

PAR
LE TUTORAT SANTE PSA

RADIOACTIVITÉ

Un cours du stage de prérentrée 2021

En salles le 24/08/21





Introduction

- ❖ La radioactivité est l'étude des réactions qui impliquent un **changement de noyau avec libération d'énergie**. En chimie, les réactions conservent les éléments chimiques, pas en radio !
- ❖ Ces réactions sont hautement **énergétiques**, elles ont des effets sur la matière. On s'en sert donc en **thérapie cancéreuse** pour traiter certains types de tumeurs.
- ❖ Les rayonnements produits ont une grande pénétration dans la matière, on s'en sert également en **imagerie**.





Lexique

- ❖ **Nucléide** : Noyau atomique noté A_ZX
 - **A** : le nombre de **nucléons** du noyau (de masse).
 - **Z** : le nombre de **protons** du noyau (=numéro atomique). Z est caractéristique d'un unique élément du tableau périodique. L'uranium a $Z=92$, si on change Z, on a un nouvel élément.
 - **X** : le **nom** abrégé de l'élément (cf. tableau périodique)
- ❖ **Isotopes** : Nucléides avec un Z identique mais avec un **nombre de masse A différent**.
- ❖ **Isomère nucléaire** : Noyau dans un **état excité** (peut libérer cette énergie par l'émission d'un photon). Il est noté ${}^A_ZX^*$, isomère nucléaire de A_ZX





Unités utilisées

- ❖ **Unité de masse atomique** : 1 u.m.a. est définie comme **1/12** de la masse d'un atome de carbone ^{12}C dans son état fondamental.

$$1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

On a alors : $m_{\text{neutron}} \approx m_{\text{proton}} \approx 1u$

- ❖ **L'électron-volt** : unité d'énergie, il correspond à l'énergie d'un électron accéléré sous un champ de 1 Volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



Types de masse

❖ On distingue 2 masses :

- **Masse nucléaire** : Correspond à l'énergie de masse du noyau seul, ôtée de l'énergie de liaison

$$m\left(\frac{A}{Z}X\right)c^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n)c^2 - E_l$$

- **Masse atomique** : Correspond à la masse du noyau et des électrons, ôtée de l'énergie de liaison des électrons

$$M\left(\frac{A}{Z}X\right)c^2 = (m\left(\frac{A}{Z}X\right) + Zm_e)c^2 - E_{le}$$

$$E_l > 0 \text{ et } E_{le} > 0$$

E_l est l'énergie à apporter à un noyau afin de séparer tous les nucléons

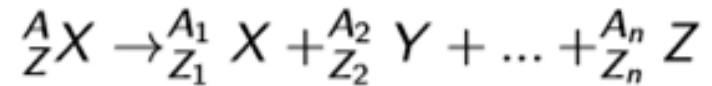
E_{le} est l'énergie à apporter à un atome pour séparer le noyau des électrons





Loi de conservation lors de réactions nucléaires

- ❖ On considère la réaction suivante :



- ❖ Il y a 4 lois à TOUJOURS respecter :

- Conservation de la **charge électrique** : $Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$
- Conservation de la **masse** : $A = A_1 + A_2 + \dots + A_n$

(Les 2 premières lois font partie des **lois de Soddy**)

- Conservation de la **quantité de mouvement** :

$$\sum m_{\text{réact}} \cdot \overrightarrow{v_{\text{réact}}} = \sum m_{\text{prod}} \cdot \overrightarrow{v_{\text{prod}}}$$

- Conservation de l'**énergie** : $E_i = E_f$





Explications sur la formule utilisée

- ❖ Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation de la **masse** et de **l'énergie**. On peut donc se dire qu'il y a une masse m de réactif qui va donner la même masse m de produit.. Et non!
- ❖ En effet, expérimentalement, on mesure une perte de masse. Mais que devient-t-elle? Vous connaissez la formule d'Einstein, $E = mc^2$. Elle permet d'établir **l'équivalence masse/énergie**. La masse qu'on a perdue s'est donc volatilisée en **énergie**, qu'on peut donc récupérer.
- ❖ Si $m = 1u$, alors $E = 931,5 \text{ MeV}$ donc :
$$1u = 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$$
$$c^2 = 931,5 \text{ MeV} \cdot u^{-1}$$





Formule

- ❖ On applique cette équivalence masse/énergie à la perte de masse :

$$Q = (\sum m_{\text{réactifs}} - \sum m_{\text{produit}})c^2$$

- Q est l'énergie, en Joule
 - m sont les masses, en Kilogramme
 - c est la vitesse de la lumière : $c = 3.10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- ❖ Remarques :
- Généralement, les masses sont données en u.m.a. La formule suivante donne un résultat en MeV et elle se réécrit :

$$Q = (\sum m_{\text{réactifs}} - \sum m_{\text{produit}}).931,5$$





- Le signe de Q est particulier. On a :
 $Q > 0$, donc la réaction est **exothermique** et libère de l'énergie
 $Q < 0$, donc la réaction est **endothermique** et reçoit de l'énergie
C'est l'inverse de la thermo car on ne se place pas par rapport au milieu mais par rapport à l'atome.



Particules élémentaires

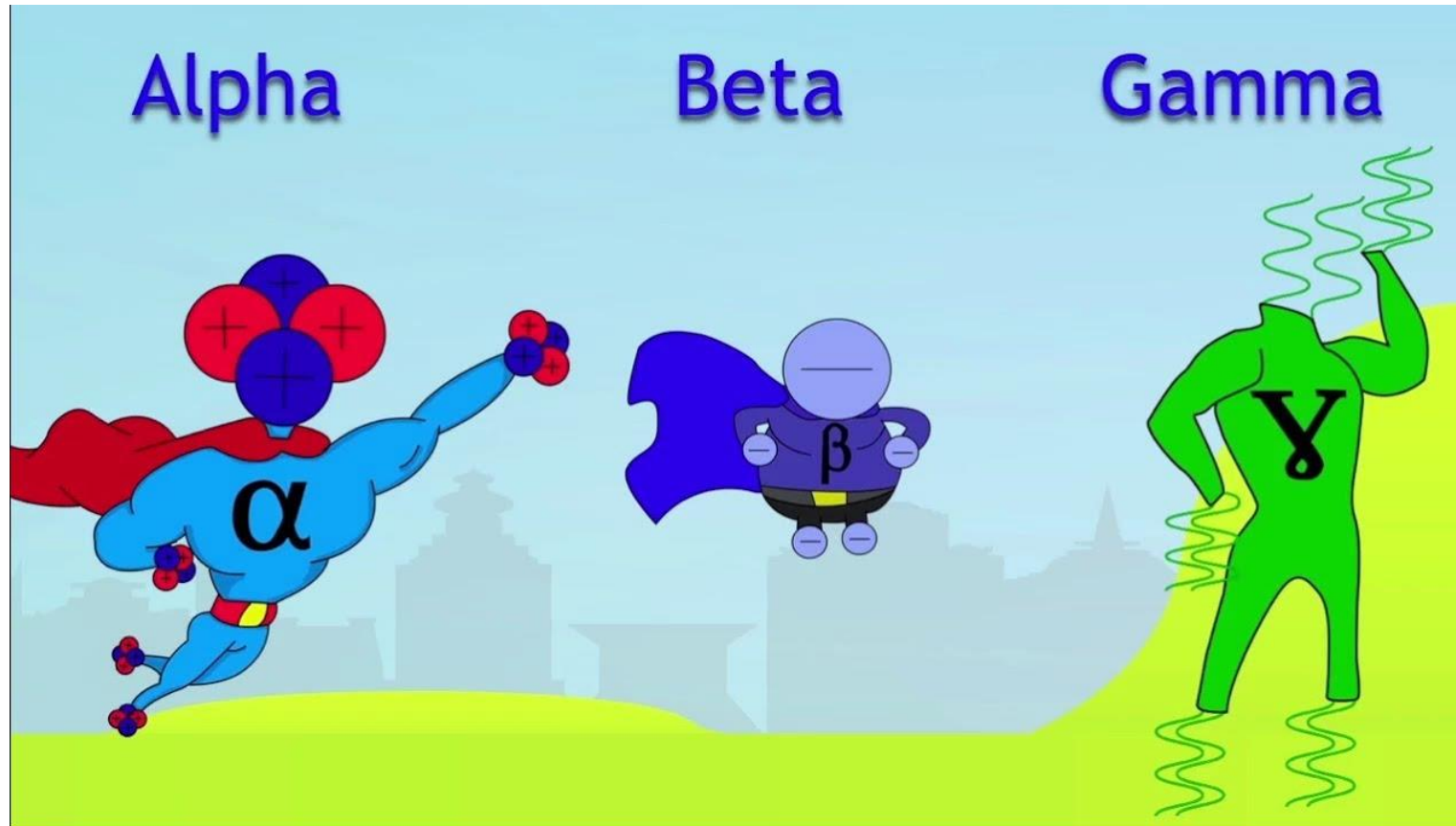
- ❖ Il existe notamment 2 sortes de particules : des particules de **matière** et des particules **d'antimatière**
- ❖ On ne peut pas créer/faire disparaître une particule de matière sans faire disparaître une particule d'antimatière de la même famille et inversement

	Matière	Antimatière
Hadrons	Proton	Antiproton
	Neutron	Antineutron
Leptons	Électron	Positron
	Neutrino	Antineutrino

- ❖ **Photon (γ)** : c'est une particule **élémentaire**, **neutre** et sans **masse**. Elle est sa propre antiparticule. On peut créer/faire disparaître un photon sans créer/faire disparaître autre chose.



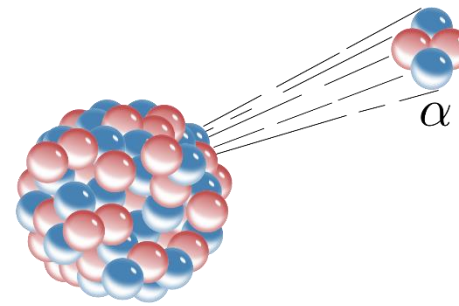
Types de radioactivité



Plus sérieusement maintenant !



Radioactivité α



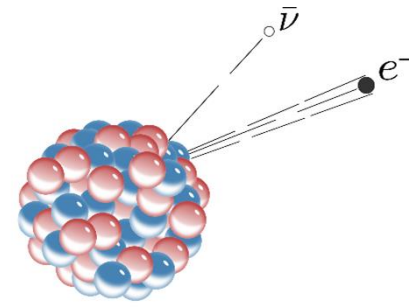
- ❖ Émission d'une particule lourde, qui est un **noyau d'Hélium**.
- ❖ Bilan de la réaction :



$$\begin{aligned} Q = \Delta mc^2 &= (M({}^A_ZX) - M({}^{A-4}_{Z-2}Y) - M({}^4_2\text{He}))c^2 \\ &= E_k(\alpha) + E_k(Y) + E_{\text{photon } \gamma} \end{aligned}$$



Radioactivité β^-



- ❖ Libération d'un **électron** lors de la réaction.
- ❖ Bilan de la réaction :



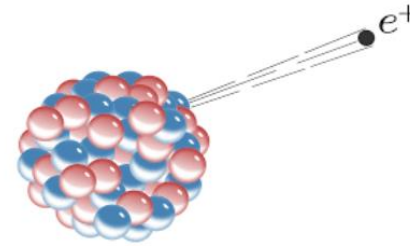
$$\begin{aligned} Q = \Delta mc^2 &= \left(M({}^A_Z X) - M({}^A_{Z+1} Y) \right) c^2 \\ &= E_k(Y) + E_k(e^-) + E_k(\bar{\nu}) \quad (+E(\gamma)) \end{aligned}$$

- ❖ **Attention** : Si on calcule Δmc^2 avec les masses nucléaires, il faut prendre en compte la masse de l'électron qui s'est perdue.

$$\Delta mc^2 = (m({}^A_Z X) - m({}^A_{Z+1} Y) - m_e) c^2$$



Réaction β^+



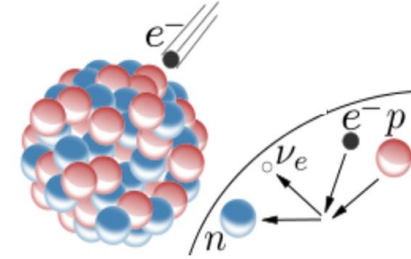
- ❖ Libération d'un **positron** lors de la réaction.
- ❖ Bilan de la réaction :



$$Q = \left(M \left({}^A_Z X \right) - \left[M \left({}^A_{Z-1} Y \right) + 2m_e \right] \right) c^2$$



Capture électronique



- ❖ Capture d'un électron par un proton pour donner un neutron et un neutrino :



- ❖ Bilan de la réaction :



$$Q = \Delta mc^2 = \left(M({}_Z^AX) - M({}_{Z-1}^AY) \right) c^2 = E_k(Y) + E_k(\nu_e)$$



CE versus β^+

- ❖ Une réaction est favorisée si elle est **exothermique** ($Q > 0$).
- ❖ Or $Q_{\beta^+} = \left(M \left({}^A_Z X \right) - \left[M \left({}^A_{Z-1} Y \right) + 2m_e \right] \right) c^2 = Q_{CE} - 2m_e c^2$
- ❖ Donc, pour que la réaction β^+ soit favorisée, il faut que $Q_{\beta^+} > 0$, soit

$$Q_{CE} = [M({}^A_Z X) - M({}^A_{Z-1} Y)]c^2 > 2m_e c^2$$

avec $2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$

- ❖ En conclusion, si :
 - $Q_{CE} > 1.022 \text{ MeV}$, alors la réaction peut être une β^+ ou une capture électronique
 - $Q_{CE} < 1.022 \text{ MeV}$, alors la réaction ne peut être **qu'une CE**



Loi de décroissance radioactive

❖ On la définit pour 2 variables :

- Nombre d'atomes en fonction du temps :

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

- Activité en fonction du temps:

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

Avec :

- N_0 et A_0 , respectivement, le **nombre d'atomes initial** et **l'activité initiale**.

On remarque que :

$$A_0 = \lambda N_0$$

$$(\text{car } A(t) = \lambda N(t))$$

- λ est la **constante radioactive**. Elle a comme unité : s^{-1}



Constantes notables

- ❖ **Constante radioactive**, notée λ . Elle correspond au nombre de désintégrations pendant un temps dt , rapporté au nombre de noyaux le composant.

$$\lambda = \frac{-\frac{dN}{dt}}{N} = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$$

$\lambda > 0$, or, $dN/dt < 0$, d'où le signe

- ❖ **Vie moyenne**, notée τ . Elle correspond à la durée moyenne de vie d'un noyau radioactif.

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

- ❖ **Période radioactive** ou **Demi-vie**, notée $t_{1/2}$. Elle correspond au temps nécessaire pour que 50% d'une population quelconque de noyaux se désintègrent.

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$



Exercice sur les activités

On considère une source radioactive contenant initialement $N_0 = 2 \cdot 10^{12}$ atomes. On la laisse reposer pendant 4h. Cette source a une demi-vie de 1h30. Calculer le nombre d'atomes restants au bout des 4h.

- A. $4,95 \cdot 10^9$ atomes
- B. $1,38 \cdot 10^{11}$ atomes
- C. $3,15 \cdot 10^{11}$ atomes
- D. $1,9 \cdot 10^{12}$ atomes
- E. $1,75 \cdot 10^{14}$ atomes





Correction

On applique la formule de la décroissance du nombre d'atomes en fonction du temps. Or, on a pas λ , mais la demi-vie

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Donc $\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$

On obtient donc la formule :

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} t}$$

$$\text{A.N. : } N(4h) = 2 \cdot 10^{12} e^{-\frac{\ln 2}{1,5 \times 3600} \cdot 4 \times 3600} = 2 \cdot 10^{12} e^{-\frac{\ln 2}{1,5} \cdot 4}$$

$$N(4h) = 3,15 \cdot 10^{11} \text{ atomes}$$

C: vrai



Exercices méthodiques :

- l) Le polonium $^{210}_{84}\text{Po}$ est un noyau instable, il résulte de sa dégradation un noyau de plomb Pb composé de 82 protons et 124 neutrons
- 1) Ecrivez l'équation de cette interaction. Quelle est la particule résultante ?
 - 2) De quel type est cette interaction ?

Ces 2 questions sont des questions de cours , si vous n'arrivez pas à les faire , relisez le cours et ça ira promis <3



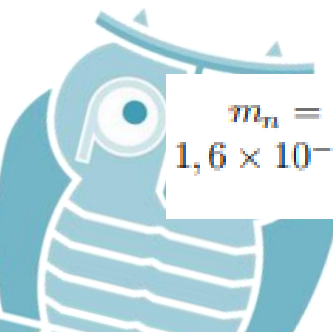
II) Ici on a 2 échantillons de noyaux : un échantillon de fluor (${}^{21}_{9}\text{F}$) et un échantillon de sodium (${}^{24}_{11}\text{Na}$).

1) Calculez les énergies de liaisons des deux noyaux (en MEV et en Joule).

2) Quel noyau est le plus stable ?

Pour la 1ère question c'est du cours, banale application de formule, attention à ne pas se tromper dans les chiffres !

Pour la 2ème c'est de la logique , petit tip : le volume d'un noyau et sa stabilité n'ont pas de corrélation



$$m_n = 1,00866u, m_p = 1,00727u, m({}^{24}\text{F}) = 20,99501u, M(\text{NaI}) = 150g/mol, N_A = 6,02 \times 10^{23} mol^{-1}, 1\text{MeV} = 1,6 \times 10^{-13} J, 1u = 931,5\text{MeV}/c^2, \lambda_{diss,Na} = 0.046/h$$

III) Un docteur (je vous autorise à voir loin :) prépare une solution d'iode de potassium NaI, avec Na ($A=24$) et I ($A=127$).

Il met une masse de $m = 150$ mg d'iode de potassium dans un volume d'eau $V = 1$ L (on aura donc une solution Na^+ , I^-) car l'iode de sodium se dissout entièrement en solution (pour dire que chaque noyau de NaI donnera un noyau de Na et un noyau de I).

Le docteur injecte ensuite un volume $V_1 = 5$ ml dans le sang du patient. (c'est pas beau je sais)

- 1) À $t = 0$, combien de noyaux de sodium ont été injectés ?
- 2) À $t = 0$, quelle est l'activité des noyaux de sodium dans le volume injecté ?

Le courrrrrs mes petits loulous le cours

Données :

$$m_n = 1,00866u, m_p = 1,00727u, m(^{24}\text{F}) = 20,99501u, M(\text{NaI}) = 150\text{g/mol}, N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}, 1\text{MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{J}, 1u = 931,5 \text{MeV}/c^2, \lambda_{\text{diss}, \text{Na}} = 0.046/\text{h}$$



5h après, le docteur prélève un volume $V_2 = 10\text{ml}$ de sang du patient.
L'activité du sodium dans cet échantillon est de $A = 6 \times 10^{10}\text{Bq}$

3) Quel est le volume du sang du patient ?

Allez y, faites rayonner votre esprit de physicien ;)

Données :

$$m_n = 1,00866u, m_p = 1,00727u, m(^{24}\text{F}) = 20,99501u, M(\text{NaI}) = 150\text{g/mol}, N_A = 6,02 \times 10^{23}\text{mol}^{-1}, 1\text{MeV} = 1,6 \times 10^{-13}\text{J}, 1u = 931,5\text{MeV}/c^2, \lambda_{\text{diss},\text{Na}} = 0.046/h$$



Correction :

I) Z

$$1) \quad A(Pb) = 124 + 82$$

$$Z(Pb) = 82$$

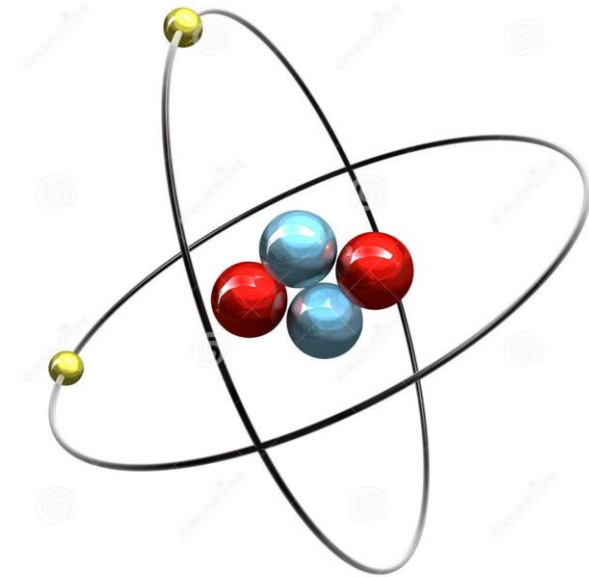


$$A = 210 - 206 = 4$$

$$Z = 84 - 82 = 2$$

Ce sont les caractéristiques de l'atome d'hélium .

La particule résultante est donc l'hélium



2) C'est une radioactivité α . Regarde ton cours, c'est toujours ce qu'il faut faire pour ce genre de question, ça tombe au concours et c'est des points faciles !

II) 1) Energie de liaison : $E_l = \Delta m * 931.5$ (résultat en MeV)

Pour transformer en J : on multiplie par $1,6 * 10^{-13}$

Pour le fluor :

$$\Delta m = 9 * 1,00727 + 12 * 1,00866 - 20,99501$$

$$\Delta m = 0,174u$$

$$E_l = 0,174 * 931,5 = 162,1 \text{ MeV}$$

$$E_l = 162,1 * 1,6 * 10^{-13} = 2,6 * 10^{-11} \text{ J}$$





- Pour le sodium :

$$\Delta m = 11 * 1,00727 + 13 * 1,00866 - 23,98493$$

$$\Delta m = 0,207$$

$$EI = 0,207 * 931,5 = 192,8 \text{ MeV}$$

$$EI = 192,8 * 1,6 * 10^{-13} = 3,1 * 10^{-11} \text{ J}$$

3) Le noyau le plus stable : on compare l'énergie de liaison divisé par le nombre atomique

$$EI/A (\text{sodium}) = 8.03 \text{ MeV/nucléole}$$

$$EI/A (\text{Fluor}) = 7.72 \text{ MeV/nucléole}$$

le sodium est plus stable que le fluor !



III)

1) Le nombre de noyaux injecté dans un litre est :

$$N = m/M * N_a = 0,150/150 * 6,023 * 10^{23} = 6,023 * 10^{20} \text{ noyaux}$$

le nombre de noyaux injectés dans le corps du patient :

$$N_0 = N/200 = 3 * 10^{18} \text{ noyaux } (1/200=5\text{ml}/1\text{L}) \text{ (Parce qu'on injecte 5ml de solution dans le sang de notre patient)}$$

2)

$$A_0 = \lambda * N_0 = 0,046/3600 * 30 * 10^{18} = 3,84 * 10^{14} \text{ bq}$$

On convertie le lambda en s⁻¹ pour que le résultat final soit en Bq



- 3) Pour calculer le volume après 5h, on commence par calculer l'activité du sodium dans le corps après 5h :

$$A(t = 5h) = A_0 * e^{-\lambda t} = 3,04 * 10^{13} \text{Bq}$$

On a donc : $3,04 * 10^{13} \text{Bq} \Rightarrow V$

et $6 * 10^{10} \text{Bq} \Rightarrow 10 \text{ml}$ soit 0,01L

Avec un calcul simple on trouve $V = 5 \text{L}$



Conseils pour bosser la radioactivité

- ❖ C'est l'une des parties les moins complexes à apprendre, il faut donc la bosser en priorité pour gagner du temps
- ❖ Par contre, les épreuves de radioactivité comportent beaucoup de pièges! Bien lire l'énoncé!
- ❖ Avoir une liste des constantes (masse des particules élémentaires, pondération tissulaire et de rayonnements...), elles ne sont pas données dans les sujets.
- ❖ Les calculs peuvent être longs (surtout pour énergies de liaison , ⚠ calculatrice)
- ❖ Comme pour tous les autres chapitres, il faut **CONNAITRE SES FICHES**.



Des questions ???

- ❖ Sur le programme, sur la physique abordée ou sur la P1 en général ?
- ❖ Surtout n'hésitez pas à demander maintenant ou après si vous n'avez pas le temps. IL N'Y A PAS DE QUESTION BÊTE.
- ❖ C'est normal de ne pas tout comprendre aujourd'hui, prenez votre temps. Le SPR n'est qu'une introduction, il y aura d'autres cours pendant l'année (SECH, ED...)



Merci de votre attention

et à Vendredi !

**Un remerciement à tous les BG tuteurs (*Beaux Gauss*) qui ont
contribué à la réalisation de ce SPR**

*Merci aux tuteurs des années précédentes pour le plus gros de ce
chapitre 😊*

