

UE 3 : Biophysique

Radioactivité et rayonnements, RMN/IRM



Réussir ma PACES.fr

Les clés de la réussite

I) Radioactivité et rayonnements

1. Énergie

Définition: Ce qui peut produire un changement (élévation de température, déplacement..), c'est un phénomène mesurable en Joules ou en électrons-volts: $1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19}$

a) Pour une particule: $E_{\text{totale relativiste}} = E_{\text{cinétique relativiste}} + E_{\text{repos}} = (\gamma - 1) mc^2 + mc^2 = \gamma mc^2$
avec $\gamma =$ facteur de Lorentz =
$$\gamma \equiv \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Pour une particule dont $v \ll c$: γ tend vers 1: $E_{\text{totale relativiste}}$ tend vers mc^2

Donc au repos, une particule a $E = mc^2$, or $c =$ constante ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Donc $E \approx m$

On prend une nouvelle unité: l'unité de masse atomique: $1 \text{ uma} =$ masse d'1 atome de $C_{12/12}$
 $1 \text{ uma} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$. L'énergie est proportionnelle à la masse!

b) Energie d'une onde électromagnétique

Une onde se déplace de façon progressive & rectiligne, avec une λ & une f :

$$c = \lambda / T = \lambda \times f, \text{ donc } f = c / \lambda$$

$$\text{Or } E = h \times f, \text{ avec } h = \text{constante de Planck} = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$\text{Donc } E = h \times c / \lambda. \text{ Or } c \text{ \& } h \text{ constantes, donc on pose: } E \text{ (keV)} = 1.24 / \lambda \text{ (nm)}$$

L'énergie est proportionnelle à la fréquence et inversement à λ ! Seuil pour qu'un rayonnement devienne ionisant: $13.6 \text{ eV} = \text{UV}$ et au delà

c) Energie de liaison

Energie nécessaire pour dissocier un système (nucléon, électrons..) de son atome. Un électron libre perd de l'énergie lorsqu'il se lie à un atome, il faudra fournir au moins cette énergie pour le libérer à nouveau: $E_{\text{de liaison}} = E_{\text{électron libre}} - E_{\text{électron lié}}$

$$E_{\text{électron libre}} = E_{\text{masse}} + E_{\text{cinétique}} = 511 \text{ keV} + E_{\text{cinétique}}$$

$$E_{\text{électron libre}} < 511 \text{ keV}$$

Lorsqu'on envoie un rayonnement d'énergie E sur un électron, si...

- $E > E_{\text{liaison}}$: ionisation. L'électron part de l'atome (libéré), l'atome devient un cation. L'énergie supplémentaire est emportée par l'électron ($E_{\text{cinétique}}$)
- $E < E_{\text{liaison}}$: excitation. L'électron reste lié à l'atome mais il passe en couche de niveau supérieur (plus externe) en prenant pile l'énergie nécessaire, puis se désexcitera en émettant un photon X.

2) Transformations radioactives

a. Éléments chimiques, caractéristiques

- Isotopes: noyaux avec le même Z: nombre de protons égal, de neutrons différent
- Isobares: noyaux avec le même A
- Isotones: noyaux avec le même N (nombre de Neutrons)
- Isomères: même A, Z, N, mais niveau énergétique du noyau différent

b) Défaut de masse et énergie de liaison

- Défaut de masse: la masse totale d'un noyau est toujours < la masse de ses constituants libres. La différence $\Delta m = (Z(m_p + m_e) + N.m_n) - m_a$
- Energie de liaison du noyau EL: défaut de masse traduit en énergie: celle qui retient tous les nucléons ensemble
- Energie de liaison du noyau par nucléon: EL/A, détermine la stabilité du noyau
- A<30: EL/A augmente rapidement quand A augmente, et est nulle pour H1.
- 30<A<100: EL/A est entre 8 et 9 MeV, max pour le Fe56 à 8.79 MeV
- A>100: EL/A diminue progressivement vers le Plomb208 (Z=82) à 7.86MeV (au delà, tout est instable)

c) Réactions nucléaires

- 2 types de modification d'un noyau:
 - Transformation radioactive = spontanée
 - Réaction nucléaire = provoquée par un projectile sur un noyau, donnant des radioéléments artificiels (imagerie médicale)

Toute transformation spontanée augmente la stabilité du noyau (augmente EL/A)

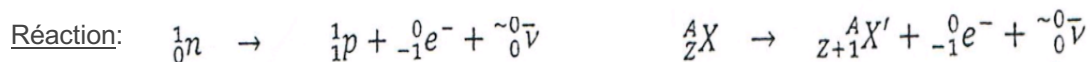
- Réaction nucléaire: $X(r; r') X' = X + r \rightarrow X' + r'$
On doit avoir les mêmes Z et A de chaque côté de l'équation!

• Quelques rayonnements :

- **p**: Z=1 A=1
- **n**: Z=0 A=1
- **e-**: Z=-1 A=0
- **e+**: Z=1 A=0
- **α**: Z=2 A=4. α= Noyau d'He4
- **Photons (X, γ)**: Z=0 A=0 (que de l'énergie sans matière)

- Transformation β- :

Quand? Un noyau a trop de neutrons (pas assez de protons). Seuil? Aucun

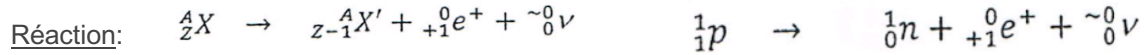


Énergie: $E_{\max} = \Delta mc^2$ $E_{\text{moy}} = \frac{1}{3} E_{\max}$

2. Transformation β^+ :

Quand? Un noyau a trop de protons (pas assez de neutrons)

Seuil? 1.022 MeV: la réaction ne se produit que si l'énergie cédée > 1022 keV.

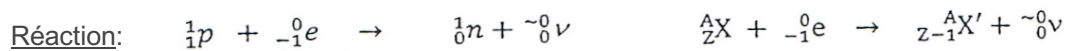


Énergie: $E_{\max} = \Delta mc^2 - 1.022 \text{ MeV}$ $E_{\text{moy}} = 0.4 E_{\max}$

3. Capture électronique: Transformation CE :

Quand? Un noyau a trop de protons (pas assez de neutrons)(comme pour β^+)

Seuil? EL : L'énergie de liaison de l'électron qui va être capturé.

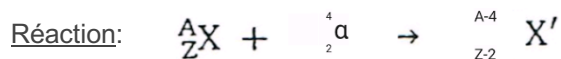


Énergie: $E_{\max} = \Delta mc^2 - EL$ $E_{\text{moy}}: E_{\max}$, car spectre de raies (non continu)

4. Emission α :

Quand? Un noyau lourd dont $Z > 52$ (1 exception: Be: $Z=4$, $A=8$)

Seuil? Masse d'une particule $\alpha = 3728 \text{ MeV} = 4 \text{ uma}$



Énergie: $E_{\text{disponible}} = \Delta mc^2 - 4 \text{ uma}$

 $E_{\text{disponible}}: E_{\text{recoil}} + E_{\text{cinétique}}$

3) Interactions des Rayonnements Ionisants avec la matière

Il existe des radiations...

- Directement ionisantes=particules chargées:
 - Lourdes: Protons, deutons (noyau d'H2), alpha, ions
 - Légères: électrons et positons.

Interaction obligatoire, électrostatique, à parcours fini.

- Indirectement ionisantes =non chargées ($Z=0$):
 - Particules: Neutrons, neutrinos & antineutrinos
 - Photons: Rayons X et γ

Interaction aléatoire (non obligatoire): atténuation exponentielle

Les différents lieux d'interaction:

- Champ électrique de l'atome = nuage électronique (champ négatif): effet Tcherenkov

- Les électrons: Collision (excitation ou ionisation)
- Noyau: Réactions nucléaires
- Champ du noyau: production de Rayons X de freinage (si $r = \text{électron}$)

II) RMN et IRM

C'est quoi la RMN? La résonance magnétique nucléaire, ou RMN, se produit lorsque certains noyaux sont placés dans un champ magnétique statique intense et exposés à un autre champ magnétique variable. Son étude renseigne sur les propriétés magnétiques la matière. C'est une technique NON irradiante: les rayonnements émis sont de faible énergie et non ionisants! 2 utilisations principales: Diagnostic médical par IRM, Étude moléculaire par RMN

1) Champs magnétiques, résonance, relaxation

a. Quels noyaux sont concernés?

Seuls les noyaux avec un spin non nul sont concernés. Comment on sait lesquels?

- Toutes les particules élémentaires prises seules (électron, proton, neutron..) ont un spin = $\frac{1}{2}$.
- Dans un noyau, les particules identiques s'apparient par 2 et s'annulent mutuellement leur spin : 2 Neutrons (ou 2 protons) = 0. 1 proton OU 1 neutron = $\frac{1}{2}$. 1 proton + 1 neutron = 1

Pour avoir un spin non nul, il faut un nombre impair de protons (Z impair) et/ou un nombre impair de neutrons (A-Z). **Attention! Ne jamais faire en fonction du nombre de masse A seul!**

ex: A=32: On peut avoir Z=15 et N=17 : alors spin = 1. ou avoir Z=16 et N=16: spin=0

- Parmi les noyaux en grand nombre dans l'organisme (C12, H1, O16) seul le noyau de H1 a un spin non nul ($\frac{1}{2}$), c'est donc lui qu'on va repérer en IRM et RMN

b) Les 3 étapes pour avoir un signal RMN

0. Dégénérescence: aucun champ magnétique appliqué : aucun signal

1. Précession = Conditions initiales:

Les vecteurs moment magnétique μ s'alignent tous dans la direction du champ magnétique statique B_0 et tournent autour de cet axe, dans un sens ou l'autre. Moment magnétique μ parallèle = up = $+\frac{1}{2}$
Moment magnétique μ antiparallèle = down = $-\frac{1}{2}$

La population parallèle est toujours naturellement un peu plus présente que l'antiparallèle: tous les vecteurs ne s'annulent pas, il en résulte une **Aimantation macroscopique résultante M_0** (somme des μ non annulés) immobile pour l'instant et parallèle à B_0 ! La RMN consiste à analyser les propriétés de M_0 , il doit donc être le plus grand possible pour être le plus visible possible et augmenter la qualité du signal!

M_0 est proportionnel à:

- N= nombre de noyaux dans l'échantillon. H1 = 60% de l'organisme humain (H₂O...)
- γ = facteur gyromagnétique, constante pour chaque noyau. Max pour H1
- B_0 = Champ magnétique statique appliqué de la précession à la fin du test (IRM ou étude moléculaire). Dépend de la machine (pas des atomes), on cherche à l'augmenter par des innovations technologiques pour toujours affiner les diagnostics

- 2. La résonance:

En simple précession, M_0 est encore trop faible pour être mesurée. Pour l'amplifier, on va le stimuler avec une onde électromagnétique (OEM) de fréquence fixe précise: la fréquence de Larmor $\nu_0 = (\gamma/2\pi) B_0$, qui est la fréquence propre du système. Le système atomique et l'OEM sont alors en phase: il y a alors résonance. L'OEM est formée d'un champ électrique (inutile ici) et d'un champ magnétique B_1 , perpendiculaires entre eux, de même sens et direction, et sinusoïdaux. B_1 est un champ tournant et toujours perpendiculaire à B_0 fixe. Action de B_1 = Bascule de l'aimantation: M_0 se met à tourner autour de B_1 (et n'est donc plus parallèle à B_0). M_0 bascule alors d'un angle précis, appelé angle d'impulsion ϕ (en radians!): $\phi = \gamma B_1 \Delta t$

Avec γ =facteur gyromagnétique (constante pour chaque élément) en Hz/T.

B_1 = champ magnétique tournant, en T (tesla)

Δt = temps d'impulsion (durée pendant laquelle on a appliqué l'onde)

- 3. La relaxation:

Cette phase commence quand on arrête l'OEM: la résonance et la bascule s'arrêtent, M_0 revient s'aligner à B_0 : c'est la relaxation. M_0 décrit alors une spirale, qu'on étudie selon 2 composantes: Une longitudinale M_z et une transversale M_x'

Composante	Etude axe	En fin de résonance à 90°	Relaxation	Equilibre
Longitudinale M_z	Oz vertical (fixe)	0	Augmente (repousse)	Max = M_0
Transversale M_x'	Ox' horizontal (mobile)	Max = M_0	Diminue (décroissance)	0

Quelle donnée nous intéresse là dedans?

On va distinguer des différences entre les tissus grâce aux différentes périodes T_1 & T_2 .

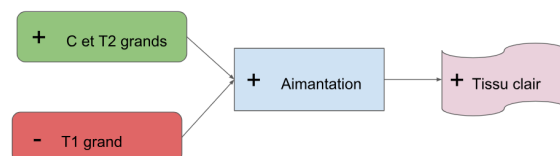
T_1 = temps auquel $M_z = \frac{1}{2} M_0$.

T_2 = temps auquel $M_x' = \frac{1}{2} M_0$

Comment détecter ces variations? On place une antenne réceptrice avec une bobine qui détecte les variations rapides de M_0 sur l'axe O_x (fixe). Le signal capté crée un courant électrique proportionnel aux variations de M_x : ce courant est le signal RMN!

2) Contraste en imagerie IRM

En IRM on visualise la différence des propriétés des noyaux de H_1 dans le corps. L'image peut être obtenue selon 3 paramètres: T_1 , T_2 et la densité de protons (correspondant à la concentration en eau C). Les 3 paramètres varient dans le même sens!



Dans le cerveau, quelle composition et ordre croissant de Concentration en eau: Os < Substance blanche < Substance grise < Tumeur < Liquide céphalo-rachidien

3) Déplacement chimique en spectroscopie RMN

- Position en abscisses: dépend de δ = déplacement chimique, inversement proportionnel à la densité électronique. δ grand si groupement proche de double liaisons

- Hauteur relative de la courbe d'intégration: part de protons (noyaux de H1) dans le groupement
- Nombre de pics : nombre de H sur le groupement voisin + 1. (couplage spin-spin)
ex: 0 voisin = singulet, 1 voisin = doublet, 2 voisins = triplet..