde et chargée plus son TEL est faible.

QCM 10 : Un faisceau de noyaux d'hydrogène ^1_1H (p^+) et d'électrons d'énergie 130 MeV, pénètre dans une piscine. On vous rappelle que l'énergie moyenne d'ionisation de l'eau vaut 32 eV.

- A. Les électrons ont un parcours moyen de 65 cm dans la piscine.
- B. Les noyaux d'hydrogène auront une vitesse plus élevée que les électrons et auront, de fait un parcours moyen plus long.
- C. Des particules d^+ de même énergie auront un TEL plus fort que les électrons.
- D. La DLI de particules α^{++} (noyaux de ^4_2He) de même énergie est plus forte que celle des particules p^+ car les particules α^{++} sont plus chargées et plus lourdes.
- E. Des particules d^+ de même vitesse que les particules p^+ auront un parcours moyen deux fois plus long que les particules p^+ .

QCM 11 : A propos de deux faisceaux d'électrons monoénergétiques de 1 MeV, l'un traversant un milieu liquide de densité comparable à celle de l'eau et l'autre traversant du plomb de densité 11.

- A. Le premier faisceau peut atteindre une épaisseur de 1cm alors que le deuxième faisceau ne le permet pas.

Pour les 4 autres items nous n'allons considérer que le premier faisceau d'électrons.

- B. Le TEL est égal à : 2 MeV/mm
- C. Le TEL est égal à : 2 MeV/cm
- D. Le TEL est égal à : 200 eV/ μm
- E. La DLI est égale à 62,5 ionisations/ μm

CORRECTION DES QCM (Interactions électrons-matière)

QCM 1 : E

- A. $R_{\max} = 1,5 \times R_{\text{moy}}$. Soit $R_{\text{moy}} = R_{\max} / 1,5 = 15 / 1,5 = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm}$ dans l'eau.
- B. Dans l'eau, $R_{\text{moy}} (\text{cm}) = E (\text{MeV}) / 2$. $E = 2 \times R_{\text{moy}} = 2 \times 1 = 2 \text{ MeV}$.
- C. On a 1 ionisation pour 3 excitations. Donc, ici, on a 12000 excitations pour 4000 ionisations.

$$DLI = n / R_{\text{moy}} = 4000 / 1 = 4000 \text{ ionisations/cm}$$

D. Attention, ce sont les PHOTONS qui interagissent avec la matière par des effets photoélectrique, Compton ou de matérialisation.

QCM 2 : A

- A. Vrai : Plus l'électron incident est énergétique, plus il va vite ($E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} mV^2$). L'électron incident interagira donc moins longtemps avec l'électron lié, et lui transférera donc moins d'énergie.
- B. Les collisions sont soit des collisions éloignées avec un faible transfert d'énergie, soit des collisions frontales (de très près) avec un fort transfert énergétique.
- C. L'énergie transférée à l'électron des couches K, L, M et O dépend à la fois de l'énergie de l'électron incident, et de la distance de la collision. (Cf. corrections items A et B)
- D. L'énergie transférée par l'électron incident aux quatre électrons liés est de $1000 - 100 = 900 \text{ keV}$.

Or, l'énergie cinétique des quatre électrons est : $E_{\text{cinétique}}$ des 4 électrons = $E_{\text{transférée}} - E_{\text{liaison}}$

$$\text{totale} \cdot E_{\text{liaison totale}} = E_{\text{K}} + E_{\text{L}} + E_{\text{M}} + E_{\text{O}} = 105 + 90 + 70 + 35 = 300 \text{ keV}$$

L'énergie cinétique cumulée par les 4 électrons est de : $900 - 300 = 600 \text{ keV}$.

E. Ce sont les photons qui interagissent avec la matière par des effets photoélectrique, Compton ou de matérialisation.

QCM 3 : AC

- A. Vrai, pour toi qui te dis que dans le cours c'est 1/3, pense que c'est pareil que 2/6 ;)
- B. Pour que l'atome excité revienne à son niveau fondamental, il va libérer son énergie excédentaire sous forme de photons de désexcitations.

C. Vrai : $R_{\text{moy}} (\text{cm}) = E (\text{MeV}) / 2q$. ($q_{\text{eau}} = 1$)

D. Pour un faisceau d'électrons polyénergétiques, la notion de parcours moyen disparaît au profit de parcours maximum.

E. Le TEL est le transfert d'énergie linéique. L'acide linoléique est un acide gras!

QCM 4 : CDE

- A. Attention, ces interactions (compton etc.) sont produites par des photons, pas par des électrons.
- B. Tout d'abord, mettre la distance en cm, et utiliser le parcours moyen au lieu du parcours maximal.

$$R_{\text{moy}} = (R_{\max} \times 2) / 3.$$
$$(0,75 \times 2) / 3 = 0,5 \text{ cm}$$

$$R_{\text{moy}} = E_{\max} / 2q \text{ et } q = E_{\max} / 2 R_{\text{moy}} = 1 / (2 \times 0,5) = 1$$

Ce milieu est donc probablement de l'eau.

D. Vrai, $1 \text{ MeV} \times 1600 = 1600 \text{ MeV} = 1,6 \text{ GeV}$

E. Il y a deux méthodes possibles.

- Méthode longue, détaillée :

Il faut d'abord calculer le nombre total d'ionisations, puis la DLI, pour enfin avoir le TEL.

$$n = E / 32 = 1,6 \times 10^9 / 32 = 0,05 \times 10^9 \text{ ionisations}$$

$$DLI = n / R_{\text{moy}} = 0,05 \times 10^9 / (0,5 \times 10^4) = 0,1 \times 10^5 \text{ ionisations}/\mu\text{m}$$

$$TEL = 0,1 \times 10^5 \times 32 = 3,2 \times 10^5 \text{ eV}/\mu\text{m}$$

- Méthode plus rapide : on sait que dans l'eau, le TEL est proche de 200 eV/ μm , il suffit de multiplier ceci par le nombre d'électrons du faisceau, ce qui donne : $200 \times 1600 = 3,2 \times 10^5 \text{ eV}/\mu\text{m}$.

QCM 5 : AB

La masse volumique de l'eau est de 1, donc ici $\rho = 5$.

A. $R_{\text{moy}} = 10 / (2 \times 5) = 1 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$.

Donc $R_{\text{max}} = 15 \text{ mm}$.

B. Vrai, ce parcours est maximum, aucun électron ne va plus loin.

C. Faux, les interactions des électrons incidents vont, par collision, entraîner la formation de nombreux photons qui, eux, sont très pénétrants car atténués exponentiellement. On ne peut donc pas tous les arrêter avec une si faible épaisseur.

D. Faux, il y a également des ralentissements par freinage et d'autres faibles transports d'énergie, que l'on néglige dans les calculs.

E. $n = E_{\text{électron}} / E_{\text{moyenne d'ionisation}}$ or on sait que $E_{\text{électron}} = 10 \text{ MeV} = 10^7 \text{ eV}$ et le nombre n d'ionisations est de 20.000 (on compte 80.000 interactions mais seulement 1 ionisation pour 3 excitations).

Donc $E_{\text{moyenne d'ionisation}} = 10^7 / 20000 = 500 \text{ eV}$ et non pas 500 keV.

QCM 6 : AB

A. Vrai, comme il est dit dans le poly, c'est en réalité une collision de champs électriques.

B. Vrai.

C. Faux, car plus un électron est énergétique, plus il est rapide et donc l'interaction avec un autre électron sera très courte, l'énergie transmise sera faible.

D. Faux, elle dépend aussi de la distance entre les deux électrons, rappelez-vous c'est une collision de champ électriques, les électrons ne se touchent pas.

E. Faux, un électron secondaire, est un électron ionisé qui va aller interagir avec la matière à son tour.

QCM 7 : ACDE

A. Vrai, d'une par il est plus en périphérie donc plus accessible, d'autre par son énergie de liaison est la plus faible il faut donc lui transmettre moins d'énergie pour l'ioniser.

B. Faux, car l'énergie moyenne d'ionisation correspond à l'énergie consommée à chaque fois qu'il y a une ionisation, elle comprend donc l'ionisation elle même (qui est ici forcément supérieure à 60 KeV), mais aussi les excitations, vibrations concomitantes.

C. Vrai, $DLI = n(\text{nb total d'ionisations}) / R(\text{parcours moyen})$. Or $R = E_{\text{MeV}} / 2\rho = 0,1 \text{ cm}$, et $n = E(\text{énergie totale}) / E_{\text{moyenne d'ionisation}} = 10^9 / (100 \times 10^3) = 10$. D'où le DLI vaut 100 ionisations/cm.

D. Vrai, pour l'eau on a 6,25 ionisations par μm ce qui fait $6,25 \times 10^6$ ionisations par cm !!

E. Vrai, voir cours.

QCM 8 : AB

- A. Vrai, le parcours moyen peut être calculer par $R(\text{moyen}) = E(\text{MeV}) / 2Q(2 \times \text{masse spécifique})$. Ici on a donc $R(\text{moyen}) = 1,7/16 > 0,1 \text{ cm}$. Donc le parcours moyen est supérieur à 1mm.
- B. Vrai, le parcours moyen étant supérieur à l'épaisseur de la plaque, il y a par définition une majorité d'électrons qui vont sortir, c'est la définition du parcours moyen.
- C. Faux, les particules alpha sont très lourdes et ont une trajet rectiligne, contrairement aux électrons qui sont légers et qui ont un trajet imprévisible (ils sont facilement déviés).
- D. Faux, avec la même formule qu'à l'item A (en sachant que pour l'eau $Q=1$), on trouve 8,5mm de parcours moyen et en sachant que le parcours maximal vaut $1,5 \times R(\text{parcours moyen})$, on trouve que les électrons ne traverseront pas plus de 13mm d'eau environ.
- E. Faux, bien sur que si, car les électrons auraient interagi avec l'air !!!

QCM 9 : BCD

- A. Faux, elle n'a aucune raison de changer, pour l'eau elle est toujours de 32 eV.
- B. Vrai, c'est le cours.
- C. Vrai, car l'énergie désigne ici l'énergie cinétique, or elle est proportionnelle à la masse et à la vitesse au carré. La particule α étant beaucoup plus lourde que l'électron, aura à vitesse égale une énergie plus grande que l'électron.
- D. Vrai, c'est le cours.
- E. Faux, à énergie égale la vitesse de la particule lourde est plus faible que celle de l'électron, donc les transferts d'énergie pourront être plus longs, donc l'énergie transmise sera plus importante. De plus, comme il est dit dans l'item D, une particule chargée interagit beaucoup avec le milieu. Donc plus une particule est lourde et chargée plus son TEL (transfert d'énergie linéique) est grand !

QCM 10 : ACE

- A. $R_{\text{moyen}} = E(\text{MeV}) / 2Q = 130 / 2 = 65 \text{ cm}$.
- B. Compte tenu du fait que la masse d'un proton est plus élevée que celle d'un électron, le proton aura une vitesse inférieure à celle de l'électron. Par ailleurs, son parcours moyen sera inférieure à celui de l'électron.
- C. VRAI, car d^+ a une masse plus importante donc une vitesse moins grande et donc les transferts d'énergies seront plus longs.
- D. Tout l'item est vrai sauf « et plus lourdes ». La DLI est d'autant plus forte que la particule est chargée.
- E. A même vitesse, la relation suivant s'applique entre deux particules lourdes chargées:

$$R_2 = R_1 \times (M_2/M_1) \times (Z_1/Z_2)^2.$$

$$\text{Si } 2 = {}^2_1\text{d}^+ \text{ et } 1 = {}^1_1\text{p}^+ \text{ on a } R_{d^+} = R_{p^+} \times (2/1) \times (1/1)^2 = 2 R_{p^+}.$$

QCM 11 : CD

- A. Faux les deux ne le permettent pas !
1er faisceau : $R_{\text{moy}} = 1/2 = 0,5$ $R_{\text{max}} = 1,5 \times 0,5 = 0,75 \text{ cm}$
2ème faisceau : $R_{\text{moy}} = 1/22 = 0,045$ $R_{\text{max}} = 0,06 \text{ cm}$
- B. Faux 2 MeV /cm
- E. Faux 6,25 ionisations / μm

*Avec ce type de qcm, plutôt que de se lancer dans de longs calculs fastidieux et pour gagner du temps, il vaut mieux savoir que pour tout électron traversant de l'eau, quelle que soit son énergie, on a une DLI moyenne de **6,25 ionisations/ μm** , et un TEL moyen de **200 eV/ μm (2 MeV/cm)**. Apprenez donc ces valeurs par cœur !*

QCM: Production de rayons X de freinage (10 QCM)

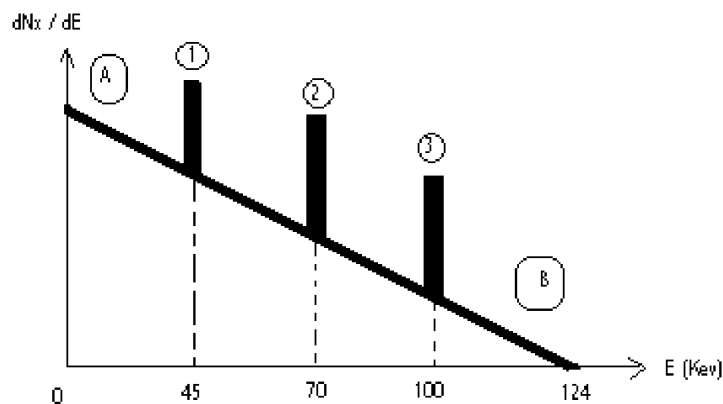
QCM 1 : Dans un tube de Coolidge:

- A. La production des rayons X de « freinage » résulte d'une interaction entre des électrons et les champs des noyaux des atomes de l'anode.
- B. La production des rayons X dépend de l'intensité de chauffage de l'anode.
- C. Le tungstène est très utilisé dans la fabrication des anodes car grâce à sa faible température de fusion, il augmente le rendement de production des rayons X.
- D. Le flux des rayons X dépend de la valeur de la différence de potentiel appliquée entre la cathode et l'anode.
- E. Si le flux de rayons X n'était pas filtré, les patients recevraient une irradiation supplémentaire inutile et la qualité d'image serait moins bonne.

QCM 2 :

- A. Pour faire fonctionner un tube de Coolidge il faut une haute tension accélératrice obtenue grâce à un transformateur sous-volteur.
- B. L'utilisation d'un courant alternatif optimise le rendement de production des RX.
- C. Si l'intensité de chauffage atteint le point de fusion du filament de la cathode alors la production des électrons est maximale et celle des RX aussi.
- D. L'attraction de l'électron par le noyau lui fait perdre une partie de son énergie cinétique ce qui se traduit par l'émission d'un rayonnement inconnu X.
- E. Aujourd'hui les tubes de Coolidge ne trouvent plus d'application essentielle.

QCM 3 : Ce spectre représente le spectre théorique d'émission des rayons X.



On donne $K = 4.10^{-6}$ et $Z = 50$.

- A. Il s'agit du spectre d'émission des rayons X détectés par un appareil de mesure adéquat.
- B. A ce spectre continu d'émission des rayons X, se sont superposées des raies du rayonnement caractéristique dont la répartition peut être la suivante : série M (numéro 1), L (numéro 2) et K (numéro 3).
- C. Les rayons X de « freinage » en A, quantitativement les plus abondants, sont facilement détectables par un appareil de mesure.
- D. La longueur d'onde minimale de ces rayons X de « freinage » est de 0,01nm.
- E. Le rendement d'émission de ces rayons X est de 1,24 %.

QCM 4 : Un patient va consulter son médecin pour une toux chronique. Son médecin prescrit alors, à ce patient fumeur régulier de long terme, une radiologie des poumons.

Le tabac consommé par ce patient contient de nombreux produits radioactifs, et notamment le ^{210}Po , émetteur α . Avec une consommation journalière de 20 cigarettes, ce patient présente une irradiation de l'ordre de 53 mSv/an.

- A. Cet examen concerne un tissu mou, ce qui va nécessiter l'utilisation de rayons X de faible énergie.
- B. Les os de la cage thoracique de ce patient absorbent plus de rayons X que les poumons.
- C. Pour cet examen, on peut utiliser des accélérateurs linéaires ou circulaires.
- D. Ce faisceau de rayons X émis va être filtré, grâce à des filtres métalliques, afin d'atténuer ou d'éliminer les rayons X les plus énergétiques.
- E. Tous les rayons X émis sont arrêtés par le film photographique.

QCM 5 : Concernant les généralités sur les Rayons X de freinage.

- A. Le mécanisme de production des RX de freinage consiste en une collision entre un électron incident accéléré par une haute tension et un noyau cible.
- B. Elle consiste donc en une interaction entre un électron et le noyau lui même.
- C. Plus l'électron passe près du champ du noyau, plus les forces attractives sont augmentées, plus la déviation de sa trajectoire est grande et donc plus l'accélération centrifuge est importante.
- D. Il est très probable que l'électron incident soit peu ou pas ralenti après son interaction avec le champ électrique du noyau.
- E. Cette éventualité évoquée dans l'item précédent, est visible sur un spectre enregistré des RX.

QCM 6 : Concernant les générateurs de Rayons X :

- A. Un tube de Coolidge est entre autre constitué d'une anode (au potentiel négatif) et d'une cathode (au potentiel positif).
- B. L'énergie Maximale des photons X émis est en valeur absolue égale à la haute tension accélératrice des électrons.
- C. Les Rayons X sont émis à partir d'un canon à électrons, qui est en réalité l'anode du tube de Coolidge.
- D. Pour des valeurs faibles de haute tension accélératrice, d'environ 50 kVolts, l'émission de photons X se fait surtout perpendiculairement par rapport à la direction des électrons incidents.
- E. Les accélérateurs circulaires : Bêtatrons et cyclotrons, accélèrent tout type de particules lourdes chargées.

QCM 7 : Un peu d'histoire :

- A. Pierre et Marie Curie sont à l'origine de la découverte de la radioactivité artificielle.
- B. Roentgen découvre les RX en 1895.
- C. L'origine du terme radioactivité vient de la découverte d'une propriété particulière du Radium appelée « l'activité du radium ».
- D. Becquerel découvre la radioactivité naturelle.
- E. En 1897, Thomson découvre et identifie l'électron, constituant élémentaire des rayons anodiques.

QCM 8 : A propos des RX de freinage :

- A. L'électron incident subit une accélération centrifuge quand il passe dans le champ électrique d'un noyau de la cible.
- B. L'électron incident est accéléré par une haute tension.
- C. Une haute tension est appliquée, visant à accélérer l'électron de l'anode vers la cathode.
- D. Une tension doit être alternative pour accélérer correctement les particules dans le tube de Coolidge.
- E. Un transformateur-survolteur permet d'élever la tension à des valeurs à hauteur de 50 kVolts pour les os par exemple.

QCM 9 : A propos des RX de freinage :

- A. Son mécanisme de production repose sur l'interaction d'électrons provenant d'une source, accélérés dans le vide par une haute tension, avec une cible matérielle de numéro atomique Z élevé.
- B. Il est caractérisé par l'énergie maximale $E_{\max}$ des photons qui le constituent et par son spectre discontinu de distribution en énergie.
- C. Le flux énergétique total Φ produit dans la cible se calcule par $\Phi = \frac{1}{2} KIZU^2$ ou par $\Phi = \frac{1}{2} KIZ E_{\max}^2$, car la valeur de U en keV est égale à celle de $E_{\max}$ en keV.
- D. Le spectre réel de distribution des rayons X de freinage produits dans un tube de Coolidge présente une proportion très faible de rayons X d'énergie maximale et de rayons X d'énergie pratiquement nulle.
- E. Un bêtatron accélère uniquement les électrons négatifs.

QCM 10 : A propos des rayons X :

- A. Ils ont été découverts par Roëntgen en 1995.
- B. Pour produire des rayons X, on fait interagir des électrons accélérés dans le vide par une haute tension avec une cible matérielle de numéro atomique élevé.
- C. Les X de freinage sont appelés ainsi car en passant dans le champ électrique d'un noyau cible, l'électron subit une décélération et perd de l'énergie en libérant un photon X.
- D. Le spectre de distribution en énergie des RX est un spectre de raies.
- E. L'or étant un matériau très conducteur, on l'utilise fréquemment comme cible pour la production de RX.

CORRECTION DES QCM (Production de rayons X de freinage)

QCM 1 : ADE

- B. Faux. C'est au niveau de la cathode que sont produits les électrons par effet thermoélectrique.
Cf cathode chargée – et anode chargée + : attire les électrons (autrement dit anode attire les anions et cathode attire les cations)
- C. Faux. Le point de fusion du tungstène est très élevé (3 370°C) et est atteint plus lentement par rapport à un autre matériau dont la T°C de fusion serait inférieure.
- D. Vrai : différence de potentiel = haute tension accélératrice.

QCM 2 : Aucune

- A. Faux. Il faut utiliser un transformateur SURvolteur. Le SOUSvolteur sert à provoquer l'échauffement du filament métallique qu'est le canon à électron.
- B. Faux. Cela perturbe l'accélération des électrons puisqu'ils sont attirés d'un côté puis de l'autre... Cf *poly page 41*
- C. Faux. Si le filament atteint le point de fusion le tube de Coolidge ne fonctionne plus.
- D. Faux. Le fait que le noyau attire l'électron entraîne une incurvation de sa trajectoire et son accélération centripète. L'électron doit ensuite perdre ce surplus d'énergie sous forme de RX de « freinage ». En conséquence une radiation est émise : le RX ; et l'électron perd de l'énergie cinétique.
- E. Faux. Il en a beaucoup dont le radiodiagnostic.

QCM 3 : BDE

- A. Il s'agit du spectre théorique (droite de Chalmers), qui ne prend pas en compte l'auto absorption des rayons X les moins énergétiques.
- B. Vrai : les électrons des couches externes sont moins liés.
- C. Les rayons X de « freinage » émis en quantité la plus importante sont les rayons X de faible énergie, qui sont auto absorbés dans la source, et ne sont donc pas détectés.
- D. Vrai : Longueur d'onde minimale : $\lambda_{\min} \text{ (nm)} = 1,24 / E_{\max} \text{ (keV)} = 1,24 / 124 = 0,01 \text{ nm}$.
- E. Vrai : Rendement $\rho = \frac{1}{2} K \times Z \times U = \frac{1}{2} \times 4.10^{-6} \times 50 \times 124 = 0,0124 = 1,24 \%$.

QCM 4 : AB

- B. Vrai : Plus ρ ou Z est fort, plus la probabilité d'effets photoélectrique ou Compton est élevée.
- C. Ces accélérateurs linéaires ou circulaires vont accélérer de façon importante les électrons, et seront utilisés dans le cadre de radiothérapie.
- D. Par ce filtrage avec des filtres métalliques sélectifs, on veut éliminer ou atténuer les rayons X les moins énergétiques, qui constituent en fait une cause d'irradiation supplémentaire totalement inutile et cause une dégradation de l'image radiologique.
- E. Les films photographiques présentent une très mauvaise efficacité face aux rayons X, car très peu de photons vont interagir avec le film (mais cela suffit tout de même à faire l'image). On a un très mauvais rendement dû à la faible épaisseur du film.

QCM 5 : D

- A. C'est une attraction électrostatique entre l'électron et le champ du noyau qui entraîne une accélération centripète de l'électron qui entraînera la formation des RX.
- B. C'est une interaction avec le champ du noyau et non le noyau lui-même sinon ça serait une réaction photo-nucléaire.
- C. C'est une accélération centripète.
- E. Les RX de faibles énergies sont auto absorbés par la cible donc non enregistrables.

QCM 6 : BD

- A. Les potentiels sont inversés.
- C. Le canon à électrons émet les électrons : c'est donc la cathode du tube.
- E. Les Bêtatrons n'accélèrent que les électrons négatifs.

QCM 7 : BCD

- A. Faux, c'est Irène et Frédéric Joliot-Curie.
- E. Faux, constituant élémentaire des rayons cathodiques.

QCM 8 : B

- A. Faux : centrifuge.
- C. Faux : on accélère toujours de la cathode (-) vers l'anode (+).
- D. Faux : au contraire on est obligé de compenser son caractère alternatif pour éviter une alternance de ralentissement et de freinage.
- E. Faux : ceci est vrai pour les tissus mous or les os sont des tissus durs.

QCM 9 : ADE

- A. Vrai : c'est la définition.
- B. Spectre continu !!
- C. C'est l'inverse, c'est la haute tension accélératrice U qui est en kVolts.

QCM 10 : B

- A. 1895.
- C. L'électron subit une ACCÉLÉRATION.
- D. Spectre continu.
- E. Rien à voir. Tungstène par exemple pour la cible.

QCM: Les détecteurs (11 QCM)

QCM 1 : Soit un détecteur à gaz ouvert à l'air ambiant fonctionnant sur le mode compteur proportionnel équipé d'un spectromètre. On dispose d'une source radioactive placée dans le compteur, d'une part émettrice de particules β^- ($E_{\max}=1 \text{ Mev}$) et de deux photons γ en cascade respectivement de 0,2 Mev et de 0,4 Mev, et d'autre part de particules β^+ ($E_{\max}=1 \text{ Mev}$) et deux photons γ en cascade de 0,6 et de 0,8 Mev. Les deux types de sources ont la même activité.

- A. Chaque particule β^- ou β^+ produiront des impulsions dans le détecteur.
- B. *Annulé.*
- C. Certains photons produiront des matérialisations.
- D. Les photons de 0,2 Et de 0,4 Mev fourniront plus d'impulsions que ceux de 0.6 et de 0,8 Mev.
- E. Il pourra y avoir des interactions entre les photons issus d'une désintégration et des matériaux à l'extérieur du détecteurs.

QCM 2 : Soit un détecteur à scintillations placé face à une source émettrice de β^+ ($E_{\beta\max}=0,6\text{Mev}$) et suivi de deux voies de désexcitation équiprobables. Le spectromètre enregistre 4 pics, un à 130 Kev, 270 Kev, 400 Kev et un à 511 Kev.

- A. *Annulé.*
- B. La source émet chaque seconde quatre fois plus de photons de 511 kev que de 130 kev.
- C. Le détecteur détecte plus de photons de 130 kev que de 400 kev.
- D. La source émet autant de photons de 130 kev que de 400 kev.
- E. Suite à une désintégration l'énergie déposée dans le milieu est de 1 Mev.

QCM 3 : Énoncé commun aux QCM 4 et 5. Soit une source radioactive au fond d'une grotte. Elle contient 8 MBq d'un émetteur β^- pur ($E_{\beta\max} = 700 \text{ keV}$) et 0,128 MBq d'un émetteur α ($E_{\alpha} = 2,2 \text{ MeV}$, $\gamma_1 = 382 \text{ keV}$, $\gamma_2 = 718 \text{ keV}$, $\gamma_3 = 1100 \text{ keV}$). Le spéléologue, équipé d'un détecteur type scintillateur solide se tient à 10 mètres de la source :

- A. À l'aide de ce dispositif, on pourra détecter correctement les particules α émises dans l'axe du compteur.
- B. *Annulé.*
- C. Le spectre continu observé est uniquement dû au rayonnement diffusé Compton des rayonnements γ issus de l'émetteur α .
- D. Chaque interaction ayant lieu dans le détecteur donne lieu à une avalanche d'électrons directement responsable d'une seule impulsion.
- E. *Annulé.*

QCM 4 : Le détecteur à chambre d'ionisation

- A. Le détecteur à chambre d'ionisation permet de sommer des charges électriques, on pourra ensuite connaître le nombre d'ionisations qui se déroulent dans le détecteur, en divisant l'énergie totale accumulé par la charge d'un électron.
- B. L'énergie accumulée par le détecteur à chambre d'ionisation, est celle qui à été déposé par le rayonnement initial.
- C. Le détecteur à chambre d'ionisation, est seulement un dosimètre car il permet de mesurer l'énergie transférée au détecteur.

Soit un détecteur à chambre d'ionisation, où le gaz est de l'air (énergie moyenne d'ionisation = 34 eV), celui-ci détecte une quantité d'énergie de $3,2 \times 10^{-16} \text{ C}$.

Donnée : e (charge d'un électron)= $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

- D. Le nombre total d'ionisations produites dans le détecteur, est de 2×10^3 .
- E. L'énergie fournie par la source à l'intérieur du détecteur est de 68 eV.

QCM 5 : Compteur proportionnel

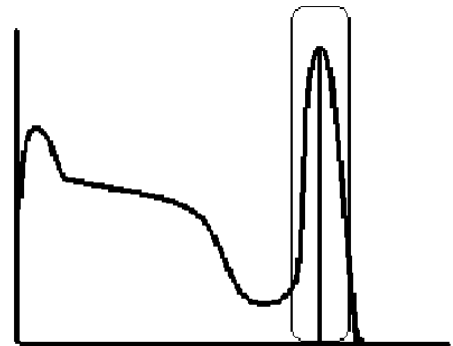
- A. La tension aux bornes est tellement grande qu'il y a formation d'électrons secondaires.
- B. L'énergie détectée est proportionnelle à l'énergie absorbée dans le détecteur.
- C. Dès lors, pour connaître l'énergie absorbée il suffit de connaître l'énergie détectée ainsi que le facteur de multiplication qui les lie.
- D. Ce type de compteur permet de compter les interactions, et de mesurer leur intensité.
- E. Le compteur Geiger-Müller lui est seulement un compteur, il ne permet pas de mesurer les énergies déposées.

QCM 6 : Le compteur à scintillations, est le détecteur le plus utilisé, il est donc crucial de comprendre son fonctionnement.

- A. Le scintillateur de ce détecteur, absorbe de l'énergie et émet des photons, l'énergie photonique émise étant proportionnelle à l'énergie absorbée dans le scintillateur.
- B. La photo-cathode émet des photons donnés en fonction des photons qu'elle a absorbée. Ensuite les dynodes multiplient ces photons, de sorte que la proportionnalité soit respectée entre l'énergie à la sortie des dynodes et celle absorbée dans le scintillateur.
- C. La multiplication est utile, car elle permet de détecter des énergie absorbées très faible.
- D. Ce détecteur permet de connaître l'activité d'une source car on peut facilement connaître l'énergie absorbée.
- E. Un des défaut de ce type de récepteur reste malgré tout le manque de précision lié à la faible proportion de photon absorbés (contrairement au film argentique encore utilisé pour de nombreuses radio).

QCM 7 : Détection de photons monoénergétiques dans un compteur à scintillations.

- A. Les photons ont tous interagit avec le détecteur.
- B. L'effet important dans la détection de photons, est l'effet Compton, il est très informatif.
- C. La courbe des ordonnées, permet de connaître l'énergie des photons, on voit qu'elle varie, cela étant dû aux différents effets.
- D. Parfois on n'analyse seulement la partie de la courbe dans le rectangle, on utilise alors une fenêtre spectrophotométrique.
- E. La droite dans ce rectangle représente l'énergie des photons initiaux.



QCM 8 : Correction de la détection à scintillation.

- A. A vide et sans source, on détecte quand même des événements, il s'agit du bruit de fond.
- B. Tous les événements produits dans un détecteur se retrouvent sous forme de d'impulsions individualisées.
- C. Le temps mort est la durée minimale entre deux impulsions pour qu'elles soient détectées.
- D. Le facteur géométrique permet de rectifier le fait que le détecteur ne couvre qu'une partie de l'espace autour de la source, ce qui fait qu'une seule partie des photon est détectée.
- E. Le facteur géométrique est important pour la détection de particules β et α .

QCM 9 : Au sujet de la détections des rayonnements ionisants.

- A. Un compteur Geiger-Müller peut être utilisé pour la dosimétrie pour toute dose.
- B. La chambre d'ionisation est un dosimètre précis pour toute dose même élevée à faible tension.
- C. Les détecteurs à scintillation permettent une lecture immédiate au contraire des détecteurs radiophotoluminescent.
- D. Le compteur proportionnel, comme son nom l'indique fonctionne en régime proportionnel c'est à dire que le signal recueilli est proportionnel à l'énergie cédée au détecteur.
- E. Le compteur Geiger-Müller, la chambre d'ionisation et le compteur proportionnel sont des détecteurs à semi-conduction.

QCM 10. Un détecteur de photons fonctionnant en mode compteur est placé non loin d'une source radioactive. Le temps mort du compteur est de 0,05ms. Pour une durée de comptage de 1 seconde, le détecteur enregistre 6000 coups :

- A. Si on enregistre sur une durée de 0,05 secondes, on aurait de manière sûre, 3000 coups.
- B. Le nombre d'interaction photons-détecteur, en corrigeant le temps mort, est proche de 8571 coups.
- C. Le nombre d'interaction photons-détecteur, en corrigeant le temps mort, est proche de 3571 coups.
- D. Ce détecteur peut, à priori être un détecteur à scintillation qui est un détecteur d'ambiance.
- E. Un dosimètre d'ambiance permet de calculer la dose équivalente personnelle en profondeur notée $H_p(10)$ ou superficielle $H_p(0,07)$.

QCM 11 : A propos de la spectrométrie gamma

- A. On observe une partie continue correspondant aux effets photoélectriques et un pic correspondant aux effets Compton.
- B. Plus la précision est grande, plus l'aire sous la courbe au niveau du pic photoélectrique est faible.
- C. Plus la résolution en énergie Re est grande, plus la mesure en énergie est précise.
- D. Un rayonnement poly énergétique peut présenter sur le spectre plusieurs pics photoélectriques.
- E. En aucun cas on peut avoir des effets de matérialisation dans le détecteur.

CORRECTION DES QCM (Les détecteurs)

QCM 1 : BDE

- A. Faux, toutes ne feront pas des interactions dans le compteur (elles les feront plus loin).
- B. *Annulé.*
- C. Faux, n'est possible que si $E > 1,022 \text{ MeV}$
- D. Vrai, car ces photons vont moins vite donc probabilité supérieure d'interagir dans de la matière détectrice donc de donner une impulsion.

QCM 2 : ABCD

- A. *Annulé.*
- B. Vrai, car 2 photons de 511 keV sont produit lors d'une désintégration alors qu'on dit qu'il a deux voies de désexcitation qui ont 50% de réalisations donc on repère que $130 + 270 = 400!!$ donc il y a les photons de 270 et 130 en cascade donc une fois sur deux on a un photon de 130 alors qu'on a 2 photons de 511 keV à chaque désintégration.
- C. Vrai, car ces photons vont moins vite donc probabilité supérieure d'interagir dans de la matière détectrice donc de donner une impulsion.
- D. Vrai, *Cf item B.*
- E. Faux, $1,022 + 0,6 + 0,400 = 2,022$

QCM 3 : BE

- A. Pour une particule α de 5,3 MeV, son parcours dans l'air est de 3,84 cm (cf tableau cours sur le parcours des particules lourdes chargées p.44). Le détecteur est quant à lui situé à 10m donc trop éloigné.
- B. *Annulé.*
- C. Et aux photons de réarrangements provoqués par les collisions de la particule β^- ainsi que ceux dus aux collisions des particules α .
- D. A une grappe d'ionisation.
- E. *Annulé.*

QCM 4 : AD

- A. Vrai, c'est le cours. (page 73 du poly de la fac). **Rappel : ici, tous les ions et électrons formés sont recueillis.**
- B. Faux, l'énergie déposée par le rayonnement initial, est calculable par la formule $\varepsilon = (q_i \times E) / e$. Où ε est l'énergie déposée, q_i est la quantité d'énergie accumulé par le récepteur, E est l'énergie moyenne d'ionisation du milieu, et e est la charge de l'électron ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$). q_i / e correspond au nombre d'ionisations produites, que l'on multiplie ensuite par l'énergie moyenne que chacune d'entre elle nécessite, on obtient donc l'énergie transférée au milieu par le rayonnement initial.
- C. Faux, pas seulement, en effet, il permet aussi de mesurer l'activité d'une source, c'est donc aussi un activimètre.
- D. Vrai, faites le calcul avec la formule $N(\text{nombre d'ionisations}) = q_i / e$
- E. Faux, il s'agit de 68 KeV (voir la formule de l'item B), attention, c'est trop bête de se tromper sur une unité si on a fait le bon calcul. $2 \times 10^3 \times 34 = 68\,000 \text{ eV} = 68 \text{ keV}$.

QCM 5 : ABCDE

Bien distinguer les détecteurs à gaz par ordre croissant d'énergie : chambre d'ionisation trop peu énergétique pour détecter chaque impulsion mais très précise pour mesurer la quantité d'énergie reçue (dosimètre/activimètre) ; compteur proportionnel détecte le nombre d'impulsions (compteur) proportionnel à l'énergie de la source (dosimètre) ce qui en fait un spectromètre (nombre d'impulsions en fonction de l'énergie) ; Geiger-Müller trop énergétique pour mesurer l'énergie déposé (compteur uniquement).

QCM 6 : AC

- A. Vrai, c'est grâce à cette proportionnalité que le détecteur possède une partie de son utilité. En effet, en connaissant le rendement énergétique (ex : l'énergie émise correspond à 10% de l'énergie absorbée), en mesurant l'énergie émise, on a immédiatement l'énergie absorbée.
- B. Faux, tout est vrai à l'exception du fait que ce ne sont pas des photons qui sont émis par le photo-cathode mais des électrons, ce sont donc aussi des électrons que les dynodes multiplient.
- C. Vrai, c'est logique.
- D. Faux, c'est la détection des impulsions qui correspondent à des « événements » qui permet de connaître l'activité. Rappel : l'activité est en nombre de désintégrations par seconde.
- E. Faux, au contraire ce type de détecteurs est très précis car le scintillateur à proprement parler est très épais et peut détecter la majorité des photons qui le traverse.

QCM 7 : DE

- A. Faux, l'interaction des photons n'est pas obligatoire, elle est probabiliste.
- B. Faux, seul l'effet photoélectrique est informatif, les photons ont transmis toute leur énergie, donc grâce à eux on peut connaître l'énergie de faisceaux de photons mono-énergétique, le pic constitue le pic photoélectrique.
- C. La courbe des ordonnées correspond à un nombre de photons absorbés à une énergie donnée que l'on trouve sur les abscisses.
- D, E. Vrai, c'est du cours.

QCM 8 : ACD

- A. Vrai, c'est du cours.
- B. Vrai, même pendant le temps mort les impulsions ont lieu, mais elles ne sont pas détectées !
- C. Vrai, voir correction item B.
- D. Vrai, encore du cours. Retenir que le facteur géométrique est la loi de l'inverse carré de la distance pour une source ponctuelle.
- E. Faux, pour les particules β et α , la source est dans le scintillateur liquide il n'y a donc pas de facteur géométrique.

QCM 9 : BCD

- A. Faux, que pour les faibles doses.
- E. Faux, ce sont des détecteurs à gaz.

QCM 10 : BD

- A. Faux, il ne faut pas oublier l'écart type relatif $\sigma = 100/\sqrt{30}$ (30 car on fait le produit en croix $1s \rightarrow 6000$ coups donc 0,05 seconde $\rightarrow 30$ coups) soit environ 18.
- C. Faux, $n_c = n_0 / (1 - n_0 \tau) = 6000 / (1 - 6000 * 0,00005) = 8571$, attention convertir les ms en secondes. On peut en plus directement éliminer l'item C car quand on corrige le temps mort on rajoute des coups donc le résultat était forcément supérieur à 6000 coups.
- E. Faux, un détecteur d'ambiance permet de calculer la dose équivalente ambiante à 10 mm de profondeur $H^*(10)$ et la dose équivalente ambiante cutanée $H^*(0,07)$.

QCM 11 : BD

- A. Faux c'est l'inverse, on a une partie continue correspondant aux différentes possibilités des effets Compton (cf le cours où on voit que le photon donne une partie de son énergie, il y a donc plusieurs combinaisons possibles) et une raie pour les effets photoélectriques.
- C. Faux c'est l'inverse : regardons le calcul : $Re = 100 \Delta e / E$
Si la mesure est précise cela signifie que Δe est petit est donc que Re est faible.
- E. Faux : c'est possible dans le cas où $h\nu > 1,022$ MeV.

QCM: Exposition aux RI (14 QCM)

QCM 1 : À propos de la radiobiologie :

- A. Les rayonnements ionisants (RI) peuvent agir sur les molécules directement, ou indirectement en provoquant l'apparition de radicaux libres par ionisation de l'eau, les deux phénomènes agissant dans les mêmes proportions.
- B. Les radicaux libres sont des espèces très réactives : $\text{OH}\cdot$ qui est hautement réducteur va interagir avec les molécules présentes dans son environnement immédiat et pourra modifier leurs structures.
- C. Si des protéines subissent des modifications cela peut avoir des répercussions sur le métabolisme de la cellule, alors que si des lipides sont touchés ce sont les membranes qui risquent d'être changées.
- D. Toutes les cellules de l'organisme n'ont pas la même radiosensibilité : une irradiation aura par exemple moins d'effets sur un tissu à un renouvellement important.
- E. Il existe des systèmes qui permettent de compenser les dégâts de l'irradiation (notamment au niveau de l'ADN : systèmes enzymatiques de réparation).

QCM 2 : À propos des irradiations :

- A. La dose absorbée (D) en Gray représente la quantité d'énergie transférée à l'individu.
- B. Pour permettre d'évaluer les effets biologiques on calcule à partir de la dose absorbée l'équivalent de dose, en Sievert.
- C. L'équivalent de dose dépend notamment de la qualité du RI: ainsi pour une dose $D=0,5$ Gy, un rayonnement de neutrons rapides va provoquer un équivalent de dose de 1,65 Sv.
- D. Un Rayonnement α a 20 fois plus de conséquences qu'un rayonnement de photons ou d'électrons de même énergie.
- E. En réalité l'équivalent de dose dépend aussi de la radiosensibilité des tissus et du temps d'exposition.

QCM 3 : À propos de la radiopathologie

- A. Une dose forte (au dessus d'un certain seuil) aura pour conséquences précoces des effets obligatoires mais aléatoires dans leur intensité.
- B. A l'inverse des doses fortes, les doses modérées n'ont pas de conséquences systématiques, mais des effets tardifs de gravité dépendante de la dose sont cependant possibles.
- C. Une source dont la dose serait inférieure à 1 mSv serait considéré comme sans risque.
- D. On remarque que certains tissus sont assez sensibles (tissus gonadiques, cellules souches sanguines), alors que d'autres sont plus résistants (tissu nerveux).
- E. Afin d'éviter toute irradiation in-utero qui pourrait avoir des effets tératogènes on évite autant que possible de prescrire des examens irradiants à une femme enceinte.

QCM 4 : À propos de l'exposition de l'Homme aux rayonnements ionisants :

- A. L'irradiation totale est composée de l'irradiation naturelle (en moyenne 3,2 mSv/an/individu) et de l'irradiation artificielle (en moyenne 1,6 mSv/an/individu).
- B. L'irradiation externe cosmique varie peu d'un individu à l'autre.
- C. L'irradiation naturelle liée au radon représente 2,4 mSv/an/individu.
- D. Chaque individu reçoit chaque année 1,6 mSv liés à l'irradiation artificielle.
- E. L'irradiation artificielle en une année peut être plus élevée que l'irradiation naturelle.

QCM 5 : À propos des grandeurs et unités utilisées.

- A. La dose efficace E est une grandeur utilisée dans le domaine de la radioprotection.
- B. Lorsque la dose est aléatoire ou stochastique, elle doit être exprimée en Gy.
- C. La peau est la structure la plus radiosensible. Elle sera la première touchée.
- D. Une même dose absorbée n'a pas les mêmes effets biologiques s'il s'agit d'un γ ou d'un β .
- E. Plus le débit de dose est élevé, plus l'effet biologique sera important.

QCM 6 : Les différentes modalités d'irradiation.

- A. La contamination interne est toujours accidentelle.
- B. La contamination interne diminue du fait de la décroissance radioactive uniquement.
- C. L'irradiation interne d'origine naturelle est principalement due au ^{222}Rn (1,2 mSv par an).
- D. L'irradiation artificielle est limitée à 1,3 mSv par an.
- E. L'irradiation artificielle la plus importante provient des centrales nucléaires.

QCM 7 : Un étudiant en médecine décide de prendre l'avion pour aller en Ukraine (l'avion vole en moyenne à 9000m d'altitude).

- A. L'irradiation cosmique subie est de 25,6 mSv.
- B. Sur l'année, son irradiation d'origine tellurique est en moyenne de 0,4 mSv.
- C. L'irradiation naturelle sera en moyenne de 2,4 mSv/an.
- D. En passant près de Tchernobyl, il risque un cancer de la thyroïde.
- E. *Annulé.*

QCM 8 : À propos des principes fondamentaux de radioprotection :

- A. Les principes sont au nombre de 3 (justification, optimisation et limitation).
- B. Un travailleur en radiologie est limité à 50mSv par an au niveau de la peau et des extrémités.
- C. A performance égale, toute méthode irradiante doit être préférée.
- D. Pour se protéger d'une source irradiante, il est conseillé de s'éloigner de la source.
- E. Les zones sont dites « surveillées » si la dose efficace peut dépasser 6mSv par an.

QCM 9 : À propos de l'exposition de l'Homme aux rayonnements ionisants :

- A. Les mesures de radioprotection imposent pour toute la population française une limite d'équivalent de dose de 1 mSv/an/individu.
- B. Un individu exposé à 5 mSv en une année a un grand risque de développer une affection radio-induite suite à cette exposition.
- C. Les mesures de radioprotection limitent l'exposition des travailleurs professionnellement exposés à 20 mSv/an ou 100 sur cinq ans, et de la peau et des extrémités à 200 mSv/an.
- D. Les organismes de radioprotection sont la CIPR, l'UNSAER, l'EURATOM, l'IAEA au niveau international. Au plan national, ils sont représentés par l'IRSN, la DGSNR, la DSN et l'INVS. Ces organismes luttent contre le principe de précaution.
- E. Si une méthode non irradiante existe et a les mêmes effets qu'une méthode irradiante en termes de bénéfices médicaux, le médecin doit choisir en priorité la méthode non irradiante, selon le principe de substitution.

QCM 10 : À propos des Rayonnements Ionisants (RI) :

- A. Un RI est un rayonnement susceptible d'interagir avec la matière.
- B. Un RI est forcément chargé.
- C. Un RI issu d'une particule chargée est dit « directement ionisant ».
- D. Un RI issu d'une particule neutre est dit « indirectement ionisant ».
- E. Un positon est donc indirectement ionisant.

QCM 11 : À propos des Rayonnements Ionisants (RI) :

- A. Un photon est indirectement ionisant, mais peut provoquer la formation de particules qui, elles, seront directement ionisantes.
- B. Un exemple de l'item A peut être l'effet Compton.
- C. Le site d'interaction privilégié des RI est le nuage électronique des atomes cibles.
- D. L'interaction d'un RI avec le champ électrique du noyau de l'atome cible peut provoquer la formation de rayons X.
- E. Lors d'une interaction entre un RI et sa cible, le transfert d'énergie se fait de la cible au RI, ce qui permet d'obtenir une particule émise ayant encore plus d'énergie que le RI initial.

QCM 12 : À propos de la radioprotection :

- A. Pour protéger avec équité la santé de chacun, on ne dissocie pas les travailleurs du grand public.
- B. Ses trois principes fondamentaux sont le principe de justification, de substitution et de limitation.
- C. En milieu hospitalier, à ces principes s'ajoute celui d'optimisation.
- D. Certains travailleurs particulièrement exposés aux RI ont une surveillance médicale intense, avec un examen clinique (consultation) et deux bilans biologiques (cytologie, sérologie...) chaque année.
- E. Ces travailleurs sont soumis au port obligatoire de dosimètres.

QCM 13 : À propos de l'action biologique des rayonnements ionisants :

- A. L'irradiation se fait initialement par des rayonnements (X , γ , α , e^- , neutrons...) d'énergie quelconque.
- B. L'effet physique (photoélectrique, compton, création de paire), quasi-instantané, entraîne des ionisations et des excitations.
- C. L'ionisation est toujours dangereuse lorsqu'elle se produit sur l'ADN car elle induit une lésion double brin difficile à réparer.
- D. L'effet cellulaire sera soit la mort, la restauration (sans effet biologique) ou enfin une mutation.
- E. L'effet tissulaire, pouvant durer plusieurs années, comprend les effets aléatoires (nécrose tissulaire) et obligatoires (cancérisation).

QCM 14. : A propos des périodes effectives, biologiques et physiques :

- A. La période physique est toujours plus courte que la période biologique.
- B. La période effective est toujours plus courte que la période biologique.
- C. Pour une période effective de 10 jours et une période biologique de 100 jours, la période physique est d'environ 11 jours.
- D. En toute rigueur la période effective est le paramètre dont il convient de tenir compte.
- E. L'indicateur de gravité des accident nucléaires selon l'échelle de INES on a du moins grave au plus grave : les accidents puis les incidents.

CORRECTION DES QCM (Exposition aux RI)

QCM 1 : CE

- A. Radiolyse de l'eau et non ionisation
- B. OH• est oxydant, le reste est vrai, c'est OH- qui est réducteur.
- D. Au contraire plus les cellules prolifèrent plus leur matériel génétique a des chances d'être altéré.

QCM 2 : ABDE

- C. $H = D \times W_R$, W_R neutrons rapides = 10 soit $H = 0,5 \times 10 = 5$ mSv

QCM 3 : CDE

- A. Les effets précoces sont proportionnels à l'intensité de l'irradiation.
- B. Les effets tardifs sont aléatoires (stochastiques) et la gravité n'est pas liée à la dose reçue.

QCM 4 : E

- A. Irradiation naturelle = 2,4 mSv/an/individu et irradiation totale = 3,7 mSv/an/individu
- B. L'irradiation cosmique double chaque fois qu'on s'élève de 1500m. Les populations vivant dans les régions élevées reçoivent beaucoup plus d'équivalent de dose.
- C. Irradiation due au Radon = 1,2 mSv/an/individu.
- D. L'irradiation artificielle est très variable d'un individu à l'autre. Le chiffre de 1,3 mSv/an/individu est une moyenne.

QCM 5 : AE

- B. C'est dans le cas de d'un risque obligatoire ou déterministe.
- C. Elle n'est que peu radiosensible mais se situera en première ligne.
- D. Dans les 2 cas, le facteur de pondération biologique W_R est de 1.

QCM 6 : C

- A. Nous sommes constitués de $^{40}_{18}\text{K}$ radioactif.
- B. La diminution se fait selon la période effective, c'est à dire en fonction de la décroissance physique mais aussi en fonction de l'élimination par l'organisme.
- D. Cette valeur représente l'équivalent de dose moyen. Il peut aller au dessus !
- E. La majeure partie des irradiations artificielles est le fait des applications médicales.

QCM 7 : BC

- A. Faux, certes $9000/1500 = 6$ et on sait que l'irradiation cosmique est doublée tous les 1500 mètres en plus, soit $0,4$ (au niveau de la mer) $\times 2^6 = 25,6$ mSv/an mais il ne reste pas dans l'avion pdt 1 an !!
- D. L'iode 131 a une période de 8 jours.
- E. *Annulé.*

QCM 8 : AD

- B. 500 mSv par an.
- C. Au contraire.
- E. Il s'agit de zones « contrôlées », c'est vicieux mais restez attentifs les loulous ♥.

QCM 9 : CE

- A. Pour les travailleurs exposés au RI la limite est supérieure à 1 mSv.
- B. En une année, en moyenne un individu est exposé à 3,2 mSv, ce qui est proche de 5 mSv. De plus, les travailleurs reçoivent plus de 5 mSv/an, ce qui ne les expose pas pour autant à un très grand risque de cancer. A retenir : en dessous de 100 mSv aucun cancer n'a été mis en évidence pour le moment de façon formelle.
- D. Ces organismes luttent POUR le principe de précaution (organismes ne sont pas à savoir par ♥).

QCM 10 : ACD

- B. Il peut aussi être neutre comme le neutron ou le photon par exemple.
- E. Un positon (électron positif) est chargé donc directement ionisant.

QCM 11 : ABCD

RI = particule chargée ou neutre ou photon susceptible de provoquer des ionisations.

- B. Vrai : interaction photon /matière → libération d'un e- (chargé)
- E. C'est l'inverse!!! C'est le RI qui cède de l'énergie à sa cible!!

QCM 12: DE

- A. On les dissocie, ils ne sont pas soumis aux mêmes limites de dose.
- B. et C. Les trois principes sont : justification, optimisation, limitation. Ne pas oublier le principe de substitution pour les patients (pour bénéfice égal, on préférera un traitement non-irradiant).

QCM 13 : BD

- A. Leur énergie n'est pas quelconque, elle doit dépasser le seuil d'ionisation de l'eau (16 eV). On utilise parfois 14 eV comme limite entre RI et RNI.
- C. La lésion double brin est rare, 5% des cas seulement.
- E. C'est l'inverse, la cancérisation est aléatoire (effet stochastique), la nécrose obligatoire (effet déterministe).

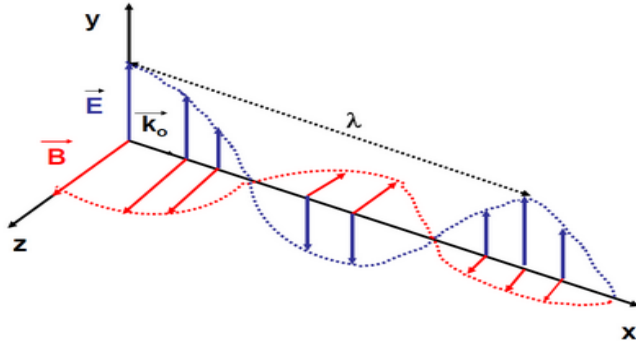
QCM 14. BCD

- A. Faux, c'est la période effective qui est toujours plus courte que la biologique et la physique. A noter qu'il n'y a aucune règle entre la période physique et la période biologique, en aucun cas l'une est toujours plus grande que l'autre et inversement.
- C. VRAI, $1/T_e = (1/T_p) + (1/T_b) \Rightarrow 1/T_p = (1/T_e) - (1/T_b) = (1/10) - (1/100) = 9/100$ d'où $T_p = 100/9 \approx 11$ jours.
- E. Faux, c'est d'abord pour les moins graves les incidents puis pour les plus graves les accidents.

OPTIQUE

FICHE DE COURS

I. GÉNÉRALITÉS



1. Histoire de l'optique : 2 dates à retenir pour les QCMs

- **1600** : Microscope, lunette d'approche (Christophe Colomb ne peut donc pas en avoir)
- **Fin XIX / Début XX** : Les théories physiques. On élucide la nature de la lumière .

2. Ondes

Une onde est une oscillation périodique dans le temps et dans l'espace d'un paramètre physique.

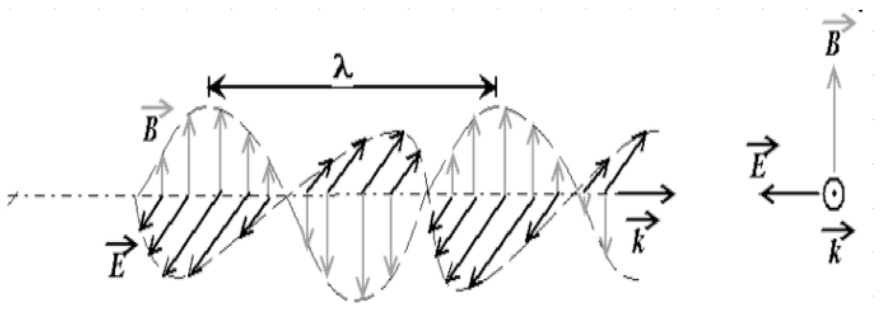
Ces ondes peuvent être représentées par des sinusoïdes possédant des caractéristiques précises :

- La longueur d'onde ou λ : plus petite distance séparant 2 points de l'onde strictement identiques à un instant donné, deux pics par exemple (en mètres, m).
- La période T, soit la plus petite durée séparant deux motifs identiques, par exemple la durée entre deux pics (en secondes, s).
- La fréquence f ou $= 1/\text{période}$: nombre de période par unité de temps, généralement par seconde on parle alors en Hertz (Hz qui sont des s^{-1}).
- La célérité (ou vitesse v) unité le $m.s^{-1}$. La vitesse de la lumière dans le vide : $3.10^8 m.s^{-1}$
- La phase : moment du cycle où se trouve le point, c'est un angle entre 0 et 2π .
- **L'amplitude est l'écart entre la moyenne et le maximum du paramètre physique de l'onde.**

3. L'Électromagnétisme

a) Origine du champ électrique et magnétique

→ Pour tout point de l'espace où $v=0$ (vitesse nulle), on observe un **champ électrique** noté E qui est perpendiculaire au sens de propagation.



→ Lorsque les points du milieu sont animés d'une vitesse constante, on observe, en plus de E, un **champ magnétique**, perpendiculaire à E ainsi qu'au sens de propagation (k) qui se nomme B. Ainsi toute variation d'un des deux champs, fait varier l'autre.

b) *Variations et relations entre ces deux champs*

- Dans le vide, E et B sont variables, mais seulement si l'un des deux champs varie. Par opposition au milieu matériel, où E est aussi influencé par la charge des particules voisines, et B par les courants électriques.
- Les relations entre champs électriques et magnétiques sont formalisées dans les équations de Maxwell, et sont de forme sinusoïdale.
- C'est une superposition d'ondes sinusoïdales se propageant à la vitesse c (célérité : $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

4. Ondes électromagnétiques

L'onde plane progressive monochromatique est une onde qui a un champ électrique qui se propage dans l'espace, c-à-d les phases de l'onde se déplacent dans une direction.

Le terme monochromatique signifie que l'onde est caractérisée par une seule couleur soit une seule longueur d'onde, donc par une seule fréquence. Ce type d'onde (non naturelle) a un aspect théorique puisqu'elle est solution des équations de Maxwell.

À l'inverse on dit d'une onde qu'elle est stationnaire lorsqu'elle reste au même endroit (comme les ondes provoquées par les cordes d'une guitare).

L'indice de réfraction $n = \frac{c}{v}$ avec $n > 1$ dans un milieu matériel et $= 1$ dans un milieu immatériel (vide), avec c = vitesse de la lumière dans le vide, et v = vitesse de la lumière dans le milieu considéré.

$$\text{Donc : } v = \frac{\lambda}{T} = \frac{c}{n}$$

Les autres valeurs ne sont pas à connaître par cœur, toutefois si un QCM vous donne un $n < 1$, cet item est nécessairement FAUX.

À noter que lorsque plusieurs ondes se superposent dans le vide, elles n'interagissent pas obligatoirement entre elles, à la différence du milieu matériel (dû à la présence de particules) : 2 faisceaux lumineux peuvent se croiser sans s'altérer, 2 vagues non.

Rq# en soi, l'indice de réfraction indique si il y a déviation de la lumière lors du passage dans le nouveau milieu, + l'indice est différent de 1, plus la déviation sera grande. (exemple : la déviation est plus grande dans l'eau que dans l'air car $n_{\text{air}} \approx 1$ et $n_{\text{eau}} > 1$)

5. Quantification de l'énergie

L'énergie transportée par une onde est matérialisée sous forme de photons énergétiques car une onde met en jeu un transport d'énergie sans transport de matière.

L'énergie d'une onde **électromagnétique** ne peut pas prendre n'importe quelle valeur, elle est multiple d'un nombre : le **quanta** (noté ici e), qui est lui même proportionnel à la fréquence.

$$e = h * f$$

e permet donc la quantification de l'énergie d'un photon, avec h la constante de Planck.

Il est à noter que cette relation marche seulement pour l'onde électromagnétique. En effet, si ce n'est pas le cas, l'énergie est proportionnelle à la fréquence **et** à l'amplitude.

6. Ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux matériels

- Un milieu est homogène lorsque tous les points d'un espace ont les mêmes caractéristiques (par exemple même indice de réfraction). *Pour mieux visualiser la chose, imaginez une foule de personne : si chaque personne montre du doigt la même direction alors le milieu est homogène (chaque personne a la même caractéristique que son voisin).* On oppose ce terme à hétérogène.
- Un milieu est isotrope lorsque tous les points d'une direction donnée, ont les mêmes caractéristiques. *Si nous reprenons notre exemple de la foule, imaginez que vous vous situez au milieu, et que toutes les personnes pointent leurs doigts vers vous, le milieu est isotrope (sur une seule direction, chaque personne a la même caractéristique que ses deux voisins).* On oppose ce terme à anisotrope.

Du coup dans un milieu homogène et isotrope, l'indice ne va dépendre que de sa longueur d'onde λ .

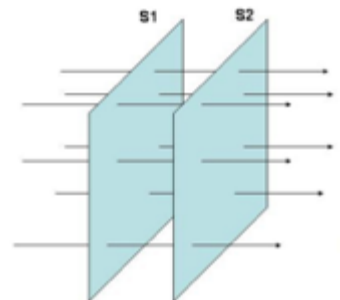
- Un milieu est transparent lorsqu'une onde électromagnétique peut s'y propager sans perte d'énergie. (contraire = opaque)
- Une onde est plane lorsque le front d'onde (ensemble de points de l'espace pris à un temps donné ; une sorte d'arrêt sur image) forme un plan (d'onde). Lorsque le plan est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, on dit que l'onde est plane. Il n'existe pas d'onde plane pure dans la nature.
- Un milieu est dispersif si la célérité des ondes dépend de leur fréquence. Le prisme de verre est un milieu dispersif car un faisceau polychromatique (plusieurs longueurs d'onde) se verra décomposé : en fait chaque longueur d'onde est déviée différemment dans un milieu dispersif. On peut en déduire que dans un milieu non dispersif, la vitesse est constante pour toute longueur d'onde λ (c-à-d même vitesse de propagation)

Au final dans un milieu homogène, isotrope et non dispersif, l'indice va être la même partout pour toute longueur d'onde.

Remarque : Le vide est homogène, isotrope, non dispersif et transparent ; alors que les milieux matériels ne sont ni parfaitement transparents, ni non dispersifs.

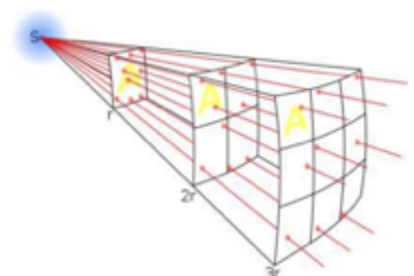
Ondes planes progressives :

- On dit qu'une onde plane est progressive lorsque chaque front d'onde (plans) sont parallèles entre eux, et perpendiculaires à une direction donnée par le vecteur vitesse, pendant une distance infinie. Les rayons de ce type d'onde sont alors des droites parallèles entre elles et orthogonales (perpendiculaire au front d'onde).



Ondes sphériques progressives

- Ces ondes proviennent d'une source **ponctuelle**, ces fronts d'ondes sont alors des sphères concentriques. Plus on va s'éloigner de la source ponctuelle, plus la sphère va être grande (allant de r à $2r$, $3r$...). Ces rayons sont alors des droites provenant de la source ponctuelle et non parallèles entre elles.

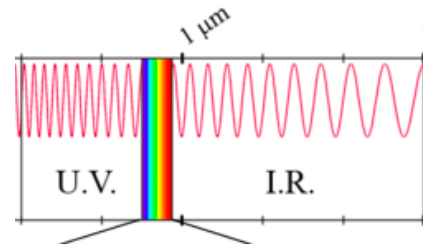


II. PHOTOMÉTRIE, RADIOMÉTRIE, PHOTOMÉTRIE, ET INTERACTIONS AVEC LES MILIEUX MATÉRIELS

1. Spectre des ondes lumineuses

La limite inférieure du visible (380nm) correspond au violet, la limite supérieure du spectre de la lumière visible (780nm) correspond au rouge. (NB : d'où au-dessus il y a infraROUGE et en dessous ultraVIOLET).

Limites à bien connaître!



2. Flux énergétique et flux lumineux

a) Intensité :

Une intensité désigne la quantité d'énergie sous forme lumineuse d'une source, elle peut être exprimée en **lumen par stéradian** (lm/sr), unité qui correspond au **candela (cd)**.

Le candela est l'une des 7 unités du SI.

b) Flux énergétique / lumineux :

Le flux énergétique est une grandeur qui correspond à une puissance émise par une source. Il s'agit en réalité d'une énergie libérée par la source en fonction du temps.

La puissance est exprimée en Watt (J.s⁻¹),

⇒ Sa **densité**, qui correspond au flux énergétique par surface, est elle exprimée en W.m⁻².

Le flux lumineux, exprimé en lumen (lm) qui vient uniquement de la partie visible du rayonnement. C'est à dire le flux lumineux correspondant à une intensité lumineuse multipliée par un angle solide, c'est donc la quantité d'intensité lumineuse produite à la surface de la source lumineuse selon un certain angle d'ouverture. Si la source est suffisamment étendue il est de 4π . (attention en QCM quand on donne pas la valeur de l'angle solide il faut penser à prendre 4π qui correspond à la surface d'une sphère)

Dans le SI, le lumen est noté J (Attention! C'est toutefois différent du joule),

⇒ Sa **densité**, qui correspond au flux lumineux par surface est exprimée en **lux = lm.m⁻²**. C'est ce que l'on appelle l'éclairement (rentrant) et l'émittance (sortant). L'éclairement maximal est atteint par le soleil au zénith, il est de : **10⁵ soit 100 000 lux**

Ce flux lumineux prend en compte le coefficient de visibilité spectral (Ky) qui est en lm.W⁻¹.

Il atteint son pic diurne à 555 nm (jaune/vert), à ce maximum on a : 1W → 683 lm.

On peut aussi écrire pour mieux comprendre $K(555\text{nm}) = 683$ mais nous vous embêtez pas trop avec ça car ça tombe rarement en QCM. Toutefois il est bon de savoir que la couleur la mieux perçue par l'oeil humain de jour est le jaune-vert.

De là on peut en déduire l'**efficacité lumineuse** :

$$\text{Rendement lumineux (\%)} = \frac{\text{Flux lumineux (lm)}}{683 * \text{Puissance consommée (W)}} * 100$$

c) Notion d'angle solide W , exprimé en stéradian :

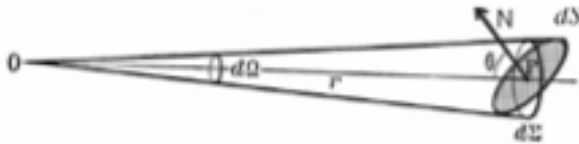
L'angle solide représente la portion de l'espace contenue à l'intérieur d'un cône S et allant à l'infini. Soit un cône quelconque de sommet O issu d'une sphère de centre O et de rayon R . On peut dire que W ou Ω qui représente l'angle solide est égal à l'aire de la calotte découpée par le cône sur la sphère de centre O . En fait, le rapport $\Omega = \frac{S}{R^2}$ permet de s'affranchir du rayon de la sphère pour ainsi pouvoir comparer les angles d'ouvertures de différentes sphères à rayons différents.

Rappel : la surface d'une sphère est de $4\pi r^2$.

L'angle solide **total** est de 4π en prenant la sphère de rayon unité ($r=1$) et tournée vers la source, soit l'inclinaison est nulle ($\theta=0$)

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos(\theta)}{r^2} = \frac{4\pi r^2 \cdot \cos(0)}{r^2} = 4\pi$$

On peut définir aussi un angle solide sous lequel est vu un objet. Ici, nous ne nous situons plus dans une sphère, c'est l'objet observé qui renvoie une image centrée sur l'observateur avec une certaine inclinaison θ , en formant un cône d'une certaine surface appelée **surface élémentaire** et notée dS .



L'angle solide se calcule alors à l'aide de la formule : $d\Omega = \frac{dS \cdot \cos(\theta)}{r^2}$

Le stéradian, unité de l'angle solide, est un **nombre sans dimension** mais avec unité !

Explication imagée flux/intensité/angle :

Tu veux faire traverser une rivière par des moutons. L'intensité c'est dire que je peux transporter dix moutons par bateau à chaque fois. D'autres sources plus faibles ne peuvent en transporter que cinq. Mais si tu peux envoyer deux bateaux au lieu d'un, tu envoies deux fois plus de moutons. Le nombre de bateaux, c'est un peu l'ouverture de ton angle. Plus ton angle est grand, plus tu peux envoyer de vagues d'énergies lumineuses et donc ton flux augmente. En quelque sorte, le flux lumineux est l'intensité lumineuse en fonction de l'angle d'émission disponible de ta source.

2.4 Luminance :

La **luminance** est l'intensité d'une source lumineuse dans une direction donnée, divisée par l'aire apparente de cette source dans cette même direction : $L = \frac{I}{S \cdot \cos(\theta)}$, exprimée en **nit** ($\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ou $\text{Cd} \cdot \text{m}^{-2}$). Pour une source orthotrope, elle est indépendante de la direction c'est à dire que la teinte, la luminosité, la luminance sont indépendantes de la position de l'observateur. C'est la sensation lumineuse ressentie.

La **luminance énergétique**, est l'intensité d'une source énergétique dans une direction donnée, divisée par l'aire apparente dans cette même direction : $L = \frac{E}{\Omega \cdot \cos(\theta)}$, exprimée en $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Pour une source orthotrope, elle est indépendante de la direction.

Photométrie:

$\bar{E}$ = énergétique
L = lumineuse

$$I = \frac{F}{\Omega}$$

Flux $\bar{E}$: W (watt)
Flux L: lm (lumen)

$$\bar{E} = \frac{F}{S}$$

Intensité $\bar{E}$: $W \cdot sr^{-1}$
Intensité L: $lm \cdot sr^{-1} = cd$

densité $\bar{E}$: $W \cdot m^{-2}$
densité L: $lm \cdot m^{-2} = lux$

$$L = \frac{I}{S * \cos(\theta)}$$

$$L = \frac{\bar{E}}{\Omega * \cos(\theta)}$$

Luminance $\bar{E}$: $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$
Luminance L: $lm \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$
 $\Leftrightarrow cd \cdot m^{-2}$
 $\Leftrightarrow nit$
 $\Leftrightarrow lux \cdot sr^{-1}$

3. Sources isotropes

Une source isotrope est caractérisée par un rayonnement identique dans toutes les directions, cette source est donc considérée par son intensité (I) en candela qui reste la même en tout point. Par exemple, le soleil ou les étoiles sont des sources isotropes.

Le **flux** reçu ne va dépendre que de l'angle solide par cette surface vue du centre de la source :
 $F = I * \Omega$, exprimée en **lm**.

La densité ou **éclairement**, le flux divisé par l'aire, reçu par cette source est de : $E = \frac{I}{r^2}$, exprimée en **lux** ($lm \cdot m^{-2}$).

Explication :

$$\frac{F}{S} = \frac{I * \Omega}{S} = \frac{I * dS * \cos(\theta)}{S * r^2} = \frac{I}{r^2}$$

4. Sources orthotropes :

a) *Définition*

Si une source ponctuelle (la lumière est émise à partir d'un seul point ; exemple d'une étoile : l'œil considère l'étoile comme un point sphérique) émet le même flux dans toutes les directions, alors elle est dite orthotrope. Dans ce cas, le flux lumineux est proportionnel à l'angle solide. Par exemple une lampe de bureau est une source orthotrope.

Une source orthotrope conserve la même teinte et la même luminosité quelle que soit la position de l'observateur, elle garde donc sa luminance en tout point selon le point de vue de la source (elle ne change ni de teinte ni de luminosité). C'est une caractéristique locale au mode d'émission en chaque point de sa surface alors que isotrope est une caractéristique globale de la source.

Pour l'observateur, c'est F/Ω qui devient indépendant de la distance et de l'inclinaison, l'éclairement ne va alors dépendre que de l'angle solide occupé par la source et de sa luminance.

b) *Éclairement* :

L'éclairement d'un objet par une source orthotrope dépend de 3 choses : $E = L * \cos(\theta) * \Omega$

↔ Au zénith quand $\theta = 0$ alors, $E = L * \Omega$

On peut citer comme sources orthotropes : objets mats, sources thermiques, sources luminescentes; au contraire les objets irisés (changeant de teinte) tels que les LED ainsi que des sources directionnelles tels que des lasers ne sont pas orthotropes.

Certaines sources telles que le soleil ou les étoiles sont à la fois isotropes et orthotropes, elles nous apparaissent comme des disques plats.

Pour une source étendue, selon la loi de **Lambert** :

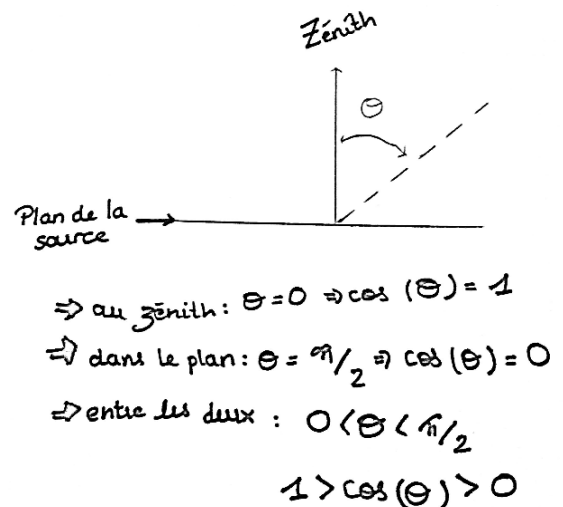
Si une source étendue (la lumière est émise à partir de plusieurs points) a la même luminance dans toutes les directions, elle est dite orthotrope. Si nous prenons l'exemple du soleil, l'œil voit un cercle, qui est donc constitué de plusieurs points : on peut voir comme un disque plat si tu le regardes depuis sa source (donc 2π) mais du côté de l'observateur il prend un angle solide de 4π car ce sont des sphères pleines. L'angle d'ouverture est ici maximal.

c) *Intensité* :

L'intensité lumineuse émise dans une direction est % proportionnelle à la surface exposée dans cette direction :

- Au zénith elle est maximale
- Dans le plan de la source elle est nulle
- Entre les deux on utilise la formule ci dessous

$$I = L * dS * \cos(\theta)$$



Récapitulatif des formules:

"Universelles" : $E = F/S$ $d\Omega = \frac{dS \times \cos(\theta)}{r^2}$

"Isotropes" : $I = F/\Omega$ $E = I/r^2$ $L = I/S \rightarrow \cos \cos(\theta) = 1$

"Orthotropes" : $\hat{E} = \pi \times L$ (loi de Lambert)
 $L = \frac{I}{S \times \cos(\theta)} = \frac{E}{\Omega \times \cos(\theta)}$

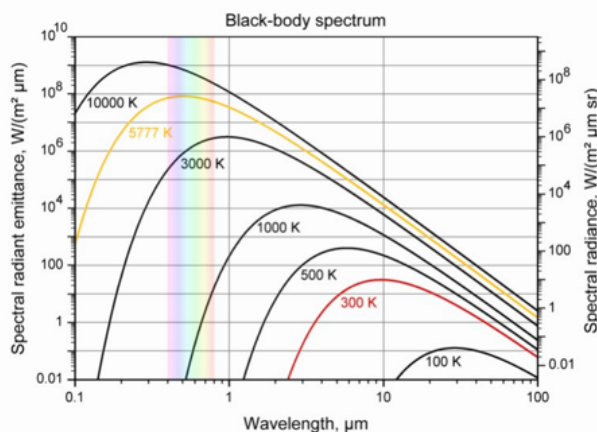
Corps noir :

Corps noir = objet qui absorbe l'énergie électromagnétique (la lumière); c'est pour cette raison qu'il apparaît noir. De plus, il est à l'équilibre thermique. Mais sous l'effet de la chaleur le corps noir pourrait émettre de la lumière :

→ le corps noir n'est donc pas noir en toutes circonstances $\triangle$

Les corps noirs sont **orthotropes à toutes les fréquences**, ils émettent un rayonnement purement thermique, qui ne dépend que de la température.

→ exemple : les étoiles sont des spectres de corps noir (ainsi, leur luminosité permet de déterminer leur température), on peut aussi citer les sources lumineuses.



Les objets courants n'absorbent pas toute l'énergie électromagnétique, ils en absorbent une partie et réfléchissent l'autre. C'est d'ailleurs, dans le cas de la lumière, la portion d'énergie réfléchie qui sera visible par l'œil.

Ainsi chaque objet, selon la disposition de ses atomes va émettre ou réfléchir certaines longueurs d'ondes, on parle alors de raies d'émission ou d'absorption. L'objet est donc caractérisé par son spectre de raies, sa couleur, ou encore sa température.

◦ LOI DE STEFAN BOLTZMANN

Si l'on intègre sur toutes les longueurs d'ondes, la densité du flux énergétique émis par le corps noir varie en fonction de sa température absolue T (exprimée en Kelvin) selon la formule :

$$E = \sigma * T^4$$

◦ LOI DE WIEN

La longueur d'onde à laquelle un corps noir émet le plus de flux énergétique est inversement proportionnelle à sa température selon la formule :

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

Remarque : les constante de Stefan-Boltzman et de Wien ne sont pas nécessaires à connaître, seulement les proportionnalités.

Il est important de bien connaître ces lois!

5. Vision des couleurs :

Dans notre oeil on a des cellules sensibles à la lumière, on a 4 types de récepteurs :

- 3 types de cônes (couleurs), le daltonisme vient d'une mauvaise fonction de ce type de récepteur,
- 1 type de bâtonnets (noir et blanc).

Les pigments (*comme le β carotène*) peuvent nous paraître rouge (ou une autre couleur) car le matériau qui colore nous renvoie de la lumière rouge donc il absorbe le vert et le bleu : cela se fait donc par **soustraction** de ce qu'il absorbe.

Nb : la fovéa est une partie de la rétine située à l'intersection avec l'axe visuel, qui est concentrée en cônes particuliers, offrant une vision optimale quand l'image se forme dessus.

III. SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION

1. Spectroscopie

Spectrographie : graphie → Écriture.

Spectroscopie → étude des spectres lumineux : scopie → Observation.

Spectrométrie : métrie → Mesure.

⇒ spectre lumineux : variation de la longueur, énergie, ou fréquence du rayonnement.

Quantification de l'énergie d'un électron :

1	Absorption = gain d'énergie Excitation de l'électron	2	Émission = perte d'énergie Désexcitation de l'électron
---	---	---	---

Ainsi, sur le spectre d'absorption les couleurs correspondant aux longueurs d'ondes absorbées ne vont pas apparaître. Et inversement pour le spectre d'émission, seules vont apparaître les longueurs d'ondes correspondant à une variation d'énergie (longueurs d'ondes émises).

Chaque atome ou molécule va absorber des longueurs d'ondes qui lui sont propres grâce à la particularité de sa structure (*position des atomes les uns par rapport aux autres dans une molécule ou position des électrons dans un atome*). De ce fait, on peut étudier la spectrométrie de façon quantitative.

Si on considère une molécule A en solution, qui absorbe la $\lambda=700\text{nm}$. Ainsi, plus il y aura de molécules A dans la solution, plus la couleur correspondant à $\lambda=700\text{nm}$ sera absorbée.

Ratio entre les concentrations : différence entre les concentrations des différents produits.

2. Loi de Beer Lambert

De même, nous pouvons dire que **la DO d'une solution est proportionnelle à la concentration** si on utilise :

- Un rayonnement monochromatique, puisqu'on a vu que différentes longueurs d'onde modifient la transmittance, et donc aussi la DO.
- Une solution de faible concentration (Pas au dessus de 10^{-3}).
- Solution homogène.
- Solvant transparent pour ne pas avoir le phénomène de réflexion/transmission/absorbance à l'interface air/liquide.

En effet ce phénomène ne sera observé qu'un niveau liquide/particules du liquide. 1 mole étant égal à $6,02 \cdot 10^{23}$ particules, plus la concentration augmente, plus il y a de moles dans le milieu (concentration en mol/L), et donc, plus il y a de particules : **cette loi est additive**. Ainsi à chaque particule, on observe le phénomène d'absorbance, donc la DO augmente bien quand C augmente. Pour deux énantiomères le résultat sera identique pour cette loi (au contraire de celle de Biot).

3. Transmittance et densité optique :

Propriétés des milieux transparents :

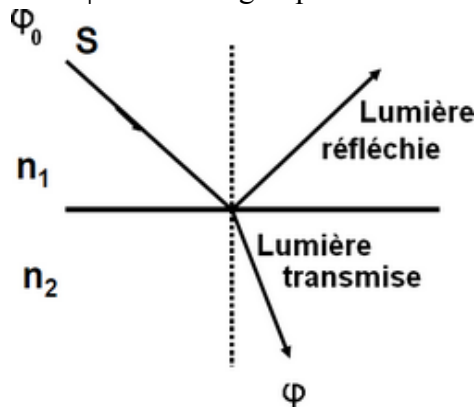
Selon la définition d'un milieu transparent, il n'y a aucune perte d'énergie du flux lumineux le traversant, ainsi, lors de la propagation de l'onde le flux énergétique est conservé.

Propriétés des milieux non transparents :

Par opposition au milieu transparent, l'onde est **transmise** et **réflétée** avec la perte d'une certaine énergie qui est **absorbée** par la matière. Ces 3 coefficients vont varier selon la longueur d'onde de la lumière, c'est pourquoi expérimentalement, on utilise toujours un rayonnement monochromatique. Enfin, il est à noter que la somme est toujours égale à 1.

◦ Transmittance :

Avec φ = flux énergétique à la sortie du milieu, et φ_0 = le flux énergétique initial.



- Absorbance = Densité Optique (DO) = Extinction = $A = -\log(Tr) = \log(1/Tr)$
On utilise souvent le dB (décibel) comme unité de la densité optique.

Donc : $Tr = 10^{-DO} \Leftrightarrow DO = -\log(Tr)$

Si la lumière traverse 2 objets successifs notés 1 et 2, $Tr = Tr_1 * Tr_2$ et $A = A_1 + A_2$

Donc, dans un milieu homogène, plus l'épaisseur d'un matériau augmente, plus la densité optique augmente.

$Tr = \varphi/\varphi_0$

On peut donc définir le coefficient d'extinction molaire (aussi appelé coefficient d'absorption molaire ou absorptivité molaire) : (en $m^2.mol^{-1}$ en unité SI, sinon en $L.mol^{-1}.cm^{-1}$) $\Rightarrow$ On remarque alors que **la DO n'a pas de dimension.**

$$\epsilon = \frac{\log \frac{I_0}{I_t}}{c \cdot d}$$

4. Couches de demi-atténuation :

On peut utiliser les couches de demi-atténuation pour caractériser la transmittance d'une solution. C'est l'épaisseur pour laquelle seulement 50% de l'intensité lumineuse est transmise.

$$1 \text{ CDA} = 0.3 \text{ DO} \Leftrightarrow 1 \text{ DO} = 3.3 \text{ CDA}$$

5. Spectroscopies qualitatives et quantitatives

Dans la spectroscopie d'absorption quantitative, on connaît les composants et leur absorbance et on va chercher leur concentration.

Alors que dans la qualitative, on va essayer de connaître des informations sur la nature chimique du composé.

- Quantitative :

Principe fondamental de la spectroscopie : le coefficient d'absorption linéique d'un soluté ou d'un mélange de gaz est la somme des coefficients d'absorption molaires de ses composants pondérés par leur concentrations.

$$\mu_{\text{tot}}(\lambda) = \sum \epsilon_i(\lambda) C_i$$

Pour λ donné, la densité optique linéique vaut :

Pour trouver les concentrations on va donc résoudre un système d'équations à plusieurs inconnues.

- Qualitative :

Ici on retrace l'absorption en fonction de la fréquence :

- IR → Quanta vibratoires
- UV → Orbite moléculaire
- Rayons X → Électron de coeur

Utilisation : Oxymétrie de pouls (connaître les valeurs d'absorption pour les qcms)

- Hémoglobine (= oxyhémoglobine) → absorbe la lumière **rouge** à 660 nm.
- Désoxyhémoglobine (= hémoglobine réduite) → absorbe dans **l'infrarouge** à 940 nm.

Moyen mnémotechnique : l'hémoglobine réduite absorbe dans le rouge.

- Composé pulsatile (P) = sang artériel.
- Composé non pulsatile (NP) = sang veineux + capillaire.

La densité optique du membre (un doigt ou un orteil en général) est dite « pulsatile ».

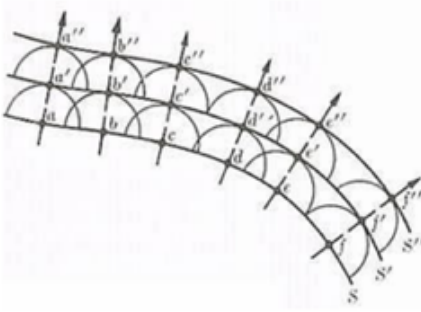
D.O. systolique – D.O. diastolique = D.O. sang artériel

La fiabilité des résultats est parfois compromise car dans tous ces cas, on ne peut alors plus (ou difficilement) distinguer l'hémoglobine de la désoxyhémoglobine. Par exemple pulsatilité faible → présence d'autres type d'hémoglobines.

IV. OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

1. Différents principes

Principe De Huygens-Fresnel



Les ondelettes sont représentées par des demi-cercles sur le schéma. La tangente de ces ondelettes donc l'enveloppe où la phase est retrouvée (interférences constructives) alors qu'entre deux enveloppes on est en déphasage (interférences destructives).

Et selon Huygens c'est cette succession d'ondelettes qui forme le rayon lumineux. Le **trajet est ici maximisé**.

Ainsi Huygens tient compte de la nature ondulatoire de la lumière mais pas de sa nature périodique, il ne tient pas compte de la notion de couleur de la lumière.

Principe De Fermat

En général, la lumière se propage en prenant le chemin le plus court (**trajet ici minimisé**), il énonce : la trajectoire d'un rayon lumineux est celle pour laquelle le chemin est stationnaire (le chemin minimal la plupart du temps). Ce qui entraîne :

- Une trajectoire en ligne droite dans un milieu homogène, indépendant du sens de propagation.

Attention, le terme stationnaire est ici différent de celui des ondes stationnaires vu précédemment :

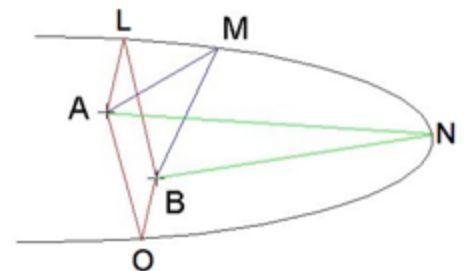
Le chemin optique est **stationnaire** si on déplace le chemin de ϵ cela va entraîner une variable de second ordre ou plus.

Dans cette parabole seuls les chemins ALB/AOB (minima locaux) et ANB (maximal local) sont possibles alors que AMB ne l'est pas (pas les mêmes variations des deux côtés).

Selon Fermat :

→ Un chemin optique est toujours stationnaire parfois minimal

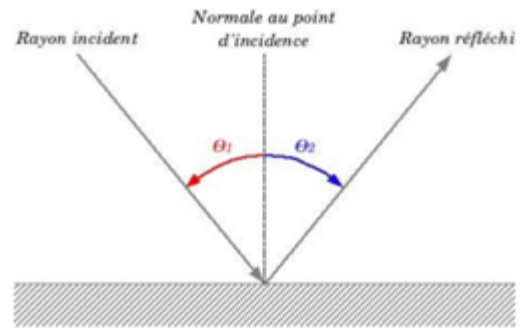
→ Un chemin minimal est toujours stationnaire.



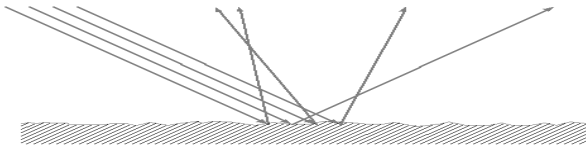
Lois De Snell-Descartes

On passe ici de $n_1 > n_2$.

- **Réflexion Spéculaire** (1ère loi)
 - Le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence.
 - Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux $\theta_1 = \theta_2$.

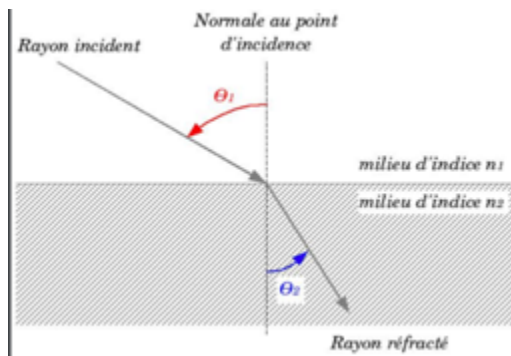


- **Diffusion = réflexion diffuse :**



- Une onde lumineuse ne peut être déviée que par des objets (ici aspect rugueux d'une surface qui forme des bosses) qui ont une **taille proche** de la longueur d'onde du rayon lumineux.

- **Réfraction sur un Dioptre** (2ème loi)



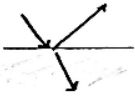
- Relation de Snell-Descartes :

$$n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$$

- Angle limite de réfraction donné par la relation de Snell-Descartes : (utilisée pour les réfractomètres) : **angle limite = $\arcsin(n_2 / n_1)$** . Au delà de cette angle, il n'y a pas de réfraction possible (que de la réflexion).
- Si $n_2 > n_1$ le rayon se rapproche de la normale. Si $n_2 < n_1$ le rayon s'écarte de la normale.

2. Réfraction

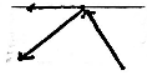
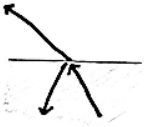
Réfraction : $n_{\text{en bas}} > n_{\text{en haut}}$



⇒ il y a toujours un faisceau réfléchi

Angle limite

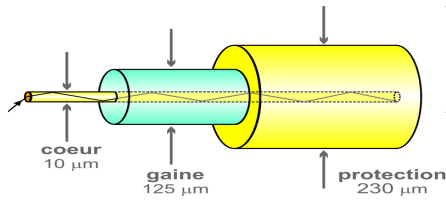
Réflexion totale



RÉFRACTION EN MILIEU NON HOMOGÈNE

- Milieu non homogène : milieu où l'indice de réfraction n n'est pas le même en tout point.
- Les rayons lumineux s'orientent plutôt vers les indices les plus forts, l'indice faible va repousser la lumière alors que le fort va l'attirer.

APPLICATION : LA FIBRE OPTIQUE



→ Dans la fibre optique l'angle d'incidence est supérieur à l'angle de réfraction limite, donc il n'y a qu'une **réflexion totale** du rayon lumineux.

→ Avec $n(\text{cœur}) > n(\text{gaine})$, (c'est le cas en bas à droite du schéma plus haut) ainsi le rayon lumineux se propage sur de longue distance avec peu de perte.

3. Stigmatisme

Le stigmatisme **rigoureux** correspond à la condition suivante : un objet ponctuel doit donner une image elle-même ponctuelle. Obtenu pour tous les points uniquement avec un **miroir plan**.

→ Après que les rayons lumineux traversent un tel système optique, à un *point* A_{objet} correspond un *point* A'_{image} .

→ D'après le principe de retour inverse de la lumière, on peut aussi dire que, par ce système optique, à un point A'_{image} correspond un point A_{objet} : ces deux points sont conjugués, ou encore qu'il existe une **projection bijective** entre ces deux points.

Le stigmatisme rigoureux correspond à un **idéal**.

Avec l'imperfection de la réalité, bien souvent il n'est réalisé que pour un couple de points particuliers ; pour les autres points, ce n'est qu'un stigmatisme **approché**, les rayons lumineux réfractés ne se coupent pas en un unique point précis, mais presque.

- Pour des objets infinis : θ_1 et θ_2 sont constants
- Pour des objets proches : $\frac{\tan(\theta_1)}{\tan(\theta_2)} = \frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{\theta_1}{\theta_2}$

Pour appliquer l'**aplanétisme** il faut que les conditions de Gauss soient respectées, c'à d que $\theta < 5^\circ$.

NB pour les curieux : L'astigmatisme fait que l'image d'un point n'est pas un point, mais un segment de droite. Comme il vous l'est précisé un peu après dans le cours, en ce qui concerne l'œil, l'astigmatisme est dû à un défaut de symétrie de révolution sphérique de l'œil (plus particulièrement du dioptre cornéen antérieur) ; ceci fait que si le faisceau incident a une section circulaire, le faisceau réfracté a quant à lui une section elliptique, ce qui génère dans l'espace image deux lignes appelées focales : L'œil astigmatique voit alors un objet ponctuel sous la forme d'un segment de droite horizontal ou vertical suivant la focale qui est sur la rétine, ou qui en est la plus proche (et qui est alors ensuite amenée sur la rétine par accommodation).

Par exemple : si c'est la focale verticale qui est sur la rétine :

- Un point a pour image rétinienne un petit segment de droite verticale :



- Une droite verticale, qu'on peut décomposer comme un ensemble de points agencés verticalement, a pour image rétinienne un ensemble de petits segments verticaux, donc une droite verticale nette :



- Une droite horizontale, qu'on peut décomposer comme un ensemble de points agencés horizontalement, a pour image rétinienne une droite horizontale floue :



Un astigmat ne peut donc pas voir simultanément 2 droites perpendiculaires de façon nette.

Exemple De Stigmatisme Approché : les miroirs :

Paraboloïdes de révolution : stigmatisme **parfait** entre foyer et l'infini.

L'ellipsoïde de révolution : stigmatisme **parfait** entre les deux foyers (tous deux réels) (dans le cas spécial de sphérique les deux foyers sont confondus).

Hyperboloïde de révolution : stigmatisme **parfait** entre les points A (réel) et B (virtuel).

En coin de cube : Après 3 réflexions le rayon est renvoyé de là où il vient.

Détail des formules : comment arriver à $HA_{obj} \cdot \tan \theta_1 = HA_{img} \cdot \tan \theta_2$?

$$\tan (\pi/2 - \theta_1) = \frac{HA_{obj}}{HO} = \frac{1}{\tan \theta_1}$$

$$\tan (\pi/2 - \theta_2) = \frac{HA_{img}}{HO} = \frac{1}{\tan \theta_2}$$

On fait alors un produit en croix :

$$HO = HA_{obj} \cdot \tan \theta_1 = HA_{img} \cdot \tan \theta_2, \text{ CQFD !}$$

V. SYSTÈMES OPTIQUES :

1. Théorie Des Lentilles Minces

L'utilité d'une lentille mince est qu'elle est si peu épaisse par rapport aux rayons de courbure de ses 2 faces et à la différence entre ces rayons, qu'on considère que les rayons franchissent un unique dioptre, et non deux (celui de la face antérieure et celui de la face postérieure), ce qui simplifie les choses.

- Une lentille convergente va être plus épaisse au centre qu'en périphérie
- Une lentille divergente va être plus épaisse en périphérie qu'au centre

Une lentille est caractérisée par sa **vergence (D)** et sa **distance focale (OF')**.

Pour utiliser l'approximation des lentilles minces, il faut se trouver :

- Dans les conditions de Gauss
- L'épaisseur de la lentille est faible devant les deux rayons de courbures

Attention, ce n'est qu'une situation d'approximation, et il existe dans certains cas des aberrations (cf. après).

Stigmatisme entre un point et l'infini

(Ce titre apparemment compliqué veut juste dire qu'ici, on considère des rayons incidents venant de l'infini donc parallèles entre eux qui franchissent un dioptre et dont les rayons réfractés convergent en un unique point image, le foyer).

La vergence, aussi appelée puissance se donne en dioptrie (ou m^{-1}).

Attention, en optique les distances, telle que la distance focale, sont algébriques, c'est-à-dire que la distance focale est affectée d'un signe + si le foyer est dans l'espace image, ou d'un signe - si le foyer est dans l'espace objet (ce qui arrive quand la lentille est divergente).

De même, la vergence est une grandeur algébrique : elle est **positive** si la lentille est **convergente**, et **négative** si la lentille est **divergente**.

De manière générale, ce qui est à droite de la lentille est compté comme négatif et à gauche de l'axe optique comme positif (important pour certains calculs).

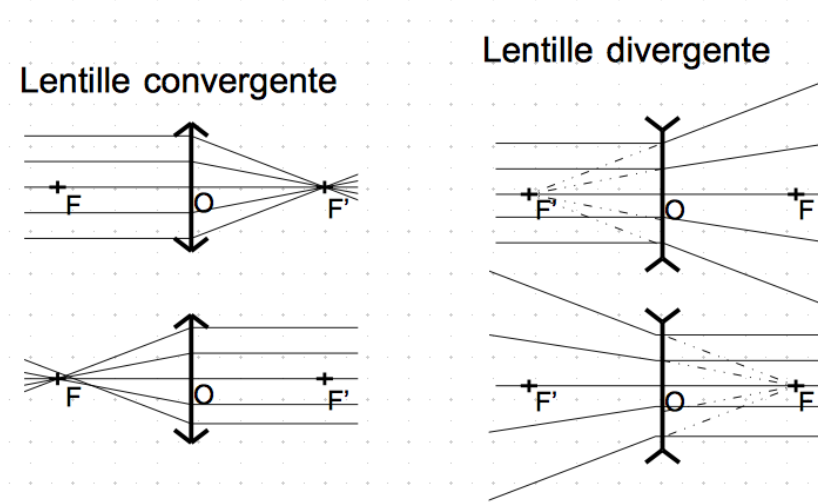
2. Constructions optiques :

Il faut être dans le cadre des conditions de Gauss : avoir une lentille mince, un système aplanétique (l'image d'un point B hors de l'axe optique se situe sur la perpendiculaire passant par l'image du point A, ce dernier étant la projection de B sur l'axe optique)...

Les **propriétés** suivantes sont très utiles à connaître pour faire des constructions optiques :

- Un objet à l'infini donne une image dans le plan focal de la lentille (plan vertical perpendiculaire contenant le foyer).
- Un objet situé à $2f$ donne une image identique à l'objet située à $2f$ (le grandissement γ vaut alors -1, voir après ce qu'est le grandissement).
- Un objet situé au-delà de la focale objet F donne une image réelle.

- Un objet situé dans le plan focal objet donne une image à l'infini.
- Un objet situé entre la focale et le centre de la lentille donne une image virtuelle.



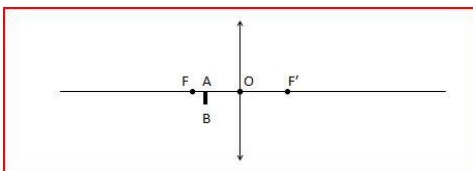
En pratique : comment construire $A'B'$, image de AB qui est perpendiculaire à l'axe optique ?

On va considérer 3 types de rayons :

- Les rayons parallèles à l'axe optique d'un côté, qui sont déviés et passent par le foyer de l'autre côté.
- Les rayons passant par le centre optique, qui ne sont pas déviés.

De plus, d'après la 1^{ère} propriété, des rayons parallèles (provenant de l'infini mais de direction différente à l'axe optique) se coupent dans le plan focal à pour un rayon quelconque, on peut alors tracer sa propagation après la lentille, en considérant le rayon parallèle qui passe par le centre optique et sachant qu'ils se coupent dans le plan focal.

Exemple : détail de cette construction optique :



Ce style de flèche ($\uparrow$) signale une lentille convergente. Une lentille divergente serait avec les flèches retournées vers l'extérieur.

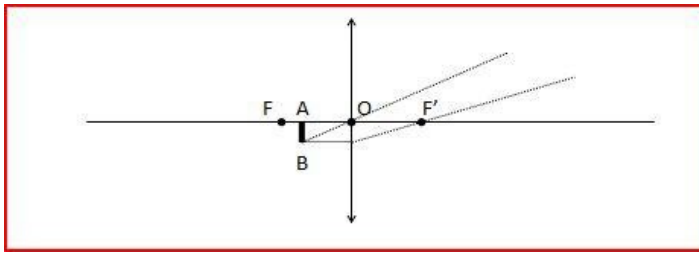
On voit alors qu'ici l'objet AB est entre F et la lentille, son image sera donc une image virtuelle (qu'on ne peut pas voir) d'après les propriétés précédentes. C'est ce qui se passe avec l'objectif d'un microscope optique, l'oculaire permettra ensuite à l'observateur de voir l'image définitive.

On trace le rayon passant par B et le centre optique O ; par propriété, ce rayon n'est pas dévié.

On trace le rayon passant par B et parallèle à l'axe optique; après la lentille convergente, ce rayon sera tel qu'il passera par la focale image F' .

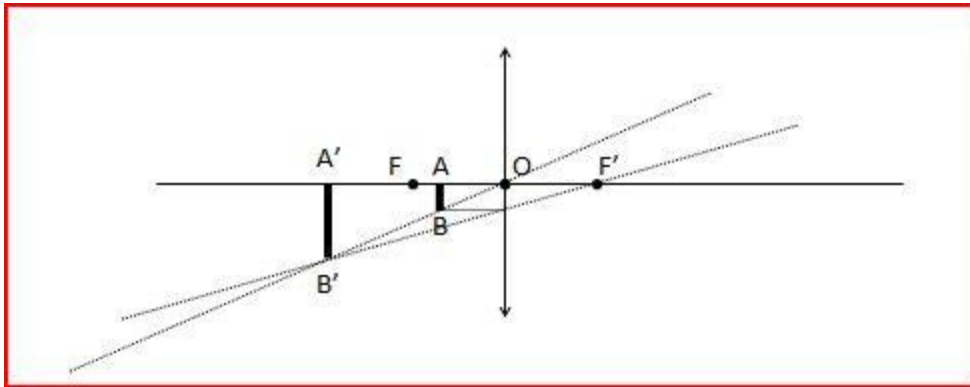
Si la lentille est divergente, ce n'est pas la même chose : on construit la suite du rayon de telle sorte que son prolongement passe par la focale objet F .

On obtient alors ceci :



Ces deux rayons lumineux ne se coupent pas dans l'espace image, mais dans l'espace objet. Il faut donc tracer leurs prolongements. Le point où ces deux rayons se coupent est B', image de B.

D'après la condition d'aplanétisme, on construit alors A' en projetant B' sur l'axe optique.



En mesurant la taille de l'objet et celle de l'image, on définit alors la notion de grandissement $\gamma = A'B' / AB = OA' / OA$. Attention, ce sont des distances algébriques, les distances ont le même signe si elles sont dans le même sens (ce qui est le cas ici) ; à l'inverse, le grandissement est négatif si elles ne sont pas dans le même sens.

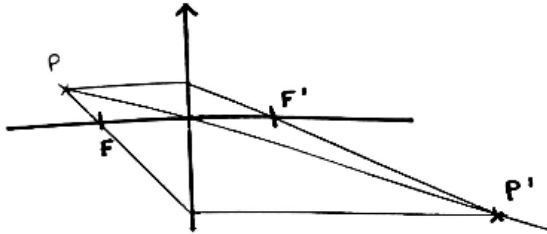
Exercice : Faire pareil avec toutes les autres constructions optiques du poly ! LENTIL

LENTILLES CONVERGENTES

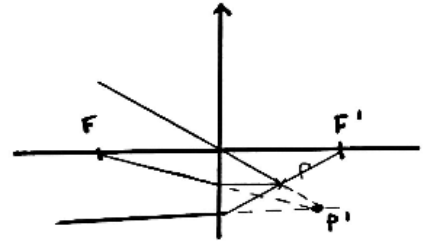
3 rayons:

- passant par l'origine du repère et non dévié
- parallèle à l'axe optique $\rightarrow$ vers F'
- passant par $F \rightarrow$ parallèle à l'axe optique

Objet du côté de F :



Objet du côté de F' :

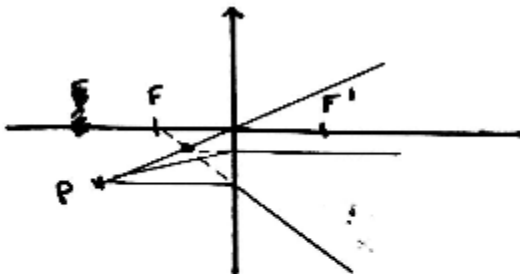


LENTILLES DIVERGENTES

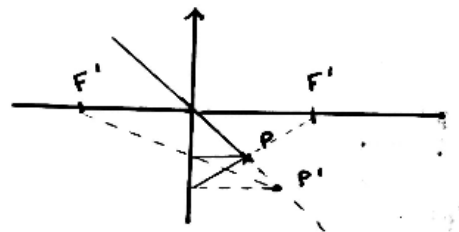
3 rayons:

- passant par l'origine du repère et non dévié
- parallèle à l'axe optique $\rightarrow$ prolongement passe par F
- rayon repartant parallèle $\rightarrow$ prolongement passe par F'

OBJET DU CÔTÉ DE F' :

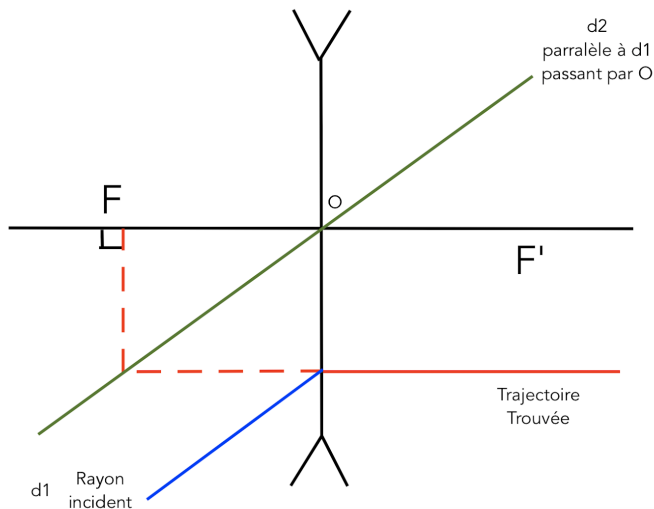


OBJET DU CÔTÉ DE F' :



■ j'ai une méthode magique qui marche à tous les coups ! Quand vous avez un rayon incident qui arrive de n'importe où, pour savoir sa trajectoire de l'autre côté de la lentille vous faites ces étapes :

- on trace la droite parallèle au rayon incident qui passe par l'origine (la bleue ou d1)
- on trace en pointillé une droite qui part de F' jusqu'à qu'elle coupe la droite qui passe par l'origine (en rouge, les pointillés verticaux)
- puis à ce point d'intersection, vous prenez votre règle et en passant par l'axe des ordonnées et ce point d'intersection vous obtenez la trajectoire (en rouge les pointillés horizontaux puis la droite rouge = Trajectoire trouvée)



voilà maintenant les tracés d'optique ne vous feront plus jamais peur :)

3. Formule de conjugaison

Formule de conjugaison à retenir et savoir appliquer pour calculer les distances : si A et son image A' sont conjugués, et s'il y a un stigmatisme entre eux, alors :

$$\boxed{1/OA' - 1/OA = 1/OF'}$$

(attention à ne pas oublier les signes, et à mettre les distances dans la même unité)

F' étant l'image du foyer F ; F' est situé sur l'axe optique de telle sorte que la lentille soit à équidistance de F et F'. La formule peut s'écrire de cette manière :

$$1/OA + 1/OF' = 1/OA' \quad \text{Ou alors : } \boxed{1/OA' - 1/OA = \text{Vergence}}$$

Sachant que $1/OF'$ est égal à la vergence (soit l'inverse de la distance focale).

Et donc peut s'expliquer de cette manière :

Un objet ($1/OA$) à travers un système optique ($+ 1/OF'$) donne une image ($= 1/OA'$)

4. Systèmes optiques centrés

a) L'œil

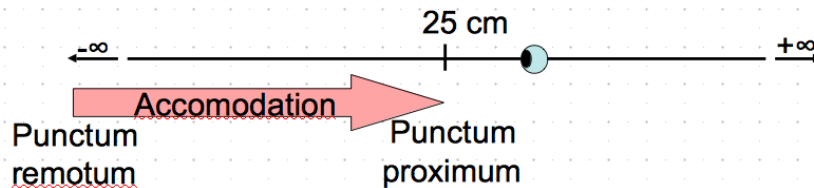
Système centré car il existe un rayon lumineux passant par le centre de ces 4 dioptries (cornéens antérieur et postérieur, cristalliniens antérieur et postérieur). On peut alors assimiler l'œil à un dioptre de vergence basale (au repos) de + **60D**, de telle sorte que normalement, **l'image** d'un point situé à **l'infini** (plus de 5m) se forme sur la rétine, on dit alors que la rétine est le **conjugué** de l'infini et vice-versa. Nb : l'image qui se forme sur la rétine est une image réelle.

Quand l'œil doit voir des objets situés à moins de 5m : en tant que source secondaire de lumière, un tel objet va émettre des rayons qui ne sont plus parallèles mais divergents. Si la vergence restait constante à +60D, alors l'image ne se formerait plus sur la rétine mais en arrière. Il faut alors que la vergence augmente afin de faire plus converger les rayons, et que l'image se forme sur la rétine. Ceci est réalisé par l'accommodation : de façon réflexe, la vergence du dioptre cristallinien antérieur augmente, ce qui fait augmenter la vergence totale de l'œil.

L'œil normal est emmétrope :

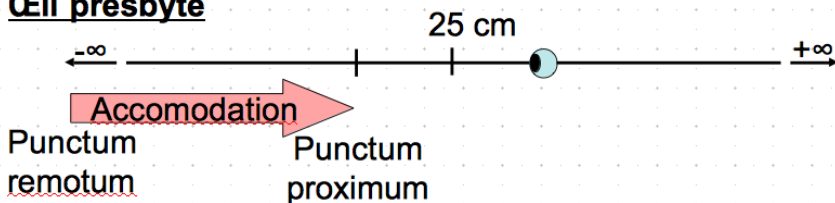
- Son **punctum remotum** : est le point le plus éloigné où l'on peut voir sans accommoder. Il est de $-\infty$ chez l'emmétrope ($-\infty = +\infty$). Soit les rayons lumineux convergent vers la rétine et forment une image réelle.
- Son **punctum proximum** : est le point le plus proche de l'œil (net) que l'on peut voir en accommodant au maximum. Il est de - 25 cm chez l'emmétrope (on le met négatif car il se trouve à gauche sur un schéma) Il est donc de 4D en valeur absolue ($1/0.25 = 4$).

Œil jeune



Un œil presbyte est un œil dont le punctum proximum va diminuer car son pouvoir d'accommodation va diminuer. Cela se fait souvent en vieillissant.

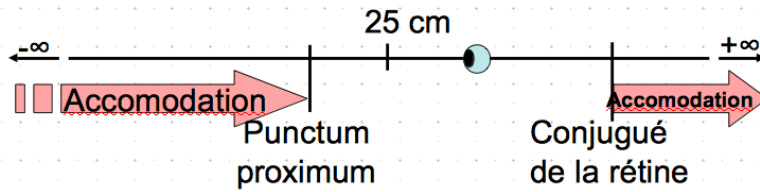
Œil presbyte



Un œil hypermétrope est insuffisamment puissant pour sa longueur (soit il a moins de +60D de vergence basale et il est de bonnes dimensions, soit il a +60D de vergence basale mais il est trop petit) à l'image d'un objet à l'infini se forme en arrière de la rétine. Pour corriger ça, l'œil va utiliser une partie de sa capacité d'accommodation pour augmenter sa vergence et ramener l'image sur la rétine. Utiliser l'accommodation pour voir à l'infini n'est pas normal, ce qui justifie le problème des hypermétropes qu'« ils ne voient pas bien de près » (en effet, ils utilisent une partie de leur réserve d'accommodation pour voir à l'infini, au lieu de l'utiliser pour voir des objets situés près de leurs yeux).

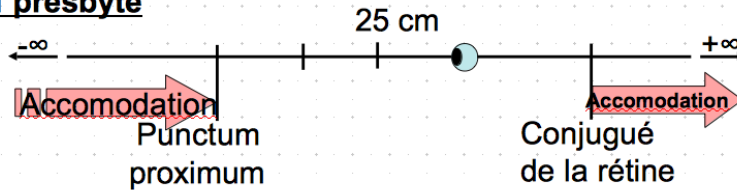
- Son **punctum remotum (conjugué de la rétine)** est fixe et sera > 0 (car en arrière de la rétine),
- Son **punctum proximum** sera > 25 cm si il a toujours ses 4D d'accommodation.

Œil jeune



Si il est aussi presbyte, cela va accentuer son hypermétropie.

Œil presbyte

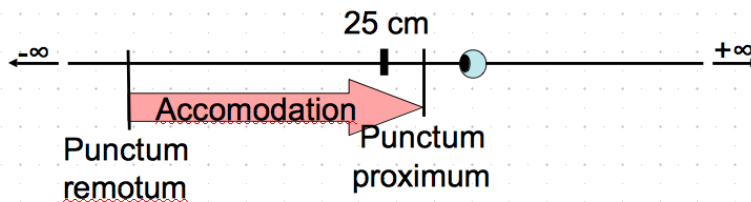


- La correction se fait avec une lentille convergente (+).

Un *œil myope* est lui trop puissant pour sa longueur à l'image d'un objet à l'infini se forme en avant de la rétine. Si on poursuit les rayons, c'est un cercle qui se forme sur la rétine et non un point, ainsi les myopes « ne voient pas bien de loin ».

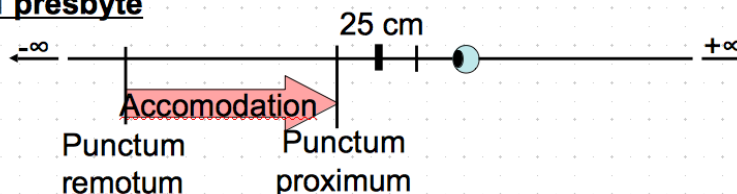
- Son **punctum remotum** est fixe et < 0 (car en avant de la rétine), c'est là où il y voit le plus loin sans accommoder (comme -1m par exemple).
- Son **punctum proximum** sera < 25 cm avec ses 4D d'accommodation.

Œil jeune



Si il est aussi presbyte, cela sera moins grave qu'avec une hypermétropie car la presbytie va ramener son PP à 25cm, et ne va pas accentuer sa maladie.

Œil presbyte



- La correction se fait avec une lentille divergente (-).

Le pouvoir séparateur de l'œil : (aussi appelé minimum séparable) est la distance séparant deux points objets telle que l'œil voit deux points images distincts. En clair, si la distance séparant deux points est inférieure au minimum séparable, l'œil les confondra et ne les percevra que comme un seul point. Idéalement elle est de 0.33mm à une distance de 1m, donc de 3.3mm à 10m...Mais cela dépend des conditions d'éclairement, si l'image se forme sur la fovéa ou non, contraste, fatigue...

Méthodes pour la résolution des exercices sur les lentilles :

Exemple d'énoncé :

Prenons un étudiant en médecine myope, on estime qu'il y voit bien sans accommoder à 50 cm, en accommodant au maximum il y voit bien jusqu'à 25cm.

- A. La correction doit se faire à l'aide d'une lentille convergente.
- B. La vergence de la lentille correctrice est de 2D.
- C. La vergence de la lentille est de -1D.
- D. Cet étudiant est presbyte.
- E. En utilisant ses nouvelles lunettes il ne pourra plus y voir de près comme ses confrères.

Pour résoudre ce genre de qcms il y a plusieurs manières :

Méthode 1 : Avec la formule de conjugaison principalement



- A. On sait que c'est faux, car la correction d'une myopie se fait avec une lentille divergente.
- B. On veut ici ramener son PR à l'infini.

En utilisant la formule de conjugaison :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = V \rightarrow \frac{1}{-0.5} - \frac{1}{\text{infini}} = V \rightarrow -2D.$$

Donc la B est fausse pour la simple raison que les dioptries données ici sont +, et on voulait du

C. Fausse (voir B).

D. Cette fois ci on utilise une formule ressemblant à celle de conjugaison :

$PA = \left| \frac{1}{PP} - \frac{1}{CR} \right|$ Avec PA : pouvoir d'accommodation, PP Punctum proximum, CR conjugué de la rétine

Donc ici : $PA = \left| \frac{1}{-0.25} - \frac{1}{-50} \right| = |-4 - (-2)| = 2D$. Vu que son pouvoir d'accommodation n'est que de 2 dioptries au lieu de 4, on peut conclure que cet étudiant est presbyte.

E. Avec utilisant de la formule de conjugaison :

$$\frac{1}{OA'} - V = \frac{1}{OA} \rightarrow \frac{1}{-0.25} - (-2) = -4 + 2 = -2$$

Vu que $\frac{1}{OA}$ passe à -2 cela veut dire que $OA = -0.5$

Donc le point le plus près (avec accommodation) où il peut y voir convenablement en utilisant ses lunettes est à 50 cm.

Items vrais : DE.

Méthode 2 :

A. Faux, à partir d'une lentille divergente pour une myopie.

B. Faux, on sait que $Verg\ PR = \frac{1}{PR} + 60 = \frac{-1}{-0.5} + 60 = 62$, vu que la vergence normale est de 60D. Vu qu'on cherche à ramener 62 à 60 on va appliquer une lentille de -2D.

C. Faux, voir B.

D. Vrai, on va maintenant calculer Verg PP : $\frac{-1}{PP} + 60 = \frac{-1}{-0.25} + 60 = 64$. Pour avoir son pouvoir d'accommodation on fait la différence entre verg PR et PP trouvée qui est ici de 2D. Normalement elle est de 4D. Donc cet étudiant est bien presbyte.

E. Vrai, en corrigeant le PR on va modifier le PP :

$$\frac{-1}{62-60} = \frac{-1}{2} = -0.5 \text{ Donc son nouveau PP passe à 50 cm en avant de l'axe optique.}$$

VI. Luminescence et LASER

1) La Luminance

Définition :

La lumière ne provient pas uniquement de l'effet thermique (ex : bougie, feu, etc...), mais aussi de phénomènes propres aux matériaux (ex : phosphore sur écran de fluorescence au rayon X), ou de manière chimique et biologique (ex : ver luisant). Il y a aussi des rayons, par radiation, courant électrique, et bombardement de protons (voir tube de Coolidge, chap Rayon X). Ce sont ces sources lumineuses autre que par chaleur, que l'on appelle « Luminance » (s'exprime en candela/m² ou lux/stéradian).

Les spectres de raie :

Pour tout phénomène de production de Luminance de la matière, il faut se référencer sur la physique quantique.

Planck et sa théorie des niveaux d'énergie quantique, permet d'expliquer les émissions de radiations de certains atomes, par le passage d'un niveau à un niveau inférieur d'énergie quantique, jusqu'à l'état fondamental. On parle ici de désexcitation d'atomes, libérant l'énergie sous forme d'une radiation lumineuse. L'énergie ici est de l'ordre de l'électronvolt.

Donc pour chaque passage entre deux niveaux quantiques (ex : 2>1 ou 3>1 ou 4>1 ou 4>2 ou bien 4>3, et bien d'autres combinaisons), est attribuée une longueur d'onde spécifique. Donc si l'on fait le spectre d'un atome excité, on apercevra des raies correspondant à toutes les longueurs d'ondes spécifiques des différents passages de niveau quantique. C'est ce que l'on appelle un spectre de raie.

Mécanisme :

A partir de matériaux composés de population d'atomes à l'état fondamental (niveau 1), il faut d'abord exciter la population d'atomes par un apport d'énergie, c'est l'étape **d'inversion de population**. Une fois la population excitée (niveau 1<), la population d'atome libère l'énergie accumulée en se désexcitant.

Même principe que pour le rechargement (ici énergie) d'une arme (ici atome), pour qu'avec la détente (ici désexcitation), on provoque un tir (ici rayon lumineux). Et une population ici serait une armée prête à tirer. Toutes les étapes doivent être faites pour obtenir un effet.

Tous les atomes de la population ne se désexcitent pas tous en même temps, car beaucoup de phénomènes entrent en jeu. Mais on peut noter la durée de **demi-vies** (temps nécessaire pour que la moitié des atomes soit désexcitée) pour en définir l'évolution des désexcitations, comme pour les désintégrations radioactives.

Interprétation des demi-vies :

D-V très courtes : tout se désexcite quasi en même temps, donc utile pour faire des **Flash**.

D-V courtes : utile pour les écrans de **fluorescences** en imagerie rayon X (on a le temps de voir l'image après arrêt d'émission de rayon X).

D-V moyennes : principe des objets phosphorescents, qui avec une exposition à la lumière, se chargent d'énergie, et deviennent luminescents dans le noir par **phosphorescence**. Cette luminance est longue, et décroît lentement.

D-V Extrêmement longue : ici il n'y a pas de désexcitation, l'atome n'émet pas de rayon sans un phénomène particulier suivant la matière, qui servirait de « gâchette » pour libérer l'énergie **stockée** sous forme lumineuse. Donc seule utilité, ici c'est la datation.

2) La Spectroscopie D'émission

Définition :

C'est l'étude de tous les spectres caractéristiques, provenant des phénomènes cités précédemment. Chaque longueur d'onde a une origine spécifique. Donc en étudiant la longueur d'onde d'une luminance, on peut en trouver la source d'origine.

Exemple : détecter des triples, doubles, et simples liaisons. On peut même suivant la précision d'analyse en déduire entre quels atomes ils sont liés.

Intérêt :

Donc en étudiant une matière luminescente par spectroscopie d'émission, on peut par exemple en déduire tous les types de liaisons présentes et entre quels atomes quand la précision le permet. Mais aussi étudier tous les autres phénomènes liés à d'autres types de luminances, soit tout mécanisme faisant intervenir la quantique tel que les transferts de niveaux d'énergies, et tout ce qui est en rapport, comme les déplacements d'électrons sur les différentes couches d'orbitales atomiques (ex: étude des rayons X), etc...

c) Le LASER le cours n'est pas souvent fait donc ne passez pas trop de temps sur cette partie.

Définition :

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations. En gros cela veut dire que l'on va émettre de la lumière suivant le même principe que celui cité précédemment, mais avec un changement ingénieux dans la chaîne des étapes nécessaire pour obtenir de la luminance.

Le but est d'obtenir un rayon le plus fort possible, sans trop de variation d'intensité lumineuse, pour qu'elle soit éclairante et en continu. Pour une bonne Luminance, nous allons l'Amplifier par l'usage d'une matière supplémentaire qui ne servira pas à éclairer directement. En effet s'il est intégré au système, elle va émettre de la lumière. Mais ici on place de manière judicieuse, pour que le maximum des rayons énergétiques, frappent la matière émettrice principale pour la Stimuler une fois de plus. Ainsi la matière principale va se recharger juste après avoir été déchargée, grâce à l'Emission de la Radiation provoquée par la matière supplémentaire.

La matière principale quant à elle va donc émettre à nouveau. Résultat meilleure intensité lumineuse et en continu.

Mécanisme :

Au début c'est le principe habituel :

- Absorption : la population absorbe de l'énergie, et les atomes passent à un niveau quantique $1 <$. Soit une inversion de population.
- Émission Spontanée : la population d'atomes revient à l'état fondamental, après désexcitation et émission de radiation lumineuse.

Ici intervient la modification du procédé :

- Émission Stimulée : La radiation émise par la matière supplémentaire qui a été choisie de manière à ce que l'émission de la radiation caractéristique, possède la quantité d'énergie la plus équivalente possible, de celle nécessaire pour exciter de nouveau la matière principale. Ainsi on améliore au maximum la réabsorption, afin d'éviter d'émettre un rayon différent du rayon principal.

Il y a donc émission d'un deuxième rayon, par la stimulation de la matière principale, identique au premier, de même longueur d'onde et en phase. Remarque ce rayon est émis que si la population est encore inversée, sinon il est absorbé par trop d'atomes en état fondamental.

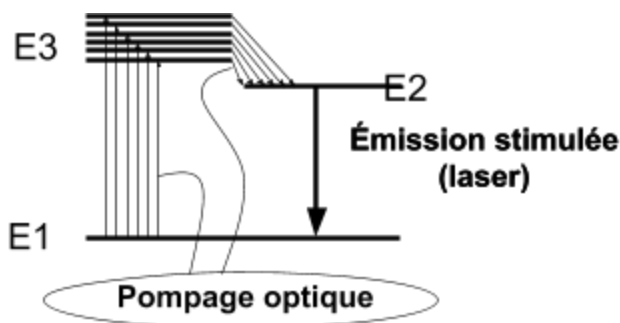
Comment choisir sa matière supplémentaire :

L'amplification devient intéressante si l'on utilise une excitation au niveau 3. Le choix se base sur les propriétés de ce niveau 3 :

Le niveau E3 doit avoir une large bande de sous niveaux pour qu'il ait un max de réabsorption de photons, pour repasser du niveau E1 à E3. Car tous ces rayons ne sont pas en phase et sont d'énergies différentes. Plus ces rayons sont absorbés, on obtiendra grâce au passage au niveau E3, plus on aura des rayons en phase, et de même direction, par retour au niveau E2.

→ Que le niveau E3 ne replonge pas directement au niveau E1, et qu'il ait le temps de passer par le niveau E2.

→ Que le passage de E1 vers E3 ne soit pas trop coûteux en énergie, par rapport à E1 vers E2. Sinon il n'y a pas d'intérêt de chercher le niveau E3, par rapport à E2 habituellement, si l'on ne gagne pas assez de rendement.



Le pompage optique :

Cette méthode est un moyen d'amplification de la luminance, vers de fortes intensités lumineuses. Mais cette fois sans le but d'obtenir une radiation continue, mais d'obtenir de la puissance, et une qualité de radiations lumineuses (rayons en phase et même direction).

La méthode consiste à récupérer les rayons amplifiés à la sortie du laser, et à le renvoyer dans le système, pour inverser de nouveau la population, pour émettre le double (rayon renvoyé, plus nouveau rayon, car alimentation n'est pas coupée). On répète le procédé en boucle dans la cavité optique, autant de fois nécessaire à la puissance de sortie désirée.

Les amplificateurs lumineux, permettent de renforcer un signal, mais ils fonctionnent que par pompe optique et émission stimulée.

Utilité du laser :

On utilise pour des opérations diverses. Exemple en biologie, on l'utilise pour provoquer de la chaleur, à un point précis. Ceci provoque des dénaturations, nécroses, coagulation, ébullitions, et coupures, etc... Il est nocif pour les yeux, car il brûle la rétine, les protections sont nécessaires.

VI. Le Pouvoir Rotatoire des Molécules Chirales (IMPORTANT)

1) Rappel :

Toute molécule ne comportant PAS de symétrie centrale (ou de symétrie axiale pour certaines molécules à structure spéciale), est dite chirale. C'est à dire, qui a la capacité de provoquer la rotation d'un rayon lumineux, autrement dit, de polariser.

Les énantiomères, sont les deux molécules de structures opposées. C'est à dire l'une et l'autre sont symétriques. Ils ont un pouvoir rotatoire identique, mais deux sens de rotation différents.

Si l'on a un mélange de deux molécules énantiomères en quantités égales, les deux pouvoirs rotatoires opposés s'annulent, et ne provoquent pas de polarisation. Le mélange est dit **racémique**.

2) Le pouvoir rotatoire :

Il ne fonctionne qu'avec de la lumière polarisée. Son effet est différent sur un rayon, suivant la concentration, et la longueur de substance traversée, entre l'entrée et la sortie du rayon polarisé. Il est différent aussi, si pour une même concentration et même distance traversées dans la substance, il y a variation de la longueur d'onde du rayon polarisé.

C'est pour cela que dans les expériences, et mesures, on travaille avec une longueur d'onde précise.

La polarisation est traduite alors par la **loi de Biot**, pour une longueur d'onde donnée:

La concentration est directement proportionnelle au pouvoir rotatoire de la solution.

Exemple, si on double la concentration, on obtient le double de pouvoir rotatoire.

La longueur de substance traversée est aussi proportionnelle au pouvoir rotatoire.

Exemple, si je réduis de moitié la longueur, je réduis de moitié le pouvoir rotatoire.

Cette loi permet d'étudier suivant les données de départ, la concentration (comme la loi de Beer-Lambert), ou ratio d'un énantiomère par rapport à un autre dans un mélange. Ou le pouvoir rotatoire, si l'on a une substance pure, et homogène.

Pour deux énantiomères :

- Leurs PR sont opposés.
- Ils ont la même DO.

Mélange racémique :

- PR nul.

Ces lois sont très importantes et font l'objet de nombreux QCM, en résumé sur la loi de Biot ce qu'il faut retenir :

- les molécules chirales ont un pouvoir rotatoire.
- les molécules achirales et les mélanges racémique ont un pouvoir rotatoire nul.
- le pouvoir rotatoire d'une molécule chirale est l'exact opposé de son énantiomère.

QCM (14 QCM)

QCM 1 : À propos du cours d'optique :

- A. La nature de la lumière peut être élucidée, grâce aux instruments découverts, au cours du 16^{ème} siècle.
- B. Si un faisceau de lumière blanche pénètre dans un prisme et permet de réaliser un spectre complet, alors on peut dire de ce prisme qu'il est dispersif.
- C. Une onde monochromatique ne contient qu'une seule fréquence, qu'une seule longueur d'onde, et qu'une seule période.
- D. La limite inférieure du spectre du visible laisse place au domaine de l'infrarouge.
- E. L'intensité lumineuse est exprimée en lumen par stéradian (lm.sr^{-1}) ou bien en lux (lx).

QCM 2 : À propos du cours d'optique :

- A. Même si un patient est admis pour une intoxication au monoxyde de carbone (CO), l'oxymétrie de pouls aura une mesure fiable à 100%.
 - B. Les phénomènes de perte d'énergie dans les fibres optiques mettent en jeu le phénomène de réflexion totale.
 - C. Un œil hypermétrope a un foyer au delà de la rétine, à cause d'une convergence trop faible.
- Une diapositive placée à 50 cm à gauche d'une lentille de 2 dioptries :**
- D. Aura une image virtuelle rejetée à l'infini.
 - E. Aura une image réelle à + 50cm.

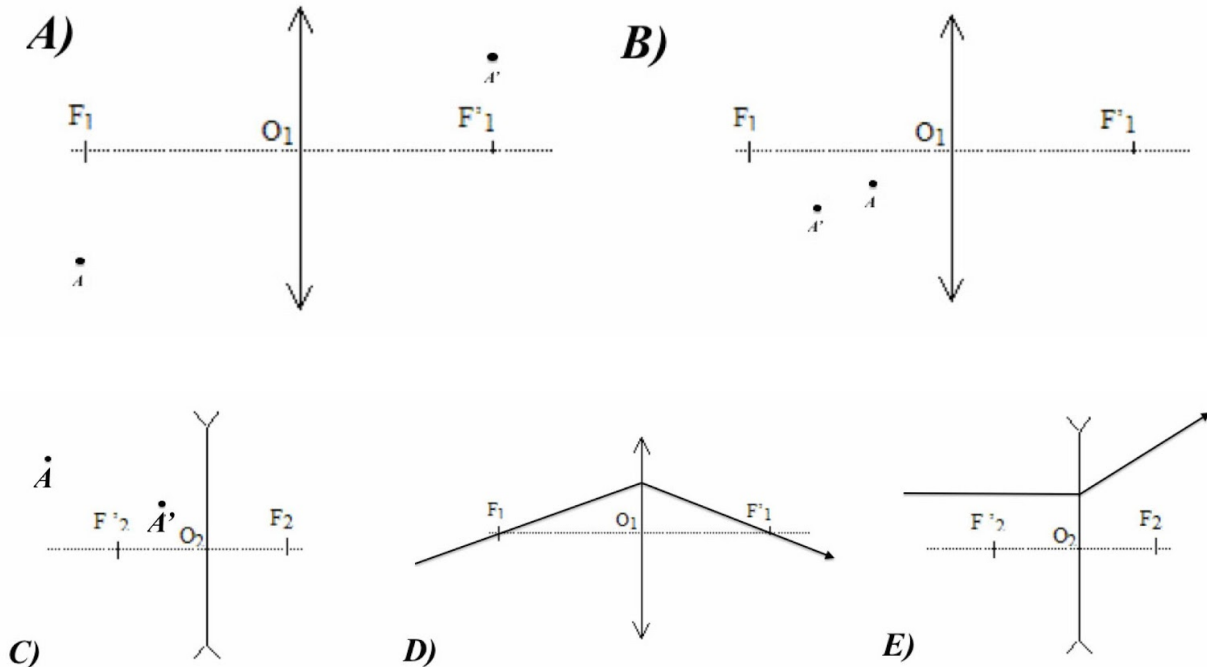
CM 3 : Des chercheurs souhaitent connaître la concentration de 2 molécules A et B dans une solution X. Dans des conditions expérimentales qui permettent de ne tenir compte que de la densité optique, les chercheurs disposent de deux solutions étalons à 1 mmol.L^{-1} de A et de B dont les densités optiques ont été mesurées à 450 et 570 nm. Compte tenu des données :

	Solution A, 1 mmol.L^{-1}	Solution B, 1 mmol.L^{-1}	Solution X à doser
D.O. à 450 nm	0.9	0.3	6.6
D.O. à 570 nm	0.1	0.4	2,2

- A. Les solutés A et B sont énantiomères.
- B. Dans la solution X, le soluté A a une concentration de 6 mmol.L^{-1} .
- C. Dans la solution X, le soluté B a une concentration un tiers de fois inférieure à celle de A.
- D. Mesurée à 450 nm, une solution X' contenant 2 mmol.L^{-1} de A et 2 mmol.L^{-1} de B aura une densité optique égale à 2,6.
- E. D'après la D.O. à 450 nm et à 570 nm on peut en déduire la D.O. à 510 nm en faisant une moyenne.

QCM 4 : Constructions géométriques : On considère le trajet de rayons lumineux à travers la lentille mince convergente ou divergente de centre « O », de foyer objet « F » et de foyer image « F' ». Pour les items A, B, et C : Indiquez les constructions où le point A' est l'image du point A au travers de la lentille mince.

Pour les items D et E : Indiquez les constructions où le trajet du rayon correspond à celui d'un passage au travers d'une lentille mince convergente ou divergente.



QCM 5 : Questions de cours:

- A. Barberousse (1474 - 1518) le corsaire, utilisait sa longue-vue sur son navire, lorsqu'il sillonnait la Méditerranée.
- B. La notion de dualité onde-corpuscule de la lumière apparaît à la fin du XIXème siècle et au début du XXème.
- C. Une onde appartenant au domaine de l'ultraviolet a une fréquence plus basse qu'une onde appartenant au domaine de l'infrarouge.
- D. Un milieu est dit homogène s'il est semblable à lui-même dans toutes les directions.
- E. Un milieu est dit transparent si les ondes lumineuses s'y propagent sans perte d'énergie.

QCM 6 : À propos des corps noirs, de la fibre optique et de l'oxymétrie de pouls :

- A. Un corps noir est isotrope pour toute fréquence.
- B. L'émittance d'un corps noir est proportionnelle au cube de sa température.
- C. Dans une fibre optique, l'indice du cœur est plus élevé que celui de la gaine.
- D. L'oxymétrie de pouls repose sur l'absorption différentielle des longueurs d'ondes par l'oxyhémoglobine et l'hémoglobine.
- E. L'oxyhémoglobine absorbe plus la lumière que l'hémoglobine réduite à 940nm (dans l'infrarouge).

QCM 7 : À propos de la photométrie :

- A. Les ondes radios ont une longueur d'onde supérieure aux micro-ondes.
- B. Les bornes moyennes de la lumière visibles ont "380 - 780 nm".
- C. Le soleil au zénith produit un éclairage de 10 000 lux.
- D. La luminance peut être exprimée en lux/sr, en cd/m ou encore en Nit.
- E. La loi de Lambert pour un corps orthotrope indique que: $Luminance = \pi \times Emittance$.

QCM 8: Problème de Photométrie: Étienne regarde l'ampoule à incandescence sphérique au plafond de sa chambre, d'une puissance 60W. Elle illumine la chambre avec un rayonnement de même intensité (80 cd) dans toutes les directions de l'espace. On considère que $4\pi \approx 12,5$.

- A. Cette source lumineuse peut être considérée comme isotrope.
- B. L'intensité lumineuse correspond à un flux lumineux par unité de surface. Son unité est le candela (Cd).
- C. Le flux lumineux de cette ampoule est de 1000 lm environ.
- D. Le flux lumineux de cette ampoule est de 555 lm.
- E. L'efficacité lumineuse de l'ampoule est comprise entre 2 et 3%.

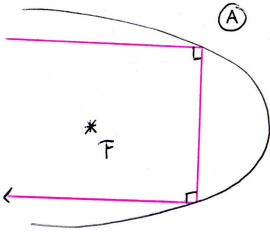
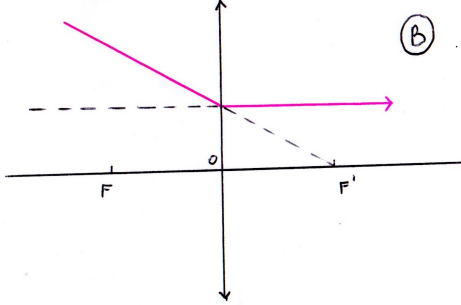
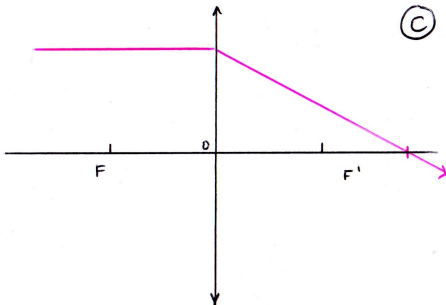
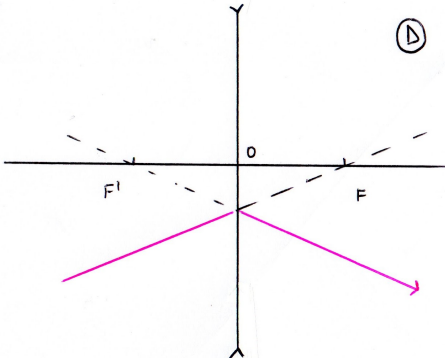
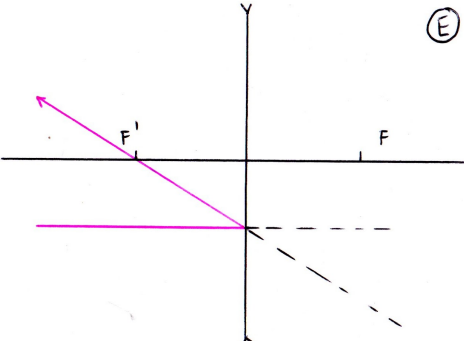
QCM 9: Problème de photométrie: Pour faire un dispositif de luminothérapie peu consommateur en énergie, on se propose d'utiliser un miroir elliptique, on place une source lumineuse ponctuelle sur un foyer et un écran dépoli blanc en forme de calotte sphérique (sphère de 2cm de rayon) sur l'autre. L'écran dépoli laisse passer 25% de la lumière et la diffuse sur un mode orthotrope. L'écran fait 4cm² et la pupille se trouve au centre de la sphère. Le miroir elliptique intercepte un angle solide de 1sr vu de la source. On reproduit le dispositif pour l'autre œil. L'écran se trouvant au zénith de la pupille, l'angle d'incidence des rayons lumineux reste proche de 0°. On cherche à obtenir un éclairage de 10 000 lux sur la pupille grâce au miroir. Pour les calculs on considère que $4\pi = 12,5$.

- A. L'angle solide occupé par l'écran vu de la pupille est de 1sr.
- B. La luminance nécessaire au niveau de l'écran est donc de 10 000 cd/m².
- C. L'éclairage nécessaire au niveau de l'écran est donc de 62500 lux.
- D. Le flux nécessaire au niveau de l'écran est donc de 25 lm.
- E. L'intensité nécessaire de la source est donc de 50 cd.

QCM 10: Problème de polarimétrie: dans des conditions expérimentales qui permettent de ne pas se préoccuper de la densité optique du solvant et de la densité optique du récipient, on veut doser les constituants d'une solution S contenant uniquement deux molécules A et B. Les mesures de la densité optique et du pouvoir rotatoire (PR) des solutions étalons de A et de B et de la solution S à doser à 300 nm sont comme suit : - DO de 2 mmol/L de A = 0,8 et PR de 2 mmol/L de A = + 4°. - DO de 2 mmol/L de B = 0,8 et PR de 2 mmol/L de B = - 4°. - DO de S = 2,8 et PR de S = + 6° :

- A. La molécule A possède un centre de symétrie.
- B. Les molécules A et B peuvent être énantiomères.
- C. La concentration d'A dans la solution S est de 10 mmol/L.
- D. La concentration de B dans la solution S est de 2 mmol/L.
- E. Par observation du PR de S, on peut déduire que la concentration en B est supérieure à la concentration en A

QCM 11: À propos des tracés optiques :

 A. En considérant qu'il s'agit d'un paraboloïde de révolution, le trajet est correct.	 B. Ce trajet est correct.
 C. Ce trajet est correct.	 D. Ce trajet est correct.
 E. Ce trajet est correct.	

QCM 12 : Problème d'optique géométrique : Un enfant est diagnostiqué avec un problème de vision. On veut utiliser des lentilles de contact pour corriger son défaut visuel. On estime que la vergence de la lentille de contact s'ajoute directement à celle de l'oeil. Le punctum proximum de l'enfant est à 10cm en avant du centre optique et le punctum remotum à 25cm. Le but de la correction est de permettre à l'enfant de voir net à l'infini sans accommoder :

- A. L'enfant est myope.
- B. Le pouvoir d'accommodation est de 6 D, donc supérieur à la norme.
- C. La lentille utilisée est divergente.
- D. La vergence de la lentille est de - 4 D.
- E. Avec la lentille, le punctum proximum corrigé est à environ 17 cm devant l'axe optique.

QCM 13 : À propos de l'oeil et des défauts visuels:

- A. Un sujet hypermétrope converge trop ou a un oeil trop court.
- B. Un sujet myope a son foyer image en arrière de la rétine.
- C. La presbytie correspond à une diminution du pouvoir d'accommodation, souvent liée à l'âge.
- D. L'astigmatisme provoque une image étalée et non ponctuelle (sur la rétine ou non), le sujet voit flou quelle que soit la distance.
- E. Le daltonisme est lié à la déficience partielle ou totale d'un ou plusieurs types de bâtonnets.

QCM 14 : À propos de l'oeil, du L. A.S. E.R et des microscopes: Le terme “même ordre de grandeur” signifie entre 10 fois plus et 10 fois moins.

- A. Le laser est une source monochromatique.
- B. La luminescence correspond à un mécanisme de désexcitation avec émission de photons. On connaît deux types seulement: la photoluminescence et la radioluminescence.
- C. Le LASER repose sur le principe d'opposition de population: l'état fondamental est numériquement inférieur à l'état excité.
- D. Un LASER, contrairement à un amplificateur optique, comprend une cavité optique.
- E. La résolution maximale d'un microscope optique est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des photons visibles.

CORRECTION DES QCM

1: BC	2: CD	3: BCE	4: BC
5: BE	6: CDE	7: AB	8: ACE
9: ABE	10: BD	11: TOUT FAUX	12: ABCDE
13: CD	14: ADE		

QCM 1 : BC

- A. Au 19^{ème} siècle !
- D. Laisse place au domaine de l'ultra-violet !
- E. L'intensité lumineuse s'exprime en candela, c'est le flux lumineux qui est en lux.

QCM 2 : CD

- A. Cela entraîne des perturbations dans la mesure.
- B. La réflexion entraîne le transport du rayon, l'absorption quant à elle retient de l'énergie à chaque contact faisceau-fibre optique.
- E. Un objet placé sur le point focal objet d'une lentille aura toujours son image rejetée à l'infini ! À contrario un objet venant de l'infini aura son image sur le point focal image de la lentille.

QCM 3 : BC

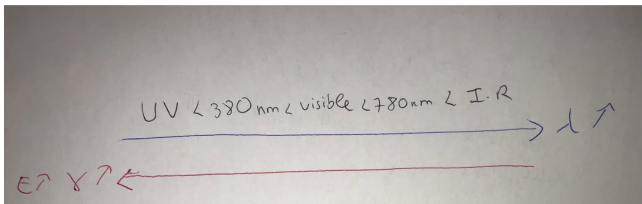
- A. Non car si les deux molécules étaient énantiomères elles auraient les mêmes densités optiques.
- B. et C. (VRAI) Avec la méthode du système on trouve $A = 6 \text{ mmol.L}^{-1}$ et $B = 4 \text{ mmol.l}^{-1}$
- D. On connaît les densité optiques et les concentrations, il ne reste plus qu'à calculer :
$$2 \times 0,9 + 2 \times 0,3 = 2,4$$
- E. On ne peut pas déduire une D.O. à partir d'autres D.O. il faut les mesurer.

QCM 4 : BCE

- A. Une image sur le point focal objet d'une lentille mince convergente est rejetée à l'infini.
- D. Faux, ceci est impossible, la rayon passant par F revient parallèle à l'axe optique.

QCM 5 : BE

- A. Faux, la longue vue apparaît seulement en 1600.
- C. Une onde appartenant au domaine de l'UV a une longueur d'onde plus petite qu'une onde appartenant au domaine de l'IR mais sa fréquence est effectivement plus grande car $\lambda = c/\nu$: la fréquence et la longueur d'onde évoluent en sens contraire.



- D. Faux, c'est la définition d'un milieu isotrope. Un milieu est homogène si le paramètre physique est le même en tout point.

QCM 6 : CDE

- A. Faux, il est orthotrope à toutes les fréquences.
- B. Faux, c'est à l'exposant 4.

QCM 7 : AB

- B. Vrai, mais attention aux unités pour ce type de question!
- C. Faux, c'est 100 000 lux (à savoir).
- D. Faux, c'est en cd/m^2 . Les autres propositions sont justes.
- E. Faux, $E=\pi \cdot L$ (attention dans les exercices de photométrie).

QCM 8 : ACE

- B. Faux, l'intensité lumineuse correspond à un flux lumineux par unité d'angle solide. Son unité est effectivement le candela ou le lm/sr . Le lm/m^2 proposé dans l'énoncé correspond aux lux, l'unité de l'éclairement (ou émittance).
- C. Vrai : dans le cadre d'une source isotrope on a : $F=I \cdot \text{angle solide} \Leftrightarrow F=80 \cdot 4\pi = 1005 \text{ lm}$. Ici l'ampoule est sphérique donc l'angle solide est de 4π .
- D. Faux, voir C.
- E. Vrai, l'efficacité lumineuse (E_f) se calcule ainsi :

$$E_f = \frac{F}{683 \cdot \text{puissance}} = \frac{1005}{683 \cdot 60} = 0.0245$$

QCM 9 : ABE

- A. Vrai: Tout d'abord, $4 \text{ cm}^2 = 0,0004 \text{ m}^2$. Et Angle solide = surface / rayon² = $0,0004 / 0,02^2 = 0,0004 / 0,0004 = 1 \text{ sr}$. La pupille étant au centre de la sphère, l'écran occupe bien 1sr vu de la pupille.
- B. Vrai il occupe 1 sr donc Luminance = E(désirée au niveau de la pupille) / Angle = $10\,000 / 1 = 10\,000 \text{ cd/m}^2$. Cette formule vient de $E=L \cdot \omega$, utilisable uniquement quand la source est au zénith.
- C. Faux, Émittance = π Luminance = $10\,000 \pi$. L'écran laisse passer 1/4 de la lumière donc son émittance = 1/4 éclairement. Donc éclairement = $4 \times \pi \times 10\,000 \text{ lux} = 125\,000 \text{ lux}$.
- D. Faux, flux = éclairement * Surface = $125\,000 \cdot 0.0004 = 50 \text{ lm}$.
- E. Vrai, le miroir intercepte 1sr du flux de la lampe. Comme $F=I \cdot \text{angle solide} (\omega)$, $I=F/\omega=50 \text{ cd}$

QCM 10 : BD

A. Faux, car elle aurait alors un pouvoir rotatoire (PR) nul.

C. Tout d'abord, on convertit les valeurs des DO et des PR pour des concentrations de 1 mmol/L (attention à bien lire les unités). Ainsi DO A = 0,4 et DO B = 0,4 / PR A = +2 et PR B = -2.

Ensuite on résout le système suivant : (soit a la concentration de A en mmol/L et b la concentration de B en mmol/L)

$$\Leftrightarrow a \times 0,4 + b \times 0,4 = 2,8$$

$$\Leftrightarrow a \times 2 - b \times 2 = +6. \text{ Donc } b = (a \times 2 - 6) / 2 = a - 3.$$

$$\text{Donc } a \times 0,4 + (a - 3) \times 0,4 = 2,8 \text{ donc } 0,4 a + 0,4 a - 1,2 = 2,8$$

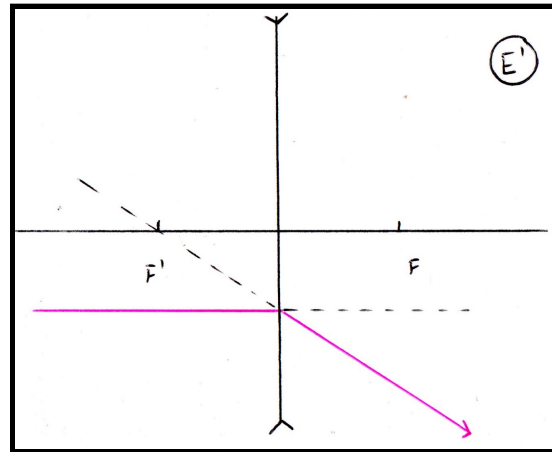
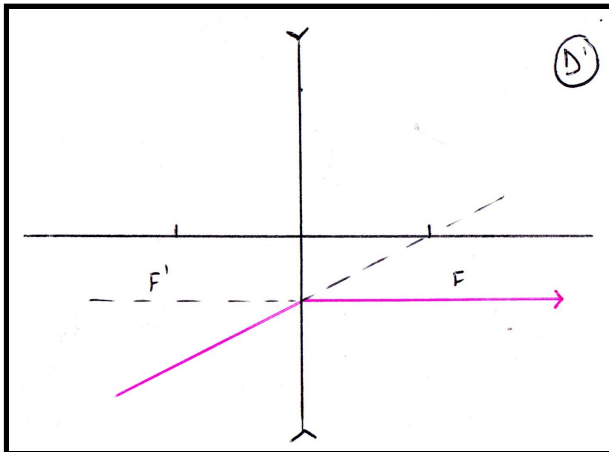
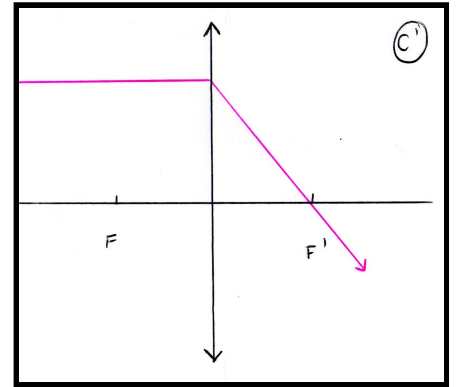
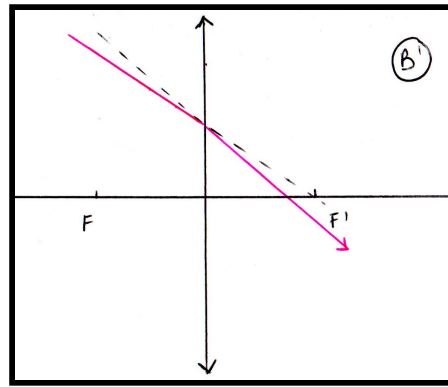
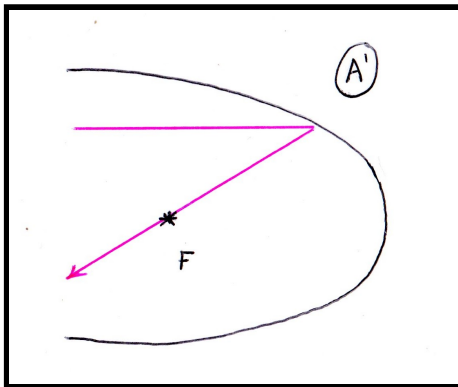
$$\text{Donc } 0,8 a = 4 \text{ Donc } a = 5 \text{ mmol/L.}$$

D. Même raisonnement que pour la A. En prenant a = 5 mmol/L.

$$5 \times 2 - b \times 2 = 6 \text{ Donc } b = (6 - 10) / (-2) = 2 \text{ mmol/L.}$$

E. C'est l'inverse. Le PR de S est positif, or le PR de A est positif et le PR de B est négatif. Donc il y a forcément une plus grande concentration de A par rapport à B.

QCM 11 : TOUT FAUX



A. Faux, il ne s'agit pas d'un coin de cube! Un rayon incident parallèle est renvoyé vers le foyer dans le cas d'une paraboloïde de révolution.

B. Faux, un rayon incident dont le prolongement coupe F' ne possède pas de règle précise. Il s'agit d'une lentille convergente, le rayon sortant est donc dévié vers le centre.

C. Faux, un rayon incident parallèle est dévié vers F'.

D. Faux, un rayon incident dont le prolongement coupe F est dévié parallèlement à l'axe horizontal.

E. Faux, il s'agit d'une lentille, pas d'un miroir, le rayon est dévié, pas réfléchi. Un rayon incident parallèle est dévié en un rayon dont le prolongement coupe F'.

QCM 12 : ABCDE

A. Vrai, voici la formule de TD de 2015 que j'utilise. Il y a d'autres méthodes. $PR \text{ (en m)} = -1 / (\text{vergence PR} - 60)$. Le PR est donc à 0,25 en avant du centre optique, donc $PR = -0,25 \text{ m}$. Donc $-0,25 = -1 / (\text{vergence PR} - 60)$. Donc $\text{vergence PR} = -1 / -0,25 + 60 = 64 \text{ D}$. $64 \text{ D} > 60 \text{ D}$ l'oeil au repos converge trop, donc le sujet est myope.

B. Vrai, voici la seconde formule de TD de 2015 que j'utilise également. $PP \text{ (en m)} = -1 / (\text{vergence PP} - 60)$. Il faut savoir que la vergence du PP correspond à la vergence maximale de l'oeil après accommodation. Le punctum proximum est situé à 10 cm en avant de l'axe optique donc $PP = -0,10 \text{ m}$. Donc $-0,10 = -1 / (\text{vergence PP} - 60)$ donc $\text{vergence PP} = -1 / -0,1 + 60 = 70 \text{ D}$. Enfin : Pouvoir d'accommodation = Vergence PP - Vergence PR = $70 - 64 = 6 \text{ D}$. La norme est de 4D. Le pouvoir d'accommodation est donc bien supérieur à la norme.

C. On corrige la myopie avec des lentilles divergentes qui ont toujours une vergence négative.

D. Vrai, le but de la correction est de permettre à l'enfant de voir net à l'infini sans accommoder, c'est-à-dire que le PR soit à l'infini, ce qui équivaut à ce que la vergence au repos soit de 60 D. La vergence au repos calculée avant correction est de 64 D. $60 - 64 = -4 \text{ D}$. Il faut donc diminuer la vergence de l'oeil de 4 D, la lentille a donc une vergence de -4 D.

E. Avec la lentille, la vergence maximale (du PP) = $70 - 4 = 66 \text{ D}$. En reprenant la formule : $PP \text{ (en m)} = -1 / (\text{vergence PP} - 60)$ On a $PP \text{ (en m)} = -1 / (66 - 60) = -1/6 = -0,17 \text{ m}$. Donc le PP passe bien à 17 cm devant l'axe optique.

QCM 13 : CD

A. Faux, il converge trop peu ou a un oeil trop court.

B. Faux, il converge trop donc son foyer image est en avant de la rétine. C'est l'inverse pour l'hypermétrope.

D. Vrai, un problème du centre optique ne permet plus la concentration des faisceaux en un point, la convergence est "étalée". Le sujet peut voir par exemple des lignes droites déformées.

E. Déficience des cônes et non des bâtonnets.

QCM 14 : ADE

B. La première phrase est vraie. Cependant, il existe d'autres types de luminescence: bioluminescence, chimiluminescence, photoluminescence.

C. Inversion et non opposition.

MAGNÉTOSTATIQUE ET RMN

FICHE DE COURS

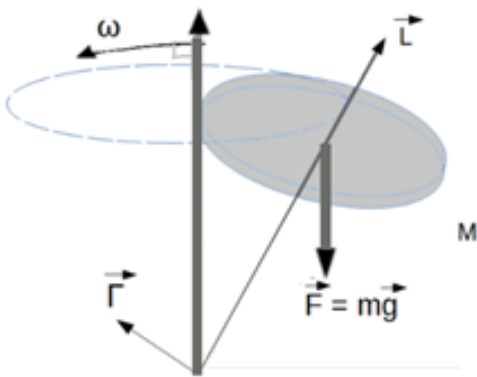
La RMN repose sur la perturbation des moments magnétique de certains noyaux lorsqu'ils sont placé dans un champs magnétique statique (CMS).

I- La notion de moment

Petit rappel : un **moment** existe dès lors qu'un objet est en mouvement. Ce chapitre s'intéresse surtout aux mouvements de précession (rotation autour d'un axe en décrivant un cône). Il est représenté par un vecteur (virtuel) représentant l'axe et le sens de rotation (l'objet tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour du vecteur).

Il existe 3 sortes de mouvements en mécanique, appliqués à un objet mis en rotation :

- **Le moment d'une force $\vec{\Gamma}$** : Capacité à mettre un objet non déformable en rotation autour d'un pivot (point fixe). Il est perpendiculaire à la direction de la force.
→ c'est la force appliquée pour faire tourner l'objet.
- **Le moment d'inertie M** : s'oppose au changement de vitesse de rotation (vitesse angulaire).
- **Le moment angulaire ou moment cinétique (ou moment de la quantité de mouvement) $\vec{L}$** : dirigé selon l'axe de rotation → c'est ce qui qualifie "l'élan de rotation" de l'objet.



Si un objet présente un moment angulaire **non nul**, l'action d'une force génère une variation du moment angulaire **perpendiculaire à la direction de la force**.

Donc sous l'action d'une force, le moment angulaire **précesse** autour d'un axe dirigé dans la direction de la force.

→ donc attention **c'est le moment angulaire qui est animé d'un mouvement de précession**.

Dans l'exemple de la toupie, le moment $\vec{L}$ va tourner horizontalement autour de la direction du champ de pesanteur $\vec{F}$, vertical.

$\vec{L}$ décrit donc un mouvement de rotation horizontal à vitesse constante : la **vitesse angulaire de précession ω** , proportionnelle à la valeur du champ de force g appliqué :

$$\omega = k \cdot g \text{ (en rd.s}^{-1}\text{)}.$$

Avec ω la vitesse (angulaire) de précession, g la valeur du champ de force appliqué (peut-être l'attraction terrestre pour une toupie, ou un champ magnétique pour un noyau atomique) et k une constante qui ne dépend que du système en rotation (toupie par exemple).

En résumé : l'action d'une force met l'objet en mouvement perpendiculairement à la force et au vecteur moment angulaire $\vec{L}$.

Astuces

- Pour les qcms, il est important de savoir reconnaître et analyser les formules du formulaire (donné au concours), par exemple:

$\vec{\Gamma} = \frac{d\vec{L}}{dt}$ → ici on peut dire que : Le vecteur moment de force est égal à la dérivée par rapport au temps (ou la variation) du vecteur du moment angulaire. (et tac un item !)

- Attention aux pièges dans les items : force $\neq$ moment de force
- Il est important de connaître les orientations des forces les unes par rapports aux autres (perpendiculaires ou parallèles entre elles).

II- Les sources de champ magnétique statique (CMS)

=> un champ magnétique est un champ capable d'orienter l'aiguille d'une boussole

- **Oersted** (1819) : met en évidence l'influence d'un champ électrique sur l'orientation d'une boussole (qui s'oriente perpendiculairement à la direction du courant ; attention aux pièges !)
- **Biot et Savart** (1820) : établissent la relation donnant la valeur du champ magnétique (exprimé en Tesla : T) produit par un fil conducteur traversé par un courant, en fonction de la distance.

(retenir d'après la formule que le champ magnétique est proportionnel à l'intensité I et inversement proportionnel à la distance au carré d^2).

Une spire est un conducteur fermé en forme de boucle, plusieurs spires forment une bobine.

Lorsque qu'un courant circule, il produit un champ magnétique **perpendiculairement** au plan de la spire de valeur :

- champ magnétique créé au centre d'une spire de courant : $B_{\text{spire}} = (\mu_0/2r) * I$
- champ magnétique créé au centre d'une bobine (plusieurs spires) : $B_{\text{bobine}} = N * (\mu_0/2r) * I$

avec μ_0 la constante magnétique du vide, r le rayon, I l'intensité et N le nombre de tours de spire

- **Les bobines de Helmholtz** (espacées d'une distance égale à leur **rayon** !\)) permettent d'obtenir des champs uniformes entre deux bobines, et en inversant le sens d'une bobine on peut obtenir un gradient continu de champ magnétique (donc dans ce cas un champ non uniforme).

- **Les bobines résistives (pour l'IRM)** sont limitées en puissance à cause de l'effet Joule (énergie gaspillée sous forme thermique proportionnellement à la puissance du champ magnétique) : champ maximal = 0,5T.

- **Les bobines à supraconducteur** ne souffrent pas de la résistivité (elles utilisent des métaux supraconducteurs qui perdent leur résistivité quand ils sont refroidis) mais nécessitent une température très basse pour leur fonctionnement : champs magnétiques intenses de 1,5 à 3T habituellement.

- Il est important de retenir que les champs magnétiques intenses n'ont **pas d'effets indésirables sur le corps humain** ; néanmoins, ils **peuvent attirer des objets ferromagnétiques** et doivent donc être utilisés avec la plus grande précaution (*donc dire qu'ils n'ont pas d'effets est faux*).

III- Les interactions avec un champ magnétique statique (CMS)

- Si une **particule chargée en mouvement** interagit avec un CMS, cette particule suit alors un mouvement circulaire dans le vide (centripète) car elle est soumise à la **force de Lorentz** :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

avec F force de Lorentz avec B le champ appliqué.

- Si une **boucle (ou spire) de courant** interagit avec un CMS, la boucle s'oriente de telle manière à ce que son moment magnétique soit orienté parallèlement au champ magnétique. Donc selon la **force de Laplace**, la boucle tend donc à s'orienter perpendiculairement au champ magnétique.

Moments magnétiques :

*d'une boucle de courant : placée dans un CMS noté B , la boucle de courant subit un moment

de force tel que avec μ le moment magnétique de la spire. $\vec{\Gamma} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$
Si la spire est libre de tourner elle va s'aligner dans la direction du champ.

*d'une particule chargée :

- **moment magnétique orbital** $\vec{\mu}_{orb} = \gamma \vec{L}$ avec γ = rapport gyromagnétique (donc on voit que le moment magnétique est proportionnel au moment angulaire)
- **moment magnétique intrinsèque ou de spin** $\vec{\mu}_{spin} = g_L \gamma \vec{S}$ avec g_L = facteur de Landé ($g_L = -2$ pour l'électron)
- **moment magnétique total d'une particule** $\vec{\mu} = \vec{\mu}_{orb} + \vec{\mu}_{spin} = \gamma \vec{J}$ avec J le moment angulaire total

Placé dans un champ magnétique B_0 , le moment magnétique entre en précession autour de la direction du champ B_0 . Dans un mouvement de précession, la vitesse angulaire de précession est **constante et proportionnelle au champ magnétique B_0** :

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

! Si le moment magnétique d'une particule interagit avec un CMS, le moment magnétique de la particule décrit un mouvement de précession à la fréquence de Larmor :

$$\nu = (\gamma / 2\pi) \cdot B$$

Avec ν (ν = lettre grecque) la fréquence de Larmor (en Hz), γ le rapport gyromagnétique de la particule (caractéristique), et B la valeur du CMS.

Formule sous cette forme dans le formulaire $\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right) B_0$ est importante à savoir utiliser en qcms.

IV- La Résonance Magnétique Nucléaire

La RMN apparaît lorsque certain noyau, préalablement placé dans un CMS intense, sont exposé à un champ magnétique variable.

1) Les noyaux concernés par le phénomène de RMN

Seuls sont concernés par la RMN les atomes dont le noyau est de **spin non nul**, c'est-à-dire ceux qui possèdent des **nucléons non appariés** (autrement la somme des moments magnétiques s'annule et devient égale à zéro). L'hydrogène est le noyau à spin non nul le plus représenté dans le corps humain. 3 règles à savoir pour un noyau possédant A nucléons (respectivement Z protons et N neutrons):

- Si A est impair : le spin est demi-entier.
- Si A est pair et Z ou N impair : le spin est entier.
- Si A est pair et Z et N pairs : le spin est nul.

→ Considérant un noyau de spin I : **il possède (2I+1) moments magnétiques possibles.**

Dans le cas où le spin est de $\frac{1}{2}$, il y a donc $2 \cdot \frac{1}{2} + 1 = 2$ états possibles caractérisés par leur **nombre quantique magnétique de spin mI** = $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$,
Chaque mI fait correspondre une orientation principale du moment magnétique μ .

2) L'action d'un CMS B_0

Des noyaux de spin non nul placés dans un CMS B_0 **précessent à la fréquence de Larmor** selon un **double cône de précession** dont l'axe est dirigé selon B_0 .

- il y a un double cône de précession car il existe 2 états possibles pour les noyaux (effet Zeeman) :

Pour $I = \frac{1}{2}$ on peut avoir $+\frac{1}{2}$ et $-\frac{1}{2}$, donc 2 orientations principales possibles :

- des noyaux μ dits "parallèles", orientés dans le sens de B_0 (mais /\ pas réellement parallèles).
- des noyaux μ dits "antiparallèles" orientés dans le sens inverse de B_0 (mais toujours pas parallèles).

La somme vectorielle de tous les moments magnétiques des noyaux concernés par ce phénomène n'est pas nulle (car il existe plus d'états de spin parallèles qu'antiparallèles : distribution de Boltzmann), et génère une **aimantation macroscopique résultante M_0** parallèle à l'axe de B_0 .

/!\ Attention **TRES IMPORTANT**:

- **M_0 ne précesse pas !** Une aimantation macroscopique résultante n'est pas un moment mais la somme des moments magnétiques de tous les noyaux présents à un même instant. Elle n'existe que en prenant les noyaux globalement et elle ne précesse pas (contrairement au moment magnétique qui ne concerne qu'un unique noyau)

- L'aimantation macroscopique résultante M_0 est proportionnelle au nombre de noyaux considérés, au rapport gyromagnétique de ces noyaux, et au champ magnétique B_0 .

$$M_0 \propto N \cdot \Delta E \propto N \cdot \gamma \cdot B_0 \quad (\text{Formule présente sur le formulaire, } \propto = \text{proportionnel})$$

→ **La RMN consiste à appliquer un CMS pour ensuite analyser les caractéristiques de M_0 .**
Par conséquent, plus M_0 est grande, plus elle sera facile à analyser et meilleure sera la précision.

3) La mise en résonance, application d'une onde RadioFréquence

Pour analyser l'aimantation résultante M_0 , on la perturbe en la mettant en résonance avec une onde électromagnétique (OEM).

- Pour obtenir une résonance entre l'OEM et M_0 , il faut que la fréquence de l'OEM soit égale à la **fréquence de Larmor**, dont l'ordre de grandeur correspond aux ondes radiofréquences (non ionisant).
- En appliquant une onde RF **perpendiculairement à B_0** on perturbe notablement l'aimantation résultante M (M va basculer vers la direction de l'OEM).

L'effet de l'onde RF sur le corps humain se traduit uniquement en terme de chaleur → normes de DAS pour éviter un trop fort apport thermique lors d'un IRM (4W/kg pendant 30 15 minutes, avec une élévation de température $< 1^\circ\text{C}$).

4) Représentation du champ B_1

Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique E (négligé en RMN) et d'un champ magnétique B , sinusoïdale, perpendiculaire et de même direction. B_1 est appliqué perpendiculairement à B_0 (le CMS, représenté selon l'axe z du repère).

Selon le repère choisi, il existe trois manières de représenter le vecteur B_1 de l'OEM :

- Vecteur à un instant donné, représenté comme une sinusoïdale parallèle à y et permet ainsi de visualiser la longueur d'onde.
- Dans la représentation champ tournant tout se passe comme si le champ B_1 était un champ magnétique tournant perpendiculairement à B_0 et permet une visualisation de la vitesse angulaire ω .
- Selon un repère tournant autour de l'axe z , le champ B_1 apparaît fixe dirigé selon y .

Pas très important en qcm, juste savoir qu'il existe plusieurs représentations possibles.

Avant application de l'OEM, M est dirigé dans le sens de B_0 .

En appliquant l'onde RF pendant une durée Δt , l'aimantation résultante M bascule d'un **angle φ** dont la valeur **en radians** est donnée par : **$\varphi = \gamma \cdot \Delta t \cdot B_1$**

*avec B_1 la composante magnétique de l'onde RF
 γ le rapport gyromagnétique et
 Δt le temps d'application de l'OEM*

En pratique, on fait varier le temps d'application Δt de l'OEM pour modifier φ .

Astuces : Pour faire les qcms, les 2 formules présentes sur le formulaire qui permettent de retrouver celle ci-dessus (très pratique pour certains calculs) sont celles-ci :

$$\omega_1 = \gamma \cdot B_1 \quad \text{et} \quad \varphi (\text{rad}) = \omega_1 \cdot \Delta t$$

5) La bascule de l'aimantation, la relaxation, l'IRM

* L'action de B_1 provoque la **résonance** = bascule de l'aimantation.

* L'arrêt de B_1 provoque la **relaxation** = retour à l'équilibre

L'IRM consiste en une étude du **retour à l'équilibre de l'aimantation résultante après résonance** : la **relaxation**.

- On définit t_0 comme l'instant où l'impulsion RF cesse.
- M est donc dirigé selon un angle φ par rapport à B_0 .

- On décompose M en deux composantes :

* **une composante longitudinale M_z** : parallèle à B_0 .

* **une composante transversale M_x** : perpendiculaire à B_0

- **Lorsque $M=M_0$** (équilibre initial), M_x est nulle et $M_z=M_0$

- On mesure le temps que met M à revenir à son orientation de départ M_0 (la relaxation).

On mesure deux temps de relaxation :

- **T_1 : temps de relaxation longitudinale** → selon l'axe Z (dans la direction de B_0), donc correspond à la variation de M_z . On assiste à la « repousse » de M_z .

- à t_0 $M_z(t_0) = M_0 \cdot \cos \varphi$

- pour une impulsion de 90° $M_{z,\varphi=90^\circ}(t) = M_0 \left(1 - \exp^{-t/T_1}\right)$

- pour une impulsion d'angle quelconque $M_z(t) = M_0(1 - (1 - \cos \varphi) \cdot \exp^{-t/T_1})$

- **T_2 : temps de relaxation transversale** → selon l'axe X (perpendiculaire à B_0), donc correspond à la variation de M_x . Ici, on assiste à la diminution de M_x .

- à t_0 $M_x(t_0) = M_0 \cdot \sin \varphi$

- pour une impulsion de 90° $M_{x',\varphi=90^\circ}(t) = M_0 \cdot \exp(-t/T_2)$

- pour une impulsion d'angle quelconque $M_{x'}(t) = M_0 \cdot \sin \varphi \cdot \exp(-t/T_2)$

/!\ Attention T_1 et T_2 ne correspondent pas au temps complet de la relaxation ! Pour une impulsion de 90° , à t_0 :

$M_z = 0$. Pendant la relaxation, M_z retourne à sa valeur maximale. On mesure T_1 comme la moitié du temps nécessaire à un retour à l'équilibre (Càd $M_z=M_0$).

$M_x = M_0$. Pendant la relaxation, M_x retourne à 0. On mesure T_2 comme la moitié du temps nécessaire à un retour à l'équilibre (Càd $M_x=M_0$).

Remarques :

- Après une impulsion de 90° , lorsque $t=T_2$, $M_x=0,37M_0$.
- Après une impulsion de 90° , lorsque $t=T_1$, $M_z=0,63M_0$.

Contrastes en IRM

L'IRM consiste à visualiser le contraste d'aimantation magnétique des noyaux d'hydrogènes entre différents points du corps.

L'image obtenue reflète 3 paramètres physique qui varient en fonction des tissus : la densité en protons, T_1 , et T_2 . Plus l'aimantation sera importante et plus l'image sera claire.

- **T_1** correspond à l'environnement tissulaire, physique, macroscopique.
→ Il donne un contraste anatomique, **plus T_1 est court, plus le tissu apparaît clair**.
→ T_1 est obtenu à partir d'un signal **croissant**.
- **T_2** correspond à l'environnement moléculaire, chimique, microscopique.
→ Il donne un contraste inversé, **plus T_2 est long, plus le tissu apparaît clair**.
→ T_2 est obtenu à partir d'un signal **décroissant**.

*Pour l'eau $T_1 = T_2$ mais pour tous les autres tissus $T_1 \gg T_2$

*Pour deux tissus A et B, si $T_{1A} > T_{1B}$ alors $T_{2A} > T_{2B}$.

*Si $T_{1A} > T_{1B}$ alors en T_1 le tissu A apparaîtra plus foncé que B (la repousse de Mz est plus lente pour A). Mais comme $T_{2A} > T_{2B}$, alors en T_2 , le tissu A apparaîtra plus clair que le tissu B (la décroissance de Mx' est plus lente pour A).

- Concernant la **densité en protons**, plus les tissus sont clairs, plus la concentration en eau est importante.

V- La Spectroscopie RMN

Le **déplacement chimique** δ est la différence de résonance entre un composé à caractériser et une molécule de référence, le TMS (tétraméthylsilane, $(CH_3)_4Si$).

→ Le TMS possède des protons avec une **constante d'écran σ particulièrement élevée**, c'est-à-dire que la molécule est tellement compacte et riche en électrons que les électrons des protons se gênent : on dit que le **blindage de la molécule est important** (au contraire un proton seul a un blindage faible).

→ Sur un spectre, le déplacement chimique est représenté vers la gauche, le TMS apparaît donc à droite.

→ Le déplacement chimique dépend de la **densité électronique autour du noyau** étudié et de sa **position dans la molécule** mais **ne dépend pas du champ magnétique appliqué B_0 ! (il dépend du champ magnétique induit)**.

→ Le spectre se lit en analysant les protons par groupe composé de tous les protons ayant le même environnement électronique (C-H4 ne possède qu'un groupe de 4 protons)

→ Le **couplage spin-spin** est issu de l'interaction d'un groupe de protons avec un groupe voisin. Il est responsable du fait que des pics peuvent être multiples (**multiplets**) sur un spectre RMN (règle du $(n+1)$ -uplet : si le groupe voisin est composé de n protons le groupe principal sera représenté par $n+1$ pics).

/!\ Attention il n'y a pas d'interaction entre noyaux équivalents !

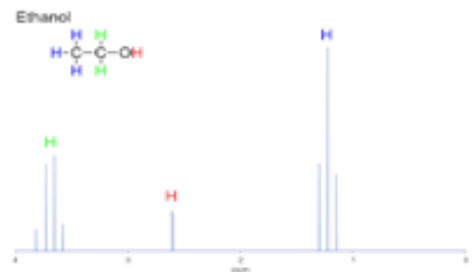
Pour les qcms, retenir que :

- la position des pics dépend du CM induit, mais pas du CM appliqué
- la multiplicité des pics est due aux interactions entre protons voisins
- la surface sous les pics est proportionnelle à la concentration en protons

(Conseil : si tu as gardé tes cours de Terminale S, tu peux t'en servir pour t'entraîner à résoudre les QCM de type : « ce spectre est a priori compatible avec... » car le poly de la fac est peu bavard à ce sujet et contient très peu de ce type de QCM...).

Exemple analyse d'un spectre de molécule : éthanol.

- On applique la règle du “ $n+1$ -uplet” pour trouver les groupements : ça donnera 4 pics donc un H3, 3 pics donc un H2 et 1 pic donc un OH (car le H ne se couple car il est isolé par l'O).
- On utilise la densité de proton pour retrouver la structure de la molécule : le triplet est le plus dense, il s'agit donc du CH_3 . Ensuite le quadruplet est moyennement dense, il s'agit donc d'un CH_2 . Même raisonnement pour le OH.
- Vérification de la cohérence : on vérifie que nos conclusions sont cohérentes avec la molécule recherchée avant de répondre.



FORMULAIRE RMN :

toujours donné au concours

Conseil : au fur et à mesure du cours en amphi, noter à quoi correspondent les formules, et savoir comment les utiliser en qcms (*que ce soit pour des questions “de cours”, qui est proportionnel à qui, ou pour des calculs qu’il faut savoir faire*).

- Calcul de la fréquence de résonance : $\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right) B_0 \rightarrow$ formule donnée
- Soit : Calcul de la vitesse angulaire : $\omega_0 = \gamma B_0$ puis calcul de la fréquence : $\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$
- Soit : $\nu_0 = \gamma/2\pi * B_0$

Calcul de la durée d'application d'une impulsion : $\rightarrow \phi = \omega_1 t = \gamma B_1 t$ d'où $t = \frac{\phi}{\gamma B_1}$ (ϕ en Radians)

Calcul des temps de relaxation T_1 et T_2 :

Il est TRÈS important de savoir manipuler ces formules car elles constituent la majeure partie des questions calculatoires.

Étude de contraste :

$T_2 \ll T_1$ dans les tissus humains

Si $T_{1A} < T_{1B}$ et $T_{2A} < T_{2B}$

DONC : En pondération $T_1 \rightarrow$ A plus clair que B
 En pondération $T_2 \rightarrow$ B plus clair que A

Derniers conseils :

- ne pas se laisser impressionner par des items à l'apparence compliquée, pour certains items vous aurez la réponse sous les yeux (énoncé ou formulaire), il faut juste connaître à quel symbole ou lettre correspondent les termes employés en cours (par exemple L pour moment angulaire), ça permet de repérer rapidement sur le formulaire à quoi on fait référence.
- pour une population de noyaux d'hydrogène, pour calculer la fréquence de Larmor plus rapidement, retenir que $\gamma/2\pi = 42,6 * 10$
- **La RMN est un des chapitres les plus durs de physique mais les QCM sont paradoxalement assez simples et se ressemblent d'une année sur l'autre. Il faut donc s'entraîner (QCM + TD + annales) et il devient alors facile d'avoir une bonne notes là où beaucoup vont négliger ce chapitre.**

QCM (22 QCM)

QCM 1: Dans le cadre d'une imagerie IRM, une impulsion radiofréquence de 60° est appliquée à un tissu X ayant les caractéristiques suivantes : $T1 = 500\text{ms}$, $T2 = 50\text{ms}$.

- A. $T1$ est appelé temps de relaxation transversale.
- B. A $t = 0$ après l'impulsion, la composante transversale de l'aimantation résultante est égale à 87% de la valeur de l'aimantation transversale à l'équilibre.
- C. A $t = 500\text{ms}$ après l'impulsion, la composante transversale environ égale à 81% de l'aimantation transversale d'équilibre.
- D. A $t = 500\text{ms}$ après l'impulsion, la composante longitudinale environ égale à 81% de l'aimantation longitudinale d'équilibre.
- E. En imagerie $T2$, un tissu Y ayant un $T2=70\text{ ms}$ apparaîtra plus clair que le tissu X.

QCM 2 : Soit une population de protons soumis à un champ magnétique statique de 4T. Une impulsion de radiofréquence de champ magnétique égal à $3,14 \cdot 10^{-3}$ provoque une bascule de 60° de l'aimantation résultante.

- A. La fréquence de l'onde radiofréquence est environ égale à 170,38 MHz.
- B. La fréquence de Larmor est environ égale à 170,38 MHz.
- C. La mise en résonance nécessite que la fréquence de l'onde radiofréquence utilisée soit égale à la fréquence de Larmor.
- D. La durée de l'impulsion est environ égale à $3,7\mu\text{s}$.
- E. La durée de l'impulsion est environ égale à $1,246\mu\text{s}$.

QCM 3 : Sur des images IRM, on distingue 2 tissus A et B dont les temps de relaxation sont les suivants :

Tissu	$T1(\text{ms})$	$T2(\text{ms})$
A	800	200
B	400	70

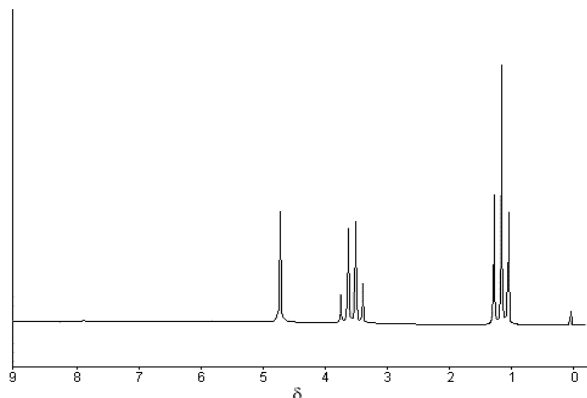
- A. En IRM pondérée en $T1$, le tissu B apparaît plus clair que le tissu A.
- B. En IRM pondérée en $T2$, le tissu B apparaît plus clair que le tissu A.
- C. A $t = 0$ après une impulsion de 30° , la composante longitudinale de l'aimantation du tissu A est égale à 87% de la valeur de l'aimantation résultante à l'équilibre.
- D. A $t = 1\text{s}$ après une impulsion de 30° , la composante longitudinale de l'aimantation du tissu A est environ égale à 30% de la valeur de l'aimantation résultante à l'équilibre.
- E. A $t = 1\text{s}$ après une impulsion de 30° , la composante longitudinale de l'aimantation du tissu A est environ égale à 96% de la valeur de l'aimantation résultante à l'équilibre.

QCM 4. A propos du cours :

- A. L'interaction d'un champ magnétique statique intense sur toute particule met en rotation la particule autour d'un axe parallèle au champ appliqué.
- B. Le mouvement de précession n'est observé qu'en présence d'un moment angulaire non nul.
- C. La résonance est produite au moyen d'une onde électromagnétique dont la fréquence est égale à la fréquence de précession de l'aimantation résultante, notée vecteur M_0 .
- D. L'aimantation résultante M_0 est proportionnelle au nombre de noyaux N de l'échantillon mais inversement proportionnelle au facteur gyromagnétique ce qui explique l'utilisation des noyaux d'hydrogène, possédant un rapport γ faible.
- E. Pour qu'il y ait résonance, la fréquence de l'onde électromagnétique doit être égale à la fréquence de Larmor.

QCM 5.

Leo, jeune PACES, se réveille après une bonne soirée de révisions et se prépare un café bien corsé. Ne sachant pas si il peut le boire de bon matin, il décide de l'analyser par spectroscopie RMN proton. D'après ses résultats et de ses connaissances, il peut affirmer que :



- A. La constante d'écran des protons du tétraméthylène (TMS) est particulièrement faible par rapport à celle de la plupart des protons des autres molécules.
- B. Le déplacement chimique sur l'axe des abscisses dépend de l'environnement électronique des protons.
- C. Un doublet signifie que l'atome de carbone en question a un CH₃ voisin.
- D. Le déplacement chimique est dépendant de la valeur du champ magnétique B₀.
- E. Le spectre est compatible avec l'éthanol.

QCM 6 (il s'agit en fait du qcm 29 de votre poly de la fac de RMN)

Une IRM proton à 1 tesla, avec une onde radiofréquence (RF) de champ magnétique

$B_1 = 3,14 \cdot 10^{-4}$ T, permet de visualiser 2 tissus, A et B, ayant respectivement des temps de relaxation transversale de 90 ms et 120 ms.

- A. Pour une durée d'impulsion RF de 12 μ s, l'angle de bascule est proche de 90 °.
- B. Pour une durée d'impulsion RF de 12 μ s, l'angle de bascule est proche de 60 °.
- C. 9ms après l'arrêt de l'impulsion, l'aimantation transversale décroît d'environ 9,5 %.
- D. 9ms après l'arrêt de l'impulsion, l'aimantation transversale décroît d'environ 19,5 %.
- E. En imagerie T2, le tissu 1 apparaît plus clair que le tissu B.

QCM 7 : A propos des champs magnétiques et de leurs moyens de production, quelles sont les propositions exactes ?

- A. Selon la loi de Biot et Savart, plus l'intensité du courant passant dans un fil de fer est élevée, plus le champ magnétique en résultant sera important et se rapprochera de la perpendicularité par rapport au fil.
- B. Selon la loi de Biot et Savart, l'intensité du champ magnétique généré en un point par un courant passant dans un fil de fer est inversement proportionnelle à la distance entre ce point et le fil.
- C. Soit une spire parcourue par un courant d'intensité et de sens définis. Une bobine formée de 7 spires identiques à la première et parcourues par le même courant développera un champ magnétique 7 fois supérieur au champ de la première spire.
- D. Lorsqu'une spire est parcourue par un courant électrique, le champ magnétique généré est proportionnel au rayon de la spire.
- E. Selon la technique des bobines de Helmholtz, lorsque l'on place deux bobines l'une en face de l'autre, séparées par une distance égale à leur diamètre et parcourues par un courant allant dans le même sens, on obtient un champ magnétique relativement uniforme.

QCM 8 : A propos des champs magnétiques et de leurs moyens de production, quelles sont les propositions exactes ?

- A. Selon la technique des bobines de Helmholtz, lorsque l'on place deux bobines l'une en face de l'autre, séparées par une distance égale à leur rayon et parcourues par deux courants de sens opposé, on obtient un gradient de champ magnétique relativement uniforme.
- B. Le problème des bobines IRM résistives est la perte non négligeable d'énergie sous forme thermique entraînée par le passage du courant électrique.
- C. Les champs magnétiques statiques de faible intensité n'occasionnent pas d'effet indésirable sur le corps humain, contrairement aux champs intenses dont l'utilisation doit être limitée et contrôlée.
- D. Les « supraconducteurs » sont des matériaux ayant la particularité d'être naturellement très peu résistifs et sont donc particulièrement utiles en IRM par exemple.
- E. L'utilisation des supraconducteurs présente l'avantage de n'occasionner que peu ou pas d'effet Joule.

QCM 10 : Sur des images IRM, on distingue deux tissus A et B dont les temps de relaxation sont données sur le tableau ci-contre :

Tissu	T1 (ms)	T2 (ms)
A	810	100
B	420	45

- A. En IRM pondérée T1, le tissu A apparaît plus foncé que le tissu B.
- B. En IRM pondérée T2, le tissu B apparaît plus foncé que le tissu A.
- C. 0,2 s après une impulsion de 50° , la composante transversale de l'aimantation du tissu A vaut environ 10,7% de l'aimantation résultante d'équilibre.
- D. 0,135 s après une impulsion de 70° , la composante transversale de l'aimantation du tissu B vaut environ 4,7% de l'aimantation résultante d'équilibre.
- E. Le paramètre T1 est obtenu à partir d'un signal croissant.

QCM 11 : Concernant les généralités de la RMN :

- A. Le champ magnétique terrestre est du même ordre de grandeur que le champ magnétique des appareils utilisés en IRM.
- B. Le spin du ^{14}N est de $\frac{1}{2}$.
- C. La fréquence de Larmor est proportionnelle à B_0 et inversement proportionnelle au rapport gyromagnétique.
- D. Lors de l'application d'un champ magnétique statique sur une population de protons, il apparaît une aimantation macroscopique résultante M_0 , représentée par un vecteur qui précesse autour de l'axe du champ B_0 .
- E. Toute particule animée d'une vitesse placée dans un champ magnétique développe une force de Lorentz.

QCM 12 : Concernant la spectroscopie RMN :

- A. La spectroscopie RMN permet l'analyse chimique d'un échantillon en mesurant précisément la fréquence de résonance d'un type de noyau.
- B. Les atomes du tétraméthylsilane (TMS) sont très faiblement blindés, ce qui fait de cette molécule une bonne valeur de référence en spectroscopie RMN.
- C. Dans un échantillon soumis à un champ magnétique statique, la fréquence de résonance d'un noyau donné varie légèrement selon son environnement électronique.
- D. Le déplacement chimique est inversement proportionnel à la valeur du champ appliqué B_0 .
- E. Le couplage spin-spin correspond à une interaction entre des noyaux d'un même groupe chimique d'une molécule.

QCM 13 : Michèle, une petite PACES primante, encore arrivée trop à l'avance pour son TD de RMN de peur de se perdre une fois encore passe le temps en pensant au moment de force qui serait généré en ouvrant la porte de la salle, en la tirant :

- A. Le moment de force exprime la capacité d'une force à faire tourner un objet déformable autour d'un point fixe (pivot).
- B. Le moment de force appliqué pour ouvrir la porte est représenté par un vecteur vertical.
- C. Le moment de force appliqué pour ouvrir la porte est représenté par un vecteur horizontal.
- D. Si la poignée était plus proche de l'axe pivot de la porte, à force appliquée identique, le moment de force généré serait plus important.
- E. Si les vecteurs sont perpendiculaires, le moment de force est nul.

QCM 14 : A propos du mouvement de précession d'une toupie :

- A. Lors d'un mouvement de précession, le vecteur dérivé du moment angulaire est perpendiculaire au vecteur de la force de gravité.
- B. Le vecteur du moment angulaire est parallèle au vecteur de la force de gravité.
- C. La vitesse angulaire de précession est proportionnelle à la valeur (ou norme) du champ de la force gravitationnelle.
- D. La vitesse de précession est proportionnelle à la norme du moment angulaire.
- E. La toupie est soumise à deux moments orthogonaux : le moment angulaire et le moment de la force de gravité.

QCM 15 : A propos du mouvement de précession comme celui d'une toupie sans frottement :

- A. Le moment angulaire est également appelé moment cinétique.
- B. La direction du vecteur déplacement est parallèle au champ de force.
- C. La vitesse angulaire de précession est inversement proportionnelle à la valeur du champ de force.
- D. Le mouvement de précession ne peut s'observer qu'en présence d'un moment angulaire non nul (le disque tourne sur lui-même en rotation rapide).
- E. Le mouvement de précession est un mouvement de rotation autour de l'axe de la toupie.

QCM 16 : Dans un mouvement de précession comme dans celui d'une toupie sans forces de frottements, on peut dire concernant les vecteurs :

- A. La norme du vecteur moment de force est constante.
- B. Le vecteur moment de force est perpendiculaire à la direction du moment angulaire.
- C. Le vecteur moment de force est perpendiculaire à la direction du champ de force appliqué.
- D. Le moment angulaire est parallèle à l'axe de la toupie.
- E. Le vecteur de moment angulaire est nul pour une vitesse de précession parfaitement constante.

QCM 17 : Concernant le phénomène de RMN :

- A. Il repose sur la perturbation des moments magnétiques de certains noyaux atomiques préalablement placés dans un champ magnétique statique.
- B. Concerne seulement les noyaux de nombre de masse impair.
- C. Est basé sur la mise en précession des moments magnétiques d'atomes, soumis à un champ magnétique statique, s'orientant selon une forme de double cône, pour les noyaux de spin $S=1/2$.
- D. Les premiers appareils d'IRM avaient une efficacité limitée du fait de l'effet joule, ce qui nous obligeait à consommer beaucoup plus d'énergie pour leur fonctionnement.
- E. Ne produit pas d'effets indésirables connus à ce jour, hormis un léger refroidissement de la température corporelle après un examen.

QCM 18 : Concernant la résonance magnétique nucléaire :

- A. Les noyaux concernés sont ceux ayant un spin I non nul.
- B. Sont concernés les noyaux ayant tous les nucléons appariés.
- C. Pour un spin $I = 1/2$, il existe 2 états possibles.
- D. Sous l'action de B_0 , les noyaux précessent, selon un double cône, à la fréquence de Larmor.
- E. L'aimantation résultante M_0 précesse autour de B_0 .

QCM 20 – Un tissu subit une impulsion RF de 50° .

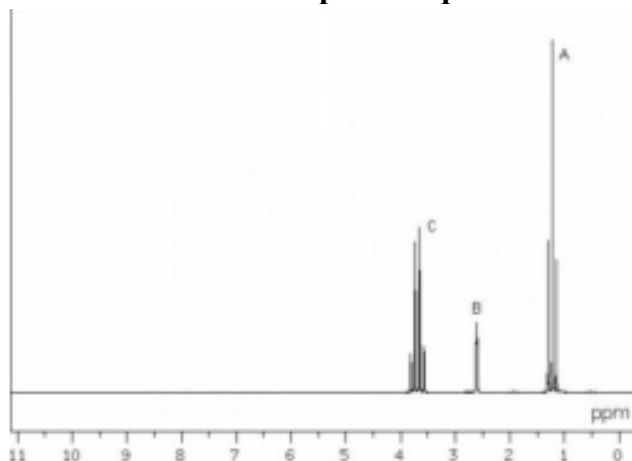
- A. $M_x' \approx 0,5 M_0$ immédiatement après l'impulsion RF.
- B. $M_z \approx 0,64 M_0$ immédiatement après l'impulsion RF.
- C. $T_1=1,5s$ si 150ms après l'impulsion RF, M_z vaut environ 0,676 M_0 .
- D. $T_1=1,5s$ si 150ms après l'impulsion RF, M_z vaut environ 0,579 M_0 .
- E. M_x' est environ égal à 5% de sa valeur initiale (à $t=0$ après l'impulsion), lorsque $t = 3 T_2$.

QCM 21 – Sur des images IRM, on distingue deux tissus A et B dont les temps de relaxation sont données sur le tableau ci-contre :

Tissu	T1 (ms)	T2 (ms)
A	400	100
B	500	145

- A. En IRM pondérée T_1 , le tissu A apparaît plus foncé que le tissu B.
- B. En IRM pondérée T_2 , le tissu B apparaît plus clair que le tissu A.
- C. 0,4 s après une impulsion de 90° , la composante longitudinale de l'aimantation du tissu A vaut environ 1,8% de l'aimantation résultante d'équilibre.
- D. 0,4 s après une impulsion de 90° , la composante longitudinale de l'aimantation du tissu A vaut environ 63% de l'aimantation résultante d'équilibre.
- E. Le paramètre T_2 est obtenu à partir d'un signal croissant.

QCM 22 – A propos de la spectrométrie par RMN, on considère le spectre suivant. La seule information dont on dispose est que la molécule étudiée est un alcool.



- A. Le δ en ppm est un nombre sans dimension.
- B. La multiplicité des pics est due aux interactions entre électrons voisins.
- C. La surface sous les pics est proportionnelle à la concentration en protons.
- D. Le pic en A peut correspondre à des protons liés à un carbone, lui même couplé à un CH₂ dans la molécule.
- E. Le singulet en B correspond à l'hydrogène de la fonction alcool de la molécule.

CORRECTION DES QCM

QCM 1: BDE

A. T1= longitudinal

B. (VRAI) $M_x(t=0) = M_0 \sin \varphi = M_0 \sin 60^\circ = M_0 * 0,87$

C. Calculer avec la formule $M_x(t) = M_0 * e^{-(t/T2)}$

D. (VRAI) cette fois !

composante longitudinale : $M_z(t) = M_0 * (1 - (1 - \cos 60^\circ) * e^{-t/T1})$
 $= M_0 * (1 - 0,5 * e^{-1}) = M_0 * (1 - 0,185) = M_0 * 0,81$

E. (VRAI) Plus T2 est grand, plus c'est clair.

QCM 2 : ABCE

A. VRAI : la fréquence de l'onde RF est celle de Larmor :

$$\nu_0 = \gamma / 2\pi * B_0$$

→ B0 est de 4T

→ on peut ensuite calculer $\gamma / 2\pi$ avec $\gamma = 26,75 * 10^7$ (formulaire) mais on peut aussi utiliser l'astuce $\gamma / 2\pi = 42,6 * 10^6$ puisqu'il s'agit ici de protons ! c'est plus rapide mais attention ça ne marche que si l'énoncé parle de protons !! (ou de noyaux d'hydrogène, c'est pareil)

$$\rightarrow \nu_0 = \gamma / 2\pi * B_0 = 42,6 * 10^6 * 4 = 170,38 * 10^6 \text{ Hz} = \mathbf{170,38 \text{ MHz}}$$

B et C. VRAI : Pour obtenir une résonance : la fréquence de Larmor est toujours égale à la fréquence de l'ORF.

D et E. $\Delta t = \varphi(\text{rad}) / (\gamma B_1) = (\Pi/3) / (26,75 * 10^7 * 3,14 * 10^{-3}) = 1,246 * 10^{-6} \text{ s} = \mathbf{1,246 \mu s}$

→ dans ce cas là il faut à chaque fois convertir l'angle en radian (180° étant Π , 90° étant $\Pi/2$...)

(ici 60° devient $\Pi/3$, ça permet de simplifier avec la valeur de $B_1 = 3,14 * 10^{-3} = \Pi * 10^{-3}$).

QCM 3 : ACE

B. +T2 est grand, + c'est clair.

C. VRAI : $M_z(t=0) = M_0 \cos \varphi = M_0 \cos 30^\circ = \mathbf{M_0 * 0,87}$

D. $M_z(t=1\text{s}) = M_0 * (1 - (1 - \cos(30)) * e^{-(1/0,8)}) = M_0 * (1 - (1 - 0,87) * e^{(-1,2)}) = \mathbf{0,961}$

QCM 4. BE

A. Faux, uniquement sur les particules chargées avec $v \neq 0$, sinon elles sont parallèles au champ.

C. Faux ! M_0 est statique ! Il ne précesse pas !

D. M_0 est proportionnel au rapport gyromagnétique γ . De plus le noyau d'hydrogène possède le plus gros rapport γ , d'où son utilisation.

QCM 5. BE

A. Faux, à droite la constante d'écran σ du TMS est élevé.

C. Faux, des protons ayant n voisins possèdent un signal à (n+1) pics.

D. Faux, il est indépendant.

E. VRAI, la formule semi développée de l'éthanol est CH3-CH2-OH.

Le groupe de protons équivalents de CH3 - possède n = 2 protons voisins équivalents - CH2 -

. Par couplage le signal associé sera un triplet (n + 1 = 2 + 1 = 3).

Le groupe de protons équivalents de - CH2 - possède n = 3 protons voisins équivalents - CH3 -

. Par couplage le signal associé sera un quadruplet (n + 1 = 3 + 1 = 4).

Le proton du groupe - OH n'a pas de proton voisin. Le signal associé est donc un singulet.

QCM 6 : BC

A et B : $B_0 = 1 \text{ Tesla}$
 $B_1 = 3,14 \cdot 10^{-4}$

$$\begin{aligned}\varphi (\text{rad}) &= B_1 * \gamma * \Delta t = 3,14 \cdot 10^{-4} * 26,75 \cdot 10^7 * 12 \cdot 10^{-6} \\ &= 3,14 * 26,75 * 12 * 10^{-3} \\ &= 3,14 * 321 * 10^{-3} \\ &= 3,14 * 0,3 = \pi * 0,3\end{aligned}$$

or $\rightarrow \pi$ correspond à 180°
 $\pi * 0,3$ vaut $180^\circ * 0,3$ vaut **60°**

C et D :

- On calcule l'aimantation transversale à $t = 0$:
 $M_x(t_0) = M_0 * \sin(\varphi) = M_0 * \sin(60) = \mathbf{0,87 M_0}$

- à 9 ms: l'aimantation transversale vaut :
 $M_x(9\text{ms}) = M_0 * \sin(\varphi) * e^{-(t/T_2)} = M_x(t_0) * e^{-(t/T_2)}$

Dans l'énoncé on nous demande la décroissance de l'aimantation, on s'intéresse donc à la différence entre le moment t_0 et le moment $t = 9\text{ms}$. On ne va donc s'intéresser qu'à $e^{-(t/T_2)}$

$$\begin{aligned}e^{-(t/T_2)} &= e^{((-9 * 10^{-3}) / (90 * 10^{-3}))} \\ &= e^{(-0,1)} \\ &= 0,905 = 90,5 \%\end{aligned}$$

Rapide calcul $100 \% - 90,5 \% = 9,5\%$

E. Faux c'est l'inverse T_2 de B $>$ T_2 de A donc le tissu B apparaît plus clair que le tissu A.

QCM 7 : C

- A. Faux, l'importance du champ croît effectivement avec l'intensité du courant mais il est toujours perpendiculaire au fil, sa direction ne change pas.
- B. Inversement proportionnelle **au carré** de la distance
- C. Vrai, le champ d'une bobine de n spires vaut $n * \text{champ d'une spire}$ (à condition que les spires et le courant les parcourant soient identiques).
- D. Faux, inversement proportionnel à $2r$.
- E. Faux, les bobines doivent être espacées d'une distance égale à leur **rayon**.

QCM 8 : BE

- A. Faux, on obtient un gradient de champ, donc non uniforme puisque le champ varie selon le point considéré.
- B. Vrai, c'est l'effet Joule. C'est pour cela que l'on limite l'intensité des champs produits par ces bobines.
- C. Faux, les champs intenses ne produisent a priori aucun effet indésirable sur le corps humain.
- D. Faux, la supraconductivité n'est pas un état naturel mais une propriété induite par des températures très basses.
- E. Vrai, une faible résistivité permet de limiter les pertes énergétiques sous forme de chaleur.

QCM 10 : ABCDE

$$\begin{aligned}C. M_x(t = 0,2 \text{ s}) &= M_0 * \sin(\varphi) * e^{-t/T_2} = M_0 * \sin(50) * e^{-0,2/0,1} \\ &= M_0 * 0,77 * e^{-2} = M_0 * 0,77 * 0,14 = \mathbf{0,1078}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D. M_x(t = 0,135 \text{ s}) &= M_0 * \sin(\varphi) * e^{-t/T_2} = M_0 * \sin(70) * e^{-0,135/0,045} \\ &= M_0 * 0,94 * e^{-3} = M_0 * 0,94 * 0,05 = \mathbf{0,047}\end{aligned}$$

QCM 11 : Tout faux

- A. Terrestrre : de l'ordre de 10^{-5} T. Pour les appareils : de l'ordre du tesla.
- B. Il est de 1. (les noyaux ayant un A pair et un Z impair ont un spin entier).
- C. Proportionnelle à B_0 et au rapport gyromagnétique $\rightarrow \mathbf{v}_0 = \gamma/2\pi * \mathbf{B}_0$
- D. Chaque proton précesse individuellement, mais il y a une compensation entre les précessions de tous les protons et l'aimantation résultante **Mo ne précesse donc pas !** (piège récurrent).
- E. La particule doit être chargée puisque $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$.

QCM 12 : C

- A. Il est très difficile d'avoir une mesure absolue des fréquences de résonance, **on mesure plutôt le déplacement chimique**, qui correspond à l'écart relatif entre les fréquences de résonance du composé et celle d'une molécule de référence, le tétraméthylsilane (TMS).
- B. Ils sont très fortement blindés !
- D. Le déplacement chimique est indépendant de B_0 .
- E. **Il n'y a pas de couplage spin-spin entre noyaux équivalents !** Le couplage spin-spin ne se fait qu'entre des noyaux appartenant à des groupes chimiques voisins différents.

QCM 13 : B

- A. Objet non déformable.
- B. $\mathbf{r}$ et $\mathbf{F}$ définissent un plan horizontal. Donc le moment de force est vertical. De plus, en utilisant la règle des trois doigts de la main droite, on peut déduire le sens des vecteurs. Avec $\mathbf{r}$ représenté par la pouce, $\mathbf{F}$ par l'index, le moment de force est dans le sens du majeur.
- C. Voir B.
- D. On sait que le moment de force $\|\mathbf{\Gamma}\| = \|\mathbf{r}\| \times \|\mathbf{F}\| \times |\sin(\mathbf{r}, \mathbf{F})|$. Si on se rapproche du pivot, c'est à dire que $\|\mathbf{r}\|$ diminue, on aura un moment de force moins ample.
- E. D'après la formule vu au D, si $\mathbf{r}$ et $\mathbf{F}$ sont perpendiculaires, $\sin(\mathbf{r}, \mathbf{F})=1$ et le moment de force est maximal.

QCM 14 : ACE

- B. Tourne autour de la direction de la force de gravité.
- C. VRAI : $\omega = k \cdot g$
- D. Inversement proportionnelle.

QCM 15 : AD

- B. Perpendiculaire au champ de force.
- C. Elle est proportionnelle.
- E. Autour d'un axe dirigé dans la même direction que le champ de force appliqué (l'axe de la toupie est incliné par rapport à lui).

QCM 16 : ABCD

- A. VRAI, seule sa direction varie lors d'un mouvement de précession, la longueur du vecteur ou norme, lui, ne varie pas.
- D. VRAI, $\mathbf{L}$ sera toujours orienté dans la même direction que l'axe de la toupie.
- E. FAUX, Si le moment angulaire est nul, la toupie ne précesse pas et tombe attirée par la force de pesanteur.

QCM 17 – ACD

- A. VRAI, concrètement cela correspond à leur bascule, et donc à la bascule de l'aimantation macroscopique résultante M_0 le long de l'axe x' (car M_0 et la somme algébrique de tous les moments magnétiques).
- B. FAUX, il concerne tous les noyaux ayant un spin, soit un électron non apparié ou un proton non apparié ou un neutron non apparié. Exemple : le Carbone 12 : 6 protons 6 neutrons = tous appariés, 6 électrons appariés 2 par 2, du coup spin = 0. Carbone 13 : 6 protons et 7 neutrons = 1 neutron non apparié, spin = 1/2 Azote 14 : 7 neutrons, 7 protons, mais 2 électrons non appariés dans les orbitales (voir remplissage) = spin 1. → Ainsi, si A impair, spin=1 // si A pair mais Z ou N impair, spin=1/2 // si A, Z et N pairs, spin =0.
- C. VRAI, le spin est non nul, et ce sont bien les moments magnétiques (parallèles ou anti-parallèles) qui s'orientent selon la forme d'un double cône de précession).
- D. VRAI, on parle de bobines résistives, par opposition aux bobines supraconductrices d'aujourd'hui.
- E. FAUX, il produit un léger réchauffement, mais à peine perceptible si on respecte les conseils d'exécution des examens (mais sûrement pas de refroidissement dans tous les cas).

QCM 18 – ACD

- B. FAUX, Sont concernés les noyaux ayant au moins un nucléon non apparié (justement dans le cas de nucléons appariés, le spin est nul).
- C. VRAI, En effet, un spin I présente $2I + 1$ états magnétiques possibles ; l'un dans le sens de B_0 , l'autre dans le sens opposé de B_0 .
- E. FAUX, M_0 ne précesse pas, c'est le moment magnétique qui précesse. M_0 est dirigée dans l'axe de B_0 (attention à ne pas confondre M_0 et le moment magnétique des atomes. M_0 est la somme des moments magnétiques de chaque atome).

QCM 20 – BCE

- A. FAUX, $M_{x'} = M_0 \sin 50^\circ = 0,77 M_0$.
- B. VRAI, $M_z = M_0 \cos 50^\circ \approx 0,64 M_0$.
- C. VRAI, $M_z(t) = M_0 \times (1 - (1 - \cos 50^\circ) \times e^{-t/T_1}) \Leftrightarrow M_z(t) = M_0 \times (1 - (1 - \cos 50^\circ) \times e^{-150/1500}) = M_0 \times (1 - (1 - 0,64) \times e^{-0,1}) = M_0 \times (1 - 0,36 \times 0,9) = 0,676 \times M_0$. D. FAUX, cf C. E. VRAI, $M_{x'}(t) = M_0 \sin 50^\circ e^{-t/T_2}$. $t = 3 T_2$ donc $t/T_2 = 3$ Donc : $M_{x'}(t) = M_0 \sin 50^\circ e^{-3} = M_0 \times 0,77 \times 0,05$ soit 5% de $0,77 M_0$, qui est la valeur de $M_{x'}$ à $t=0$ après l'impulsion (cf item B).

QCM 21 – BD

- A. FAUX, En contraste anatomique (pondéré en T_1) un T_1 plus faible sera caractérisé par une image plus claire, A apparaîtra donc plus claire que B.
- B. VRAI, En contraste inversé (pondéré en T_2), un plus grand T_2 est caractérisé par une image plus claire, ici B sera donc plus clair que A.
- C. FAUX, La composante longitudinale correspond à M_z Comme on est à 90° on utilise la formule $M_{z, \varphi=90^\circ}(t) = M_0 (1 - e^{-t/T_1})$ Soit $M_z = M_0 (1 - e^{-400/400}) = 0,63 M_0$ Donc 63% de l'aimantation résultante à l'équilibre.
- D. VRAI, voir C.
- E. FAUX, T_2 est obtenu à partir d'un signal décroissant et T_1 à partir d'un signal croissant (pour s'aider, juste après l'impulsion, $M_{x'}$ caractéristique de T_2 , est maximale et il décroît jusqu'à atteindre 0, au repos).

QCM 22 – ACDE

B. FAUX, C'est dû aux interactions entre protons voisins.

C. VRAI, Définition du cours.

D. VRAI, Tout d'abord, on peut définir la molécule étudiée ici. On a 3 pics donc 3 atomes liés à des protons. On sait qu'il s'agit d'un alcool donc on a une fonction -OH en bout. Les deux autres pics sont un triplet et un quadruplet, correspondant respectivement aux interactions des protons d'un CH₃ avec un CH₂, et d'un CH₂ avec un CH₃. En fait, par exemple quand on parle de quadruplet, on sait que l'atome correspondant au pic en question est voisin d'un autre atome lié à 3 protons. Et pour le triplet, l'atome du pic est voisin d'un atome lié à 2 protons. On en conclut que la molécule étudiée pourrait être de type CH₃-CH₂-OH, soit de l'éthanol. Ne pas oublier la formule $n+1$ pour le nombre de pics ! n étant le nombre de protons VOISINS de l'atome (donc PAS LES SIENS !).

E. VRAI, Cf raisonnement de la D : comme le O de la fonction OH n'a pas de protons voisins (on ne compte pas le « sien »), la formule sera de $0+1=1$ donc un seul pic, les autres pic étant des multiplets, seul le pic B correspond au H de la fonction alcool.

ANNALES DU TUTORAT

Formulaires et valeurs à la fin.

QCM 1 : À propos de l'état physique de la matière et des changements d'état :

- A. L'état gazeux est caractérisé par l'absence de structure et les molécules y sont distribuées selon les lois du hasard.
- B. A l'état solide on n'observe que des mouvements de vibration.
- C. La liaison hydrogène est un cas particulier des forces de VAN DER WAALS.
- D. Le covolume est proportionnellement faible dans les états liquide et solide et devient prépondérant dans l'état gazeux.
- E. Le phénomène de la buée présent sur les vitres froides, ou la condensation, correspond au passage de l'état gazeux à l'état liquide.

QCM 2 : À propos des grandeurs et unités physiques :

- A. En optique on considère que l'infini est égal 10^3 fois la distance focale de l'œil.
- B. La force est une grandeur dérivée décomposée selon deux des trois grandeurs du système MLT, dites grandeurs fondamentales.
- C. A partir des combinaisons fondamentales, on peut dire qu'une force se définit par $[F] = [M] \times [L] \times [T]^{-2}$.
- D. Alors que le mètre cube est l'unité internationale du SI, il est aussi possible d'utiliser le litre comme unité de volume.
- E. Une mole est la quantité élémentaire identique à celle contenue dans 0,012g de carbone 12.

QCM 3 : Équations aux dimensions :

- A. Geoffrey est un super tuteur, il décide de prendre une attomole de tutorés perso. Sachant que $N_A = 6,022 \times 10^{23}$, il aura $6,022 \times 10^8$ tutorés (balèze).
- B. Un nombre sans dimension ne peut pas avoir d'unité.
- C. La vitesse comme l'accélération sont définies à partir du quotient de 2 grandeurs fondamentales.
- D. Sachant que l'interaction gravitationnelle est définie par $F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / d^2$, on peut en déduire que G s'exprime en $N \cdot kg^{-2} \cdot m^2$.
- E. L'unité du travail est le Joule (J). Ce dernier correspond à des $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$.

QCM 4 : À propos des gaz réels et des gaz parfaits : un gaz réel se rapproche d'autant plus d'un gaz parfait :

- A. Qu'il présente une forte pression et une faible masse atomique.
- B. Qu'il est à faible température.
- C. Le covolume b est le volume de l'ensemble des molécules de gaz. Il n'est jamais nul sauf dans le cas des gaz parfaits.
- D. A 0°C et sous une pression de 10 atm, 1 mmol de gaz parfait occupe un volume de 22,4 ml.
- E. A 0°C, 2 moles de gaz parfait dans un volume de 4 litres développent une pression de 11,2 atm.

QCM 5 : À propos de la relation entre 2 corps purs :

- A. Les gaz ne sont pas toujours miscibles entre eux.
- B. L'occupation par les gaz de la totalité du volume offert s'explique par l'existence des forces intermoléculaires répulsives.
- C. En présence d'une interface gaz/liquide, la pression gazeuse favorise l'apparition de molécules du liquide dans le volume occupé par le gaz.
- D. En présence d'une interface gaz/liquide, la température favorise l'apparition de molécules du liquide dans le volume occupé par le gaz.
- E. La fixation de molécules de gaz à la surface d'un solide compact est supérieure à la fixation de molécules de gaz à la surface d'un solide poreux.

QCM 6 : Soit un mélange gazeux d'O₂ ; N₂ ; CO₂ ; He à une pression totale de 760mmHg renfermant au total 50 moles : la fraction molaire d'O₂ est de 0,25 , la pression partielle d'N₂ est de 532mmHg, la masse d'He d'1g et sa masse molaire 2g/mol :

- A. La pression partielle d'O₂ est de 190mmHg.
- B. La fraction molaire d'N₂ est de 0,7.
- C. La pression partielle d'He est de 15,2mmHg.
- D. La fraction molaire de CO₂ est de 0,04.
- E. En considérant ces gaz réels comme parfaits on peut dire que le mélange, à 0°C occupe un volume de 1120 litres.

QCM 8 : À propos de l'Énergie :

- A. Le facteur de Lorentz s'écrit $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \times mc^2$
- B. On peut utiliser efficacement la mécanique classique pour des systèmes dont l'Ec est supérieure au dixième de la vitesse de la lumière.
- C. Un photon de $\lambda = 248 \text{ Å}$ a une énergie de 0,05 KeV. ($1\text{Å} = 0,1\text{nm}$)
- D. L'équivalent énergétique d'un électron lié est toujours supérieur à 0,511 MeV.
- E. Un rayonnement est dit ionisant si l'énergie transportée est supérieure à 13,6 eV, ce qui correspond à l'énergie nécessaire pour ioniser un atome d'hydrogène.

QCM 9 : À propos de l'énergie :

- A. Les éléments lourds produisent surtout des électrons Auger, contrairement aux éléments légers qui produisent surtout des photons X.
- B. Un électron peut passer d'un niveau énergétique E1 à un niveau énergétique E2 en absorbant une quantité d'énergie supérieure à la différence d'énergie entre E1 et E2.
- C. La rencontre d'un couple particule-antiparticule provoque une réaction d'annihilation qui libère une énergie totale égale à la somme des énergies potentielles des deux particules.
- D. L'énergie de liaison des électrons augmente approximativement proportionnellement au numéro atomique du noyau auquel ils sont liés.
- E. La désexcitation d'un atome suivant une ionisation peut produire des photons d'énergies précises. On observe un spectre de raies.

QCM 11 : À propos des gaz :

Soit un mélange gazeux [O₂, H₂ et CO₂] de pression totale 600 mm Hg, dans lequel la pression partielle d'H₂ vaut 360 mm Hg et dans lequel l'O₂ et le CO₂ sont présents en quantités égales :

- A. La fraction molaire de l'H₂ vaut 0,6.
- B. La fraction molaire de l'O₂ vaut 0,2.
- C. La pression partielle de l'O₂ vaut 180 mm Hg.
- D. La fraction molaire du CO₂ vaut 120 mmHg.
- E. Ce mélange contient trois fois plus d'H₂ que de CO₂.

QCM 12 : À propos des gaz :

Soit un mélange gazeux à 20% d'O₂ et à 80% d'N₂, à 0°C, dans un récipient de 22,4 Litres et à la pression totale de 10 atm. M[O₂]=32g/mol , M[N₂]=28g/mol

- A. La fraction molaire d'N₂ est de 8.
- B. Ce mélange contient 0,1 mole.
- C. La pression partielle d'O₂ est de 1520 mm Hg.
- D. La quantité d'N₂ est de 224g.
- E. Si on place ce mélange gazeux, dans des conditions semblables, dans un récipient de 224 Litres, la pression totale sera égale à 100 atm.

QCM 13 : À propos de la constitution du noyau :

- A. L'énergie de liaison totale du noyau est responsable de la cohésion de celui-ci.
- B. Des isotopes ont le même numéro atomique mais un nombre de masse différent.
- C. Le Carbone 12 et le Carbone 14 sont des isobares car ils présentent le même nombre de masse, tout comme les isomères qui ont en plus le même numéro atomique et ne diffèrent que par leur état énergétique.
- D. L'énergie de liaison moyenne par nucléon augmente lentement jusqu'au ^{56}Fe puis diminue rapidement pour les noyaux lourds.
- E. La masse du proton est environ 1836 fois plus importante que celle de l'électron qui est presque égale à celle du neutron. L'une des conséquences de ce phénomène est que la masse d'un atome est essentiellement concentrée au niveau du noyau.

QCM 14 : À propos des transformations non isobariques :

- A. Après son émission, la particule α est ralentie par de multiples collisions essentiellement de type électrostatique, puis capte obligatoirement 2 électrons pour constituer un atome d'hélium-4 stable.
- B. Le spectre de l'émission α est un spectre continu, à l'image de l'émission β .
- C. E_d se partage entre l'énergie cinétique du noyau père et l'énergie cinétique de la particule α .
- D. Les énergies cinétiques de la particule α et du noyau fils sont directement proportionnelles à leurs vitesses mais inversement proportionnelles à leurs masses.
- E. La fission nucléaire, spontanée ou provoquée par l'homme, libère notamment un certain nombre de neutrons. Ces derniers peuvent être utilisés en médecine, c'est la neutronthérapie.

QCM 15 : À propos des RX :

- A. Les RX de freinage correspondent à une accélération centrifuge des électrons incidents.
- B. L'anti-cathode ou anode correspond au canon à électrons dans le tube de Coolidge.
- C. L'intensité du courant électronique n'augmente pas constamment avec la valeur de la haute tension accélératrice.
- D. La haute tension accélératrice issue du transformateur survolteur alimente directement le tube de Coolidge.
- E. A la sortie du tube de Coolidge, on interpose des filtres métalliques sélectifs permettant d'atténuer la dégradation de la qualité de l'image radiographique.

QCM 16 : À propos de la radiographie.

Nous réalisons, sur le P2 Fabien Ribéry, une radiographie de son crâne suite à une chute violente lors de sa réconciliation avec le trottoir. Pour cela nous utilisons un appareil de radiographie du type « tube de Coolidge », que nous réglons pour ce type d'observation. La cible est faite en Tungstène ($Z=74$), les énergies de liaison de couches K, L et M sont respectivement de 69keV, 11keV et 4keV. D'autre part l'intensité de chauffe est de 20 mA.

On considère $E_{\text{max}}(\text{RX durs})=100\text{Kev}$ et $E_{\text{max}}(\text{RX mous})=50\text{Kev}$

- A. On élève la haute tension accélératrice à une valeur de l'ordre de 50 kVolts.
- B. On observe des raies caractéristiques de Wolfram d'énergie 69 keV.
- C. La longueur d'onde minimale (λ_{min}) des rayons X émis vaut 0,124 Å.
- D. Fabien Ribéry reçoit dans sa face 20W, ce qui correspond à la valeur du flux énergétique total.
- E. Les RX sont préférentiellement émis parallèlement à la direction des électrons incidents accélérés.

QCM 17 : Ces réactions nucléaires sont envisageables.

- A. $^{99}_{42}\text{Mo} (n; p) ^{99}_{43}\text{Tc}$
- B. $^{15}_7\text{N} (n; d) ^{14}_6\text{C}$
- C. $^{123}_{52}\text{Te} (\gamma; 2p) ^{121}_{50}\text{Sn}$
- D. $^{32}_{15}\text{P} (\alpha; p) ^{35}_{16}\text{S}$
- E. $^{18}_9\text{F} (\gamma; d) ^{20}_{10}\text{Ne}$

QCM 18 : On vous donne le profil d'émission β pure d'un échantillon radioactif contenant du phosphore 32 (Z=15), excédentaire en neutrons par rapport à l'isotope stable ($E_{\beta_{\max}} = 2,82 \text{ MeV}$) :

- A. On peut discerner un phénomène de conversion interne.
- B. La différence de masse entre l'atome initial et l'atome final vaut approximativement $3 \times 10^{-3} \text{ u}$.
- C. L'atome produit est le $^{32}_{16}\text{S}$.
- D. Cette transformation s'accompagne de l'émission d'un neutrino.
- E. L'énergie moyenne des particules β vaut approximativement 0,94 MeV.

QCM 19 : Camille, une doublante purpanaise, veut faire une blague à Line, primante, en lui faisant avaler une source radioactive constituée d'atomes identiques dont les noyaux, de nombre de masse égal à 100, se désintègrent par émission β^+ ($E_{\max}=1\text{MeV}$) suivie de l'émission d'un seul γ ($E_{\gamma}=100\text{keV}$) :

- A. L'énergie moyenne des particules β^+ émises est environ égale à 0,33 MeV.
- B. L'atome fils a une masse inférieure à celle du père de 1,1 MeV.
- C. Dans le cas de l'émission β^+ , les particules β^+ ne sont jamais émises avec une énergie cinétique pratiquement nulle.
- D. Un photon de 0,511 MeV est produit par une désintégration.
- E. Une conversion interne peut se produire.

QCM 20 : Concernant les collisions électron-électron :

- A. La force d'attraction ou de répulsion qui régit cette interaction est inversement proportionnelle à la distance entre ces 2 électrons.
- B. La densité linéique d'ionisation représente l'énergie transférée au milieu par unité de longueur de trajectoire.
- C. Un électron, qui au terme de son parcours dans de l'eau, a produit 6 000 excitations, avait une énergie initiale de 64 keV.

Un faisceau d'électrons monoénergétiques de 640 keV pénètre dans de l'eau :

- D. Le parcours moyen des électrons est de 320cm.
- E. Le transfert linéique moyen est de 200 eV/ μm

QCM 21 : À propos des interactions des RI avec la matière :

- A. Les électrons et les particules lourdes chargées sont dits directement ionisants.
- B. Le parcours d'un photon dans la matière peut être infini tout comme celui d'un électron ou d'une particule lourde chargée.
- C. Les interactions électron - noyau appartiennent au domaine des réactions nucléaires.
- D. Le parcours des particules lourdes chargées dans un milieu a une trajectoire désorganisée, comme celui des électrons.
- E. L'énergie d'un électron ou d'une particule lourde chargée étant plus forte en début de parcours, le TEL est maximal en début de parcours.

QCM 22 : Soit, en espace clos et à un instant donné t , un équilibre de régime entre 1 MBq d'un élément A de période 100h et un élément B de période 1h :

- A. La constante radioactive de A est 100 fois plus petite que celle de B.
- B. Au temps $t+2h$, l'activité de B est de 0,25MBq.
- C. A l'instant t , le nombre d'atomes de A est sensiblement égal au nombre d'atomes de B.
- D. A l'instant t , le nombre d'atomes de A est compris entre 10^{11} et 10^{12} .
- E. A l'instant $t+1h$, le nombre d'atomes de B est compris entre 10^9 et 10^{10} .

QCM 23 : Un électron positif incident, d'énergie 150 keV, interagit par collision avec un électron atomique provoquant l'émission d'un électron secondaire dont l'énergie cinétique est égale à 5 keV.

Cette interaction est suivie d'un réarrangement du cortège électronique, dont le spectre correspondant comporte 2 raies caractéristiques de 10 et 20 keV d'amplitudes différentes.

Les différentes couches électroniques de l'élément possèdent les énergies de liaisons suivantes en keV : $W(K)=120$, $W(L)=80$, $W(M)=50$, $W(N)=30$ et $W(O)=20$.

- A. L'interaction par collision s'est produit sur un électron de la couche N.
- B. Le transfert d'énergie a été de 35 keV.
- C. On pourrait observer une raie caractéristique de 30 keV.
- D. L'énergie restante à l'électron incident après l'interaction est de 95 keV.
- E. Pour cette trajectoire donnée, un électron incident de 180 keV aurait transféré plus d'énergie.

QCM 24 : Soit un espace confiné dans lequel on place 132×10^9 atomes d'un élément radioactif de période 23,1min.

- A. A t_0 , la constante radioactive de cet élément radioactif est égal à $\frac{1}{2} \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.
- B. Son activité est de 66 kbq.
- C. A $t_0 + 46 \text{ min}$, $A=16,5 \text{ Mbq}$.
- D. A $t_0 + 46 \text{ min}$, il y reste 66×10^9 atomes de l'élément radioactif.
- E. Il ne restera plus de cet élément radioactif dans notre espace confiné au bout de 48h.

QCM 25 : On place dans un espace clos un radioélément A de période $T = 100h$. Il se transforme en un radioélément B de période 1h.

On attend un peu avant de prendre les mesures puis on enregistre : Activité de l'élément A=242 Mbq.

- A. Au bout d'une heure, l'activité de l'élément B aura diminué de moitié.
- B. Au bout de 10h, l'activité de l'élément B sera négligeable.
- C. Au bout de 100h, l'activité de l'élément B sera de 121 Mbq.
- D. Il y a environ 100 fois plus d'atomes de A que d'atomes de B.

Voulant reprendre des mesures, mais ne sachant comment faire, un petit P1 ouvre notre boîte. Il arrive ainsi, au bout d'une heure de travail acharné, à mesurer l'activité de A : $A=32 \text{ Mbq}$.

- E. On peut en déduire que l'activité de B est $A=16 \text{ Mbq}$.

QCM 26 : À propos de la transformation β^- :

- A. La transformation β^- se produit pour les noyaux excédentaires en neutrons par rapport au nombre de protons.
- B. La particule β^- est toujours émise avec une énergie égale à la différence énergétique de masse entre le noyau père et le noyau fils.
- C. L'antineutrino permet d'expliquer le spectre de raies de l'émission β^- .
- D. L'interaction des neutrinos avec la matière est peu probable, ce qui les rend difficiles à détecter.
- E. La transformation β^- présente un seuil d'énergie de 0,511 MeV.

QCM 27 : À propos de la transformation β^+ et de la capture électronique (CE) :

- A. Lors d'une CE, dans la mesure où un proton s'est transformé en neutron, l'atome fils éjecte un électron périphérique en excès.
- B. La capture électronique est dite « sans seuil ».
- C. Comme les particules β^- , les β^+ épuisent leurs énergies cinétiques par des interactions électrostatiques avec le milieu environnant.
- D. Le seuil de la transformation β^+ correspond à l'énergie potentielle de masse perdue par le noyau du seul fait des masses de la particule β^+ et de l'électron périphérique émis.
- E. L'imagerie TEP repose sur la détection simultanée de la paire de photons X de 0,511 MeV émis à 180° après annihilation.

QCM 28 : L'élément $^{40}_{19}\text{K}$ se désintègre 3 fois sur 10 par transformation β^+ ($E_{\beta^+_{\text{moy}}} = 600 \text{ keV}$) et 7 fois sur 10 par β^- , avec $E_{\beta^-_{\text{moy}}}$ égale à 3 fois l'énergie de l'antineutrino ($E_{\bar{\nu}} = 0,2 \text{ MeV}$).

La transformation β^+ est pure, tandis que la transformation β^- s'accompagne de l'émission d'un photon γ de 511 keV :

- A. Sur 10 désintégrations, on peut détecter 13 photons γ .
- B. L'énergie dépensée durant la désintégration β^- est de 2,511 MeV.
- C. L'énergie dépensée durant la désintégration β^+ est de 1,5 MeV.
- D. La désintégration β^+ produit du $^{40}_{20}\text{Ca}$ et la désintégration β^- produit du $^{40}_{18}\text{Ar}$.
- E. Une capture électronique serait possible.

QCM 29 : À propos de la quantification de l'énergie :

Données : constante de Planck $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

- A. La différence entre mécanique classique et mécanique relativiste est que dans la première, une onde peut prendre n'importe quelle valeur d'amplitude pour une fréquence f donnée, alors que dans la seconde, l'onde est un multiple entier d'une entité énergétique.
- B. La relation de Planck nous permet de calculer l'énergie d'une onde en fonction de sa fréquence par la relation : $e = h/f = hT$ car $f = 1/T$ (où h est la constante de Planck et T la période).
- C. Un photon est donc défini par sa fréquence, qui est inversement proportionnelle à son énergie.
- D. Soit une onde électromagnétique de fréquence $f = 10^9 \text{ Hz}$. Sa longueur d'onde $\lambda = 1 \text{ nm}$ et son énergie est proche de $6,626 \cdot 10^{-43} \text{ J}$.
- E. En médecine, quantifier l'énergie d'une onde émise au patient va nous permettre de faire la différence entre une onde à visée diagnostique (radiologie) ou à visée thérapeutique (destruction ciblée d'une tumeur).

QCM 30 : À propos des ondes et de la dispersion :

- A. Toutes les ondes électromagnétiques ont la même vitesse dans le vide : celle de la lumière, dont la valeur est d'environ 300 km/s.
- B. Chaque milieu transparent a un indice de réfraction n ; la vitesse de la lumière étant toujours inférieure à celle de sa propagation dans le vide, n est toujours supérieur à 1.
- C. Un milieu est dit non dispersif pour un certain type d'ondes si la célérité de ces ondes ne dépend pas de leur fréquence.
- D. L'analyse spectrale repose sur la théorie des ondes planes monochromatiques, en effet comme chaque onde possède une fréquence précise, il est possible de décomposer une somme d'onde.
- E. Quand tu allumeras ton téléphone portable ou ta télévision après ta P1, tu enverras des ondes de fréquence plus basses que quand tu mets en marche ton micro-onde pour faire réchauffer tes pâtes minutes.

QCM 31 : À propos des propriétés des milieux translucides :

On considère un flux énergétique ϕ_0 , issu de photons de longueur d'onde λ , traversant successivement deux milieux translucides différents. A l'aide d'un détecteur on trouve la valeur du flux suivant $\phi_1 = 5W$. ϕ_0 correspond au flux initial, ϕ_1 correspond au flux ayant traversé le premier milieu et ϕ_2 correspond au flux ayant traversé les deux milieux. Par ailleurs nous savons que la transmittance du premier milieu est $\frac{1}{2}$ et que l'opacité totale des deux milieux est égale à 5. On considère que $\log(1/5) = -0,7$, $\log(5) = 0,7$ et $\log(1/10) = -1$.

- A. ϕ_0 est égal à $2,5W$.
- B. ϕ_2 est égal à $2W$.
- C. La densité optique totale est égale à $0,7$.
- D. La densité optique est un nombre sans dimension mais on peut néanmoins utiliser le décibel comme unité.
- E. Pour un matériel homogène d'épaisseur x , on obtient la formule suivante $DO = k.x$ où k est une constante propre à l'expérience.

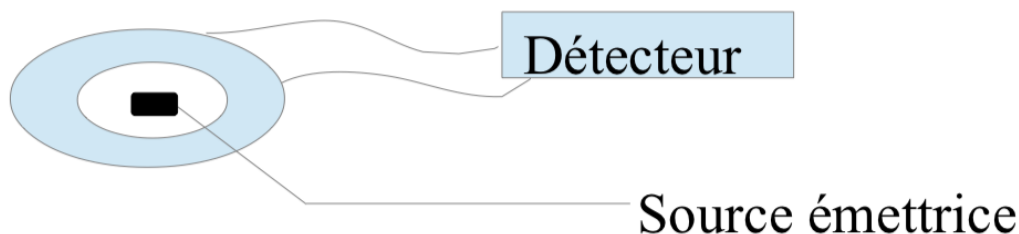
QCM 32 : À propos des spectres des ondes lumineuses et des flux énergétiques.

- A. Un corps chauffé à une température donnée émet des photons de fréquence identique.
- B. Les radiations lumineuses ont des longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm.
- C. L'émission à 336 nm du mercure théoriquement située dans l'infra-rouge est visible si la source est assez puissante.
- D. Le flux énergétique s'exprime en Watts et correspond au débit énergétique traversant une surface.
- E. Annulé.

QCM 33 : La radiologue Pr. Purpanol, protégée par un panneau de plomb de 14cm d'épaisseur, ($\mu = 0,5\text{cm}^{-1}$), est bombardée par un faisceau de photons monoénergétiques et parallèles de 2MeV .

- A. L'atténuation du faisceau par le plomb est principalement due à des effets photoélectriques.
- B. Le faisceau transmis au Pr. Purpanol après traversée de son tablier est atténué d'un facteur 10000 .
- C. Étant donnée l'atténuation du faisceau par le panneau, l'effet de matérialisation n'est plus possible dans le corps du Pr. Purpanol.
- D. Face à des photons de 10MeV , les CDA du tissu humain et du plomb seraient augmentées.
- E. Tous les photons atteignant le corps de la radiologue proviennent du faisceau incident.

QCM 34 : Soit un détecteur à gaz fermé fonctionnant en mode compteur proportionnel, ayant des parois épaisses et la forme d'un taure (beignet). On place, au centre de ce taure, une source radioactive émetteur β^+ ($E_{\beta\text{max}} = 1,275\text{MeV}$). On règle la fenêtre du spectromètre sur l'intervalle $500\text{--}520\text{keV}$ et on y observe $8\,040$ ips (interactions par seconde). Le mouvement propre est de 40 ips, le temps mort du détecteur est de 10^{-4} s, le rendement du détecteur est de 80% et le détecteur se situe sur le trajet de 80% des photons γ .



- A. Les $8\,040$ ips observées correspondent, en partie, aux interactions des positons avec le volume sensible.
- B. Les $8\,040$ ips observées ne correspondent qu'à des effets photoélectriques dans le volume sensible.
- C. Après correction de temps mort, le comptage corrigé vaut $40\,000$ ips.
- D. Après correction de géométrie et de rendement, le comptage vaut $50\,000$ ips.
- E. L'activité de la source vaut $31\,250$ Bq.

QCM 35 : À propos des interactions Photon-Matière.

Symbole du coefficient d'atténuation linéique : μ .

- A. Les photons de désexcitation sont facilement observables dans la mesure où leur énergie se situe dans le domaine du visible ou de l'ultra-violet.
- B. Un photoélectron, qui était auparavant un électron de couche périphérique, est aussi appelé photon diffusé.
- C. On sait que l'effet de matérialisation est prépondérant pour les photons de haute énergie et pour les matériaux de Z faible.
- D. Les sources de photons peuvent être les tubes à RX, les accélérateurs linéaires ou les radioéléments.
- E. Face à une porte en plomb ($Z = 82$), on peut affirmer que $\mu_{\text{compton}} > \mu_{\text{photoélectrique}} > \mu_{\text{matérialisation}}$, si les photons ont une énergie de 100 keV.

QCM 36 : Moment d'une force et moment d'inertie :

- A. Si un vecteur $\vec{C}$ est le produit vectoriel de 2 vecteurs $\vec{B}$ et $\vec{A}$ alors il est orthogonal à ces 2 vecteurs.
- B. Sur un objet, l'action de rotation autour d'un pivot est maximale si la force appliquée est parallèle au vecteur $\vec{OP}$ (avec O le pivot et P le point d'application de la force).
- C. Dans le cas d'un objet en rotation au bout d'une tige, le moment d'inertie est proportionnel à la masse de l'objet et à la longueur pivot-objet.
- D. Pour un disque et un anneau de même masse et de même rayon, le moment d'inertie de l'anneau est supérieur à celui du disque.
- E. Le moment d'inertie est conservé dans le mouvement d'une toupie dont on néglige les forces de frottement.

QCM 37 : Hannah, une P2P, joue à la toupie avec passion. Elle étudie son mouvement de précession. On néglige les forces de frottement (avec $r=2\text{cm}$, vitesse linéaire tangentielle= 1m/s et $g=9.81\text{m/s}^2$)

- A. Alors que la direction de la force de pesanteur est verticale, celle du moment de cette force est horizontale.
- B. La force de pesanteur agit en faisant tourner le moment angulaire verticalement.
- C. La vitesse de rotation de la toupie est de 50 rd/s.
- D. La vitesse angulaire de précession est de $\omega = 19,62 \text{ rd/s}$.
- E. Si la toupie tombe c'est parce qu'il n'y a plus aucune force qui s'applique sur cette toupie.

QCM 38 : À propos des détecteurs de rayonnements ionisants.

- A. Un détecteur Geiger-Müller peut être utilisé en tant que dosimètre pour la radioprotection directement sous un faisceau de RX en radiologie.
- B. Les détecteurs à scintillation sont les détecteurs d'ambiance les plus sensibles actuellement.
- C. Un spectromètre est utile en aval d'un détecteur à scintillation.
- D. La spectrométrie de photons gamma mono-énergétiques fournit un spectre de distribution en énergie comportant un pic dit « photoélectrique », dont la surface est proportionnelle au nombre d'interactions par effet photoélectrique de photons primaires.
- E. Les détecteurs radiothermoluminescents sont des détecteurs d'ionisations.

QCM 39 : À propos de la résonance magnétique, lorsque la distance entre le pivot et un objet quelconque augmente :

- A. Le mouvement d'inertie de cet objet augmente.
- B. La vitesse linéaire tangentielle de cet objet augmente.
- C. La vitesse angulaire de précession diminue.
- D. Le moment de la force augmente.
- E. Le moment angulaire augmente.

QCM 40 : Le signal de résonance magnétique peut être enregistré si :

- A. L'atome contient un nombre pair d'électrons et de protons.
- B. Le noyau contient un nombre pair de protons et de neutrons.
- C. Le noyau contient un nombre impair de protons et un nombre pair de neutrons.
- D. Le noyau contient un nombre pair de protons et impair de neutrons.
- E. Le noyau contient un nombre impair de neutrons et un nombre impair de protons.

QCM 41 : Dans un champ de 1 tesla, le proton résonne à 42,57 MHz. Sachant que dans un même champ le ^{31}P résonne à 17,24 MHz, et le ^{13}C résonne à 10,71 MHz, quelle est la valeur du rapport gyromagnétique γ du ^{31}P par rapport à celle du proton prise comme unité ?

- A. 0,25.
- B. 0,5.
- C. 0,2.
- D. 0,4.
- E. Le rapport γ de ^{13}C serait de 0,25.

QCM 42 : À propos de la spectroscopie :

- A. Le décibel est une unité de puissance sonore.
- B. La densité optique linéique d'un soluté est directement proportionnelle à sa concentration.

On se propose de calculer la concentration d'un soluté à partir de la loi de Beer-Lambert. On dispose de tout le matériel nécessaire, notamment une cuve d'10 cm de longueur. On réalise un étalonnage qui nous permet d'évaluer $\epsilon = 2$. Soit $I_0 = 1000$ (intensité entrante) et $I_t = 3,16$ (intensité transmise). $\text{Log}_{10}(3,16) = 0,5$.

- C. La DO est égale à 2,5 dB.
- D. ϵ correspond au coefficient d'extinction molaire (en $\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$).
- E. La concentration du soluté est égale à 12,5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

QCM 43 : À propos de l'oxymétrie de pouls :

$\text{DO} = \log 10 (100 / \text{Transmittance})$.

- A. La D.O. du sang artériel = $\log 10 (100 / \text{transmittance systolique} / \text{transmittance diastolique})$.
- B. La mesure de l'oxymétrie de pouls ne peut être réalisée chez le nouveau-né.
- C. La mesure de l'oxymétrie de pouls est fiable chez un patient intoxiqué au monoxyde de carbone.
- D. Un brassard de prise de tension en amont du dispositif diminue la fiabilité de la mesure.
- E. La mesure de l'oxymétrie de pouls est souvent mal interprétée chez les patients parkinsoniens.

QCM 44 : À propos du corps noir :

- A. D'après la loi de Stefan-Boltzmann l'énergie dissipée par rayonnement d'un corps noir est proportionnelle à la température absolue.
- B. Les corps sont dits noirs à cause de leur couleur.

On chauffe un corps noir à 27 °C. Soit σ , la constante de Stefan-Boltzmann égale à $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. Soit la constante de la loi de Wien = $2,898 \cdot 10^{-3}$.

- C. La densité du flux énergétique émis par le corps noir est d'environ $459 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
- D. D'après la loi de Wien, la longueur d'onde à laquelle ce corps noir émet le plus de flux lumineux énergétique est d'environ 10 μm .
- E. 27 °C est la température moyenne de corps noir de la Terre.

QCM 45 : À propos des détecteurs :

- A. Les dosimètres passifs, à lecture différée, sont utilisés pour la dosimétrie opérationnelle.
- B. La dosimétrie des patients est impossible car les dosimètres passifs et actifs ne sont réservés qu'au personnel.
- C. La radioprotection implique l'utilisation de détecteurs à rayonnements non ionisants.
- D. Un détecteur en mode compteur enregistre un nombre d'interactions par unité de temps.
- E. Un dosimètre individuel exprime la dose équivalente personnelle en profondeur, $H_p(0,07)$, ou superficielle, $H_p(10)$.

QCM 46 : Concernant les principes généraux de la détection des RI

- A. La distribution statistique des valeurs mesurées lors d'un comptage suit la loi de Gauss.
- B. Pendant le temps mort, le compteur est inapte à détecter un autre événement, c'est pourquoi on applique une correction au taux de comptage.
- C. Dans une pièce sans source de RI particulière, un détecteur enregistrera un certain nombre d'événements quand même.
- D. L'activité d'une source peut être trouvée si on connaît le rendement global.
- E. Le rendement global correspond au produit GR et s'exprime en coups/s/Bq dans le cas d'un compteur.

QCM 47 : À propos des détecteurs à gaz :

- A. En fonction de la tension U utilisée, le détecteur à gaz peut être utilisé dans des régimes différents. Son fonctionnement se fonde sur la détection des ionisations.
- B. Un compteur Geiger permet de mesurer la dose dans un faisceau de rayons X, par exemple en radiologie ou en radiothérapie.
- C. Un détecteur à scintillation ne permet pas de faire de la spectrométrie gamma.
- D. Dans le régime d'ionisation primaire, il peut y avoir un phénomène de multiplication.
- E. Les films argentiques sont constitués de cristaux d'halogénures d'argent et permettent une dosimétrie passive.

QCM 48 : À propos des détecteurs :

- A. Un détecteur à scintillation permet la détection d'excitation-désexcitation et est formé d'un photodétecteur puis d'un scintillateur.
- B. Un détecteur radiothermoluminescent est utilisé en dosimétrie passive.
- C. En spectrométrie gamma, la position du pic photoélectrique sur les abscisses renseigne sur le nombre d'interactions par effet photoélectrique de photons primaires enregistrés, alors que la surface sous le pic renseigne sur l'énergie des photons.
- D. Dans un détecteur à gaz, pour des tensions U très faibles (inférieures à 100 V), on est dans le régime de la chambre d'ionisation (pas de recombinaison).
- E. Les spectromètres permettent de déterminer l'énergie du RI.

FORMULAIRE SIMPLIFIE

$$\begin{aligned}
 \vec{\Gamma} &= \vec{r} \wedge \vec{F} & \vec{L} &= m \vec{r} \wedge \vec{v} & \vec{\Gamma} &= \frac{d\vec{L}}{dt} \\
 \vec{F} &= q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} & \vec{\Gamma} &= i\vec{A} \wedge \vec{B} & \vec{\mu} &= i\vec{A} & \vec{\Gamma} &= \vec{\mu} \wedge \vec{B} \\
 \vec{\mu}_{orb} &= \gamma \vec{L} & \gamma &= \frac{q}{2m} & \vec{\mu}_{spin} &= g_L \gamma \vec{S} \\
 \vec{\mu} &= \vec{\mu}_{orb} + \vec{\mu}_{spin} = \gamma \vec{J} \\
 \omega_0 &= \gamma B_0 & \nu_0 &= \frac{\omega_0}{2\pi} = \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right) B_0 & \Delta E &= h \nu_0 \\
 M_0 &\propto N \cdot \Delta E \propto N \cdot \gamma \cdot B_0 \\
 SAR &= \frac{d}{dt} \left(\frac{d\bar{W}}{dm} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{d}{dt} \left(\frac{d\bar{W}}{d\tau} \right) \quad (\text{W/kg}) \\
 v_1 &= \frac{c}{n} = \frac{E_1}{B_1} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}} & \epsilon_1 &= n^2 \epsilon_0 \\
 \frac{d\bar{W}}{d\tau} &= \frac{1}{2} (n^2 \epsilon_0) c^2 B_1^2 = \frac{1}{2} (n^2 \epsilon_0) E_1^2 \quad (\text{J/m}^3) \\
 \bar{I} &= v_1 \frac{d\bar{W}}{d\tau} = \frac{c}{n} \frac{d\bar{W}}{d\tau} \quad (\text{W/m}^2) & SAR &= \frac{1}{\rho} \frac{N}{t} \frac{\mathcal{W}}{\Delta t} \quad (\text{W/kg}) \\
 \omega_1 &= \gamma \cdot B_1 & \varphi \text{ (rad)} &= \omega_1 \cdot \Delta t \\
 M_z(t_0) &= M_0 \cdot \cos \varphi & M_{x'}(t_0) &= M_0 \cdot \sin \varphi \\
 M_{z, \varphi=90^\circ}(t) &= M_0 \left(1 - \exp^{-\frac{t}{T_1}} \right) & M_{x', \varphi=90^\circ}(t) &= M_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \\
 M_z(t) &= M_0 \left(1 - (1 - \cos \varphi) \cdot \exp^{-t/T_1} \right) & M_{x'}(t) &= M_0 \cdot \sin \varphi \cdot \exp(-t/T_2) \\
 \delta_{ppm} &= \frac{\nu_0 - \nu_{0,TMS}}{\nu_{0,TMS}} \cdot 10^6 \approx (\sigma_{TMS} - \sigma) \cdot 10^6
 \end{aligned}$$

Pas de calculatrice au concours :
Des tables de valeurs numériques et de constantes de la Physique
seront fournies lors du concours

CORRECTION ANNALES DU TUTORAT

QCM 1 : AC

- B. On peut aussi observer des mouvements de rotation, notamment pour les cristaux moléculaires.
- D. C'est l'inverse.
- E. ATTENTION !!! La condensation correspond au passage de l'état gazeux à l'état solide. Le phénomène de buée sur les vitres froides devrait s'appeler liquéfaction, il s'agit d'un abus de langage.

QCM 2 : ACD

- B. Décomposée selon les 3 grandeurs fondamentales. Force : $[M].[L].[T]^{-2}$
- E. Dans 0,012 kg. Attention aux erreurs d'inattention petit scarabée dodu.

QCM 3 : D

- A. Une attomole = 10^{-18} mol, il aura $6,022 \cdot 10^5$ tutorés. C'est quand même énorme.
- B. Faux. Un nombre sans dimension peut avoir une unité !
- C. L'accélération est définie par le quotient d'une grandeur dérivée sur une grandeur fondamentale.
- E. $W = F \times L$, en dimension $[W] = [F][L] = ML^2T^{-2}$, donc 1 joule = $1 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$.

QCM 4 : CE

- A. Faible pression.
- B. Forte température.
- D. A 1 atm, 1 mole occupe 22,4 litres. Donc à 10 atm, 1 mole occupe 2,24 litres. Si on divise par 10^3 la quantité de matière du gaz parfait : 1 millimole occupe 2,24 ml.
- E. Vrai : 1 mole dans 1 litre développe 22,4 atm, donc 2 moles développent $22,4 \times 2 = 44,8$ atm. Dans 4 litres, 2 moles développent $44,8/4 = 11,2$ atm

QCM 5 : D

- A. Toujours miscibles.
- B. C'est l'agitation thermique.
- C. L'apparition de molécules du gaz dans le liquide.
- E. Inférieure.

QCM 6 : ABDE

- A. Vrai : $0,25 \times 760 = 190 \text{ mmHg}$.
- B. Vrai : $532/760 = 0,7$ ou bien $0,7 \times 760 = 532 \text{ mmHg}$ (pour éviter la division contentez vous de tester la valeur).
- C. $\frac{1}{2} = 0,5$ mole d'He donc fraction molaire d'He $0,5/50 = 0,01$ d'où pression partielle d'He $0,01 \times 760 = 7,6$.
- D. Vrai : $1 - 0,25 - 0,7 - 0,01 = 0,04$. Rappel la somme des fractions molaires vaut 1.
- E. Vrai : $pV = nRT$ avec $p = 1$ ($760 \text{ mmHg} = 1 \text{ atm}$) ; $n = 50$; $RT = 22,4$; d'où $V = 1120$ litres.

QCM 8 : CE

- A. Cette formule correspond à l'énergie relative totale.
- B. Inférieure.
- C. Vrai : $248 \text{ Å} = 24,8 \text{ nm}$; et $1,24/24,8 = 0,05 \text{ keV}$. (Rappel : $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$)
- D. Toujours inférieur.

QCM 9 : CE

- A. C'est l'inverse. Auger $\rightarrow$ légers, photons $\rightarrow$ lourds
- B. L'énergie transférée à l'électron doit être exactement égale à la différence entre E_1 et E_2 .
- D. Elle augmente approximativement proportionnellement au carré du numéro atomique.

QCM 11 : ABE

Pour ce genre d'exercices, il est fortement conseillé de faire un tableau de ce type avec les données de l'énoncé, puis de le compléter :

	Fraction molaire	Pression
O ₂	0,2	120
CO ₂	0,2	120
H ₂	0,6	360
TOTAL	1	600mm Hg

A. Fraction molaire [H₂] = pression partielle [H₂] / pression totale = 360/600 = 0,6.

B. (1-fraction molaire [H₂]) / 2 = (1-0,6)/2 = 0,2.

C. Pression partielle [O₂] = fraction molaire [O₂] x pression totale = 0,2 x 600 = 120 mm Hg.

D. Vrai pour la pression partielle du CO₂. (Piège stupide mais qui tombe au concours...)

E. Vrai (fraction molaire [H₂]) / (fraction molaire [CO₂]) = 0,6/0,2 = 3.

QCM 12 : CD

A. 80% de 1 = 0,8.

B. $pV = nRT$, $n = pV / RT = (10 \times 22,4) / (22,4) = 10$ mol.

C. Vrai : pression partielle d'O₂ = fraction molaire [O₂] x pression totale = 0,2 x 7600 = 1520 mmHg.

D. Vrai : quantité de N₂ x M[N₂] = 8 x 28 = 224g.

E. $PV = nRT \Rightarrow P = nRT/V = 10 * 22,4 / 224 = 1$ atm

QCM 13 : B

A. C'est l'interaction forte qui est responsable de la cohésion du noyau.

C. Carbone 12 et carbone 14 sont des isotopes. Les isobares ont le même nombre de masse mais un numéro atomique différent. Le reste est juste.

D. C'est l'inverse, l'énergie de liaison augmente rapidement pour les noyaux légers puis diminue lentement pour les noyaux lourds.

E. La masse du neutron (1,00866 uma) est quasi égale à celle du proton (1,00727 uma). L'électron (0,0055 uma) est bien environ 1836 fois plus léger que le proton.

QCM 14 : AE

B. Spectre de RAIE !

C. Ed se partage entre l'énergie cinétique du noyau FILS et l'énergie cinétique de la particule α . Le noyau père a évidemment disparu, il s'est désintégré, donnant un noyau fils et une particule α .

D. $E_c = 1/2 * mv^2$ ou $(\gamma - 1) mc^2$. L'énergie cinétique est directement proportionnelle au carré de la vitesse et est directement proportionnelle à la masse. Cet item est donc entièrement faux !

QCM 15 : CE

A. C'est une accélération centripète des électrons incidents.

B. C'est la cathode qui joue le rôle de canon à électrons.

D. Elle est d'abord redressée puis filtrée.

QCM 16 : BCD

A. Le crâne est un tissu dur fait d'os, donc on utilise des RX dits « durs » de l'ordre de 100keV. Ainsi on utilise une haute tension accélératrice de l'ordre de 100 kVolts. Les RX de 50keV sont dits « mous » et sont utilisés pour l'observation de tissus « mous » (ex : seins en mammographie).

D. Vrai : La puissance délivrée par la haute tension est égale à $P = U \times I = 100000 \times 0,02 = 2000$ Watts. On sait que pour des photons de 100keV le rendement énergétique est d'environ 1%. Donc le flux énergétique rayonné par la cible est d'environ 20 Watts. Les 99% restants sont émis sous forme de chaleur dans la cible.

E. Ils sont émis de façon perpendiculaire pour les énergies utilisées en radiologie.

QCM 17 : BCD

QCM 18 : BCE

A. Émetteur β pur, pas de conversion interne !

B. VRAI : En uma, $\Delta m = E\beta_{\max}/931,5 = 2,82/931,5 (\approx 2,7/900) \approx 3 \times 10^{-3}$ uma. Ici on ne précise pas la valeur de l'antineutrino donc on n'en tient pas compte.

D. Antineutrino avec β^- car on a un excès de neutrons donc cela permet d'en remplacer un par un proton.

E. VRAI : $E\beta_{\max}/3 = 2,82/3 = 0,94$ MeV.

QCM 19 : CE

A. $E\beta_{\text{moy}} = 0,4.E\beta_{\max} = 0,4$ MeV.

B. On s'intéresse à la différence de masse entre les atomes qui correspond à la somme du seuil de 1,022 MeV, de $E\beta_{\max}$ et de l'énergie du photon γ de désexcitation, soit 2,122 MeV.

C. VRAI du fait du seuil 1,022 MeV

D. Ne pas oublier l'apparition des 2 photons γ d'annihilation suite à chaque transformation β^+ , en plus ici de l'émission d'un photon γ de désexcitation.

E. Vrai, puisque le noyau fils est excité à la suite de la transformation.

QCM 20 : CE

A. Inversement proportionnel à la distance au carré.

B. C'est la définition du TEL ; la DLI représente le nombre d'ionisation par unité de longueur de trajectoire.

C. On a 3 excitations pour 1 ionisation, donc 2000 ionisations.

Énergie initiale = nombre d'ionisation x Énergie moyenne d'ionisation = $2000 \times 32 = 64.000 \text{ eV} = 64 \text{ keV}$.

D. $R(\text{cm}) = E(\text{MeV})/(2\rho) = 0,64/(2 \times 1) = 0,32 \text{ cm}$ (attention aux unités !!).

E. VRAI : $n = 640000/32 = 20000$; $DLI = n/R = 20000/3200 = 6,25$ ionisations/ μm .

TEL = DLI x Énergie moyenne d'ionisation = $6,25 \times 32 = 200 \text{ eV}/\mu\text{m}$.

La DLI et le TEL moyens ont ces valeurs là pour un électron quelle que soit son énergie, dans l'eau.

QCM 21 : AC

B. Le parcours d'une particule lourde chargée ou d'un électron dans la matière est toujours fini. Celui d'un photon peut être fini ou infini, l'interaction des photons avec la matière appartient au domaine des probabilités.

D. La trajectoire est rectiligne pour les particules lourdes chargées.

E. La vitesse étant minimale en fin de parcours, l'application de la force d'attraction ou de répulsion est plus longue, c'est donc là que le TEL est maximal, à ne pas confondre avec le TEL_{moy} .

QCM 22 : ADE

B. A l'équilibre de régime, l'élément B décroît selon la période du père soit 100h.

C. Lors d'un équilibre de régime, le rapport du nombre d'atomes du père et du fils est pratiquement égal au rapport des périodes, c'est-à-dire qu'il y aura 100 fois plus d'atomes A que d'atomes B.

D. VRAI : $A = \lambda \cdot N$ donc $N = A/\lambda$, or $\lambda = \ln 2/T = 0,693/T = 0,693/360000$ donc λ est à peu près égal à $2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Donc $N = 10^6 / 2 \cdot 10^{-6} = 0,5 \cdot 10^{12}$.

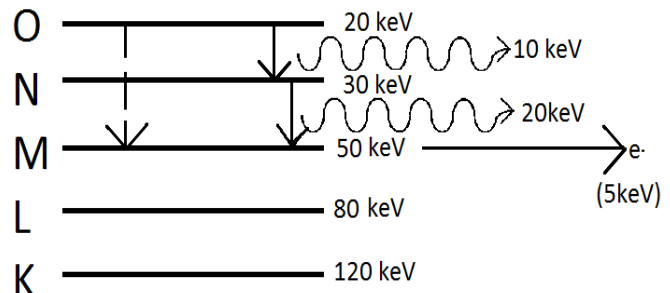
E. VRAI : Le nombre d'atomes de B étant, à l'équilibre de régime, 100 fois inférieur à celui de A (car T 100 fois inférieure), il sera donc compris entre 10^9 et 10^{10} (voir item précédent).

QCM 23 : CD

A. Couche M. En effet :- pour atteindre la couche O = 20 keV

- entre O et N = 10 keV
- entre N et M = 20 keV
- entre M et L = 30 keV
- entre L et K = 40 keV

Donc comme on a deux raies à 10 et 20 keV d'amplitudes différentes (c'est à dire pas le même nombre) c'est forcément la couche M.



B. Transfert d'énergie = Énergie de liaison(M) + Énergie cinétique de l'électron secondaire = 50 + 5 = 55 keV.

D. VRAI. Énergie électron incident = Énergie initiale - transfert d'énergie = 150 - 55 = 95 keV.

E. Pour une trajectoire donnée, plus l'électron incident est énergétique, plus il va vite, donc moins il y aura d'énergie transférée.

QCM 24 : AC

A. VRAI : $T = 0,693/\lambda$. Soit $\lambda = 0,693/T$. Avec $T = 23,1 \times 60 = 1386$ s. Donc $\lambda = 0,693/(1,386 \times 10^3) = 1/2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

B. $A = \lambda \times N = 1/2 \times 10^{-3} \times 132 \times 10^9 = 66 \text{ Mbq}$ et non Kbk.

C. Vrai. 46 min = 2 périodes. Donc $66/2^2$ soit 66 Mbq.

D. On a au départ 132×10^9 atomes, 46 min = 2 périodes, donc : $N = 132 \times 10^9 / 2^2 = 33 \times 10^9$ atomes.

E. Il y en aura toujours, mais ce sera négligeable (48h > 10 périodes du radioélément).

QCM 25 : CDE

A. C'est bien la définition d'une période, mais il y a ici un équilibre de régime entre A et B (puisque période $A \gg$ période B). B se transforme donc avec une période apparente identique à celle du père.

B. Voir item précédent.

D. Vrai. Puisqu'on est en équilibre de régime: « le rapport des populations de noyaux père et fils reste constant et pratiquement égal au rapport des périodes » (cf cours).

E. Vrai. L'ouverture de l'espace a rompu l'équilibre de régime. Donc à l'ouverture B a une activité égale à 32 Mbq (puisque avant en équilibre de régime) mais il recommence à se transformer selon sa propre période ($T = 1$ h). Or le P1 a mis une heure à prendre ses mesures... Lors de la mesure l'activité de B est donc de $32/2 = 16 \text{ Mbq}$.

QCM 26 : D

A. Elle se produit pour les noyaux excédentaires en neutrons par rapport à la vallée de stabilité (le rapport N/Z augmentant avec le nombre de masse jusqu'à une valeur proche de 1,5 pour les noyaux stables).

B. Les électrons β^- sont émis avec des énergies comprises entre 0 et $E_{\beta^- \text{ max}}$.

C. L'antineutrino explique que l'émission β^- soit caractérisée par un spectre énergétique continu.

E. L'émission β^- est « sans seuil », l'électron éjecté étant recapturé dans le pool d'électrons libres de la matière, dans la mesure où un neutron s'est transformé en proton.

QCM 27 : CD

A. La CE n'émet pas d'électron : il faut en effet un électron de moins, mais c'est celui qui est absorbé. Seul un neutrino est émis. Suite à la CE, il se produit également un réarrangement électronique → émission de photons X, voire d'électrons Auger...

B. L'énergie de liaison de l'électron capturé constitue le seuil de la capture électronique.

E. Les photons d'annihilation tirent indirectement leur origine d'une variation d'énergie au niveau nucléaire (lors d'une transformation β^+), il s'agit donc de photons γ .

QCM 28 : AB

A. VRAI, pour β^+ on a pour 1 désintégration 2 photons γ suite à la réaction d'annihilation (et pas un autre entre les deux car la transformation est pure), soit $3 \times 2 = 6$. Pour β^- , 1 à chaque désintégration soit 7, donc $6+7 = 13$ photons γ .

B. Pour β^- : $E_{\beta_{\text{moy}}} = 3 \times 0,2 = 0,6 \text{ MeV}$.

$$E_{\beta_{\text{max}}} = 3 \times E_{\beta_{\text{moy}}} = 1,8 + 0,2 (\text{de l'antineutrino}) + 0,511 (\text{du photon } \gamma) = 2,511 \text{ MeV}.$$

C. Pour β^+ : $E_{\beta_{\text{max}}} = 0,6/0,4 = 1,5 \text{ MeV} + 1,022 (\text{seuil de la } \beta^+) = 2,722 \text{ MeV}$.

D. C'est l'inverse.

E. $E_{\beta^+} = 2,722 \text{ MeV}$ donc on aurait eu une CE.

QCM 29 : AE

B. Attention, $e = h \cdot f = h/T$ tout le reste est vrai.

C. Directement proportionnelle.

D. Faux, $e = h \cdot f = 6,626 \times 10^{-34} \cdot 10^9 = 6,626 \times 10^{-25} \text{ J}$ (soit $4,14 \times 10^{-25} \text{ eV}$) mais $c = \lambda/f \rightarrow \lambda = c \cdot f = 3 \times 10^9 \times 10^{-9} = 3 \text{ m}$.

QCM 30 : CD

A. 300 000 km/s

B. Toujours supérieur à 1, car $n = c/v$ et $v < c$.

E. C'est l'inverse, les micro-ondes et les ondes radio sont de plus basses fréquences.

QCM 31 : BCDE

A. $\phi_0 = 10 \text{ W}$, car la transmittance du premier milieu $= \phi_1/\phi_0$, d'où $\phi_0 = \phi_1 \times 2 = 10 \text{ W}$.

B. Vrai : l'opacité totale est égale à 5, donc la transmittance totale est égale à $1/5 = \phi_2/\phi_0$, $\phi_2 = 1/5 \times 10 = 2 \text{ W}$.

C. Vrai : $DO = -\log(\text{Tr}_\lambda^{\text{tot}}) = -\log(1/5) = 0,7$.

QCM 32 : D

A. Les photons sont émis sur une large plage de fréquences.

B. Les radiations lumineuses sont comprises entre 0,1 et 1000 μm , ne pas confondre avec la lumière visible comprise entre 380 et 780 nm.

C. 336 nm est une longueur d'onde située dans les UV.

E. Annulé.

QCM 33 : Aucune

A. Compton surtout + matérialisation (cf diagramme d'Evans).

B. $CDA_{\text{plomb}} = 0,693/\mu = 0,693/0,5 = 1,4 \text{ cm}$. Le tablier fait 10 CDA, le faisceau est atténué d'un facteur 2^{10} soit 1024, soit environ 1000, et non 10 000.

C. L'atténuation du faisceau de photons, résultant d'interactions aléatoires avec la matière, suit une loi exponentielle. Des photons traversent donc forcément le plomb sans interagir, et ce théoriquement quel que soit son épaisseur (dans les limites du raisonnable !!), pour atteindre le tissu humain avec une énergie intacte de 2 MeV, ce qui suffit à la matérialisation.

D. Pour les tissus oui, car μ diminue quand E augmente ; mais pas pour le plomb pour lequel μ diminue puis augmente au-delà de 3 MeV (ce qui est à la base de la protection contre des faisceaux de photons très énergétiques).

E. Elle n'est pas à l'abri de photons d'annihilation résultant des effets de matérialisation au niveau du plomb, ni de photons de réarrangement ou de désexcitation. Rien ne nous dit que la Pr Purpanol s'en sortira indemne...

QCM 34 : CE

- A. Le détecteur est fermé et il possède des parois épaisses donc il ne peut détecter que des photons.
 B. Il y a aussi le mouvement propre.
 C. VRAI : $8040 - 40 = 8000$; $8000/(1 - (8000 \times 1.10^{-4})) = 8000/(1 - 0,8) = 8000/0,2 = 40\ 000$.
 D. $40000/(0,8 \times 0,8) = 62\ 500$
 E. VRAI : En fait ce que l'on observe sur le spectromètre ce sont les photons d'annihilations de 0,511 MeV, donc l'activité vaut $62\ 500/2 = 31\ 250$. P.S: Ceci est exactement ce qui se passe lors d'examen TEP (Tomographie par Emission de Position).

QCM 35 : AD

- B. N'importe quoi !
 C. Matériaux ayant Z élevé.
 E. $\mu_{\text{photoélectrique}}$ supérieur (Cf diagramme d'Evans).

QCM 36 : ADE

- B. L'action est maximale si la force appliquée est perpendiculaire ($\sin 90^\circ = 1$).
 C. A la longueur pivot-objet au carré.
 D. Vrai : $M_{\text{anneau}} = mr^2$, $M_{\text{disque}} = mr^2/2$ (cours RMN p.2)

QCM 37 : ACD

- B. Le moment angulaire se déplace perpendiculairement à la direction de la force : horizontalement.
 C. Vrai : $\Omega = v/r = 1/(2.10^{-2}) = 50$ rds/s.
 D. Vrai : $\omega = 2g/(r. \Omega)$.
 E. Si la toupie tombe, c'est parce que le moment angulaire devient nul; la force de gravité est toujours présente.

QCM 38 : BCD

- A. Pas directement sous un faisceau de RX en radiologie, à cause de son temps mort trop important.
 E. Les détecteurs radiothermoluminescents sont des détecteurs d'excitation/désexcitation.

QCM 39 : ABCDE**QCM 40 : CDE**

- 3 règles à savoir p.11 :
 Si A est impair : le spin est demi-entier.
 Si A est pair et Z ou N impair : le spin est entier.
 Si A est pair et Z et N pairs : le spin est nul.

QCM 41 : DE

- A. On sait que $v = (\gamma/2\Pi) \times B$
 $B=1 \rightarrow v/\gamma_{\text{proton}} = 2\Pi = v/\gamma_{31P} \rightarrow v/\gamma_{\text{proton}} = v/\gamma_{31P}$.
 Dans l'énoncé on nous dit que le rapport gyromagnétique du proton est pris comme unité, c'est-à-dire =1.
 Cela nous donne : $42,57/1 = 17,24/\gamma_{31P} \rightarrow \gamma_{31P} = 17,24/42,57 = 0,4$.
 De même avec ^{13}C , on trouvera 0,25.

QCM 42 : BDE

- A. Le décibel n'est même pas une unité à proprement parler. Il est couramment utilisé pour parler de niveau sonore, mais il s'agit en fait d'un terme d'échelle logarithmique ! On peut très bien utiliser le dB pour quantifier l'absorbance d'une solution.
 C. La D.O. en dB est égale à $10 \times \log_{10}(I_0/I_t)$. D'où $DO = 10 \times (3 - 0,5) = 25$ dB.
 E. Vrai : $c = DO / (d \times \epsilon) = 2,5 / (0,1 \times 2) = 12,5 \text{ mol.m}^{-3} = 12,5 \text{ mmol.l}^{-1}$.

QCM 43 : ADE

- B. La mesure d'oxymétrie de pouls est possible car peu perturbée par la présence d'hb fœtale.
- C. L'intoxication au CO (carboxyhémoglobine) rend la mesure peu fiable.

QCM 44 : CDE

- A. Elle est proportionnelle à la puissance quatrième de la température absolue.
- B. Un corps est dit noir parce qu'il ne renvoie aucun photon venu de l'extérieur, cela n'a rien à voir avec sa couleur (qui peut varier avec sa température).
- C. Vrai (attention convertir les degrés Celsius en Kelvin) : $\text{flux} = 5,67 \cdot 10^{-8} \times (300)^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \times 81 \cdot 10^8 = 459 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
- D. Vrai : longueur d'onde = $\frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{300} \approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 10 \text{ } \mu\text{m}$.

QCM 45 : D

- A. Pour la dosimétrie réglementaire ou complémentaire.
- B. Elle est possible grâce à des dosimètres placés au niveau de la peau du patient pendant l'irradiation.
- C. Rayonnement ionisants.
- E. Un dosimètre individuel exprime la dose équivalente personnelle en profondeur, Hp(10), ou superficielle, Hp(0,07).

QCM 46 : BCDE

- A. Loi de Poisson.

QCM 47 : A

- B. Le compteur Geiger ne sert qu'à compter des interactions mais ne renseigne pas sur les énergies mises en jeu et donc ne renseigne pas sur la dose délivrée.
- C. Il le permet.
- D. FAUX : pas de phénomène d'avalanche dans le cas d'une chambre d'ionisation.
- E. Vrai mais les films argentiques ne sont pas des détecteurs à gaz !

QCM 48 : BE

- A. D'abord un scintillateur puis un photodétecteur.
- C. En spectrométrie gamma, la position du pic photoélectrique sur les abscisses renseigne sur l'énergie des photons, alors que la surface sous le pic renseigne sur le nombre d'interactions par effet photoélectrique de photons primaires enregistrés.
- D. FAUX : on est dans un régime de recombinaison c'est-à-dire que la tension U n'est pas assez importante et que donc certaines paires électrons-cations se recombinent (recueil des charges incomplet).