

NFI/GE2, Option « Energies Renouvelables ».
Technologie des réacteurs nucléaires, Examen.

F. Ravelet^a

^a *Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et Systèmes Energétiques,*
Arts et Metiers Institute of Technology,
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France.
contact: florent.ravelet@ensam.eu

14 avril 2022

Durée : 1h30.

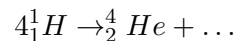
Documents autorisés : une feuille manuscrite recto-verso.

Calculatrices autorisées.

Les questions sont rédigées en italiques. Les 3 exercices sont indépendants.

1 Etude de la fusion nucléaire (7 points)

L'énergie des étoiles provient de réactions de fusion entre noyaux légers. Dans les étoiles jeunes, il s'agit principalement de la réaction :

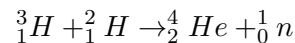


Question 1.1 :

Compléter l'équation bilan.

Question 1.2 :

Pour que cette réaction se produise, il faut vaincre la répulsion électrostatique entre les noyaux d'hydrogène, et pour ce faire avoir des températures très élevées (10 à 100 millions de degrés). Une autre réaction de fusion plus « facile » à mettre en œuvre est celle du deutérium avec le tritium. Le deutérium est l'isotope 2 de l'hydrogène ; il est stable et relativement abondant dans l'eau de mer. Le tritium est l'isotope 3 de l'hydrogène. Il est radioactif, de période 11.6 ans ; il s'en fabrique dans les réacteurs nucléaires par activation de l'eau, ou on peut en produire par réaction d'un neutron sur du lithium 6. La réaction est :



En utilisant les données du tableau 1, calculer la variation de masse au cours de la réaction de fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium. Donner sa valeur en unités de masse atomique.

Question 1.3 :

Déterminer l'énergie produite par cette réaction de fusion, donner le résultat en MeV.

Question 1.4 :

Vérifier que le nombre de noyaux présents dans 1 g de deutérium est (à peu près) 3×10^{23} noyaux.

Vérifier qu'il en est de même dans 1.5 g de tritium.

Question 1.5 :

En déduire l'énergie, en Joule, que l'on pourrait espérer obtenir si on réalisait la réaction de fusion de 1 g de deutérium avec 1.5 g de tritium.

Question 1.6 :

La tonne d'équivalent pétrole (tep) est une unité d'énergie utilisée dans l'industrie et en économie. Elle sert à comparer les énergies obtenues à partir de sources différentes. Une tep représente l'énergie libérée en moyenne par la combustion d'une tonne de pétrole, soit 4.2×10^{10} J.

Comparer l'énergie précédente à l'énergie libérée par la fission de 1 g d'uranium 235 qui est de 1.8 tep.

Question 1.7 :

Exprimer en MeV l'énergie emportée par le noyau d'hélium et celle emportée par le neutron. Comparer cette énergie du neutron à celle d'un neutron issu de fission.

1_0n :	1.0087 u
2_1H :	2.0136 u
3_1H :	3.0155 u
4_2He :	4.0015 u

TABLE 1 – Table de masse des réactifs et produits de la réaction de fusion deutérium-tritium. Rappels : u est l'unité de masse atomique et $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-2}$

2 Série radioactive et équilibre séculaire (7 points)

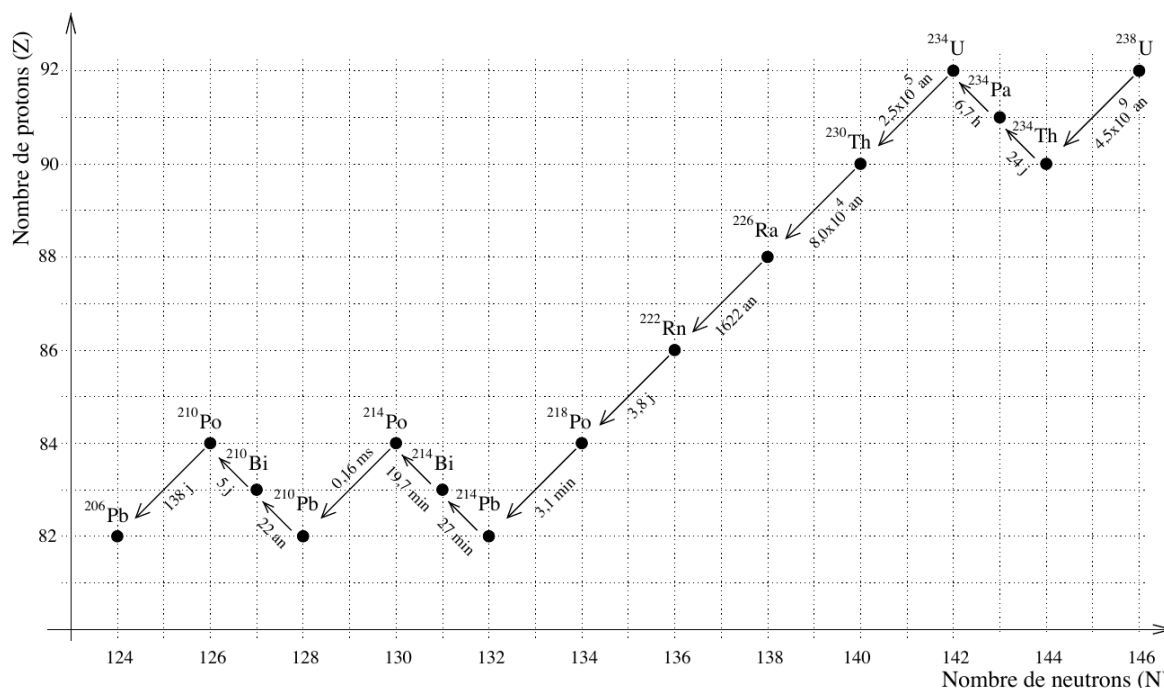
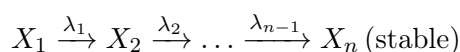


FIGURE 1 – Filiation de l'uranium 238. En une quinzaine d'étapes, on aboutit à l'isotope 206 du plomb, stable.

L'activité d'une substance donnée (isolée du milieu extérieur) n'est pas toujours décroissante dans le temps. Je vous propose d'étudier ici pourquoi. Lorsqu'un noyau est radioactif et qu'il se désintègre, il se transforme souvent en un noyau lui-même radioactif qui se désintègre à son tour. Cela donne lieu à une chaîne de désintégrations (aussi appelée série radioactive ou filiation), qui finit par aboutir à un noyau stable (voir exemple en figure 1) :



On cherche à calculer l'évolution du nombre de noyaux $N_i(t)$ de type X_i présents à l'instant t ; on notera la constante de décroissance radioactive λ_i . On se place dans le cas où l'échantillon ne contient initialement que des noyaux X_1 :

$$N_i(t=0) = 0, \text{ sauf pour } N_1(t=0) = N_{1,0}$$

Question 2.1 :

Rappeler l'équation d'évolution du nombre de noyaux pères $N_1(t)$.

Question 2.2 :

Rappeler sa solution analytique.

Question 2.3 :

Le noyau fille X_2 apparaît avec un taux égal au taux de disparition du noyau mère, et disparaît par décroissance radioactive. L'équation d'évolution du nombre de noyaux fils est donc :

$$\frac{dN_2}{dt} = +\lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t)$$

Identifier et justifier les différents termes de cette équation.

Question 2.4 :

Dans le cas où le noyau X_2 est lui-même radioactif et donne un noyau X_3 , donner l'équation d'évolution de $N_3(t)$ le nombre de noyaux X_3 .

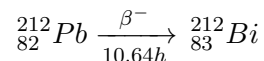
Question 2.5 :

On peut, dans le cas d'une chaîne simple, trouver par récurrence les solutions analytiques pour tous les $N_i(t)$. Ce système d'équations porte le nom d'équations de Bateman de la filiation simple. Cela permet par exemple de calculer l'évolution en fonction du temps de l'activité d'un fût de déchets radioactifs.

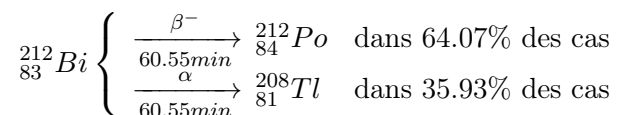
Rappeler la définition de l'activité A d'un échantillon de N noyaux radioactifs, et l'exprimer en fonction de N et λ .

Question 2.6 :

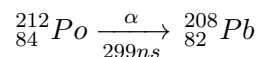
La chaîne du plomb 212 (descendant du thorium 232, utilisé expérimentalement à des fins médicales) est un peu plus compliquée. Ce noyau est radioactif β^- , avec une période de demi-vie de 10.64 h :



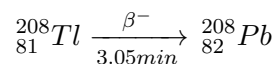
La complication vient du fait que le bismuth 212 a deux voies possibles de décroissance radioactive : une possibilité par radioactivité β^- , et une par radioactivité α :



Le Polonium 212 est un émetteur *alpha* de période 299 ns :



Le Thallium 208 est un émetteur β^- de période 3.05 min :



La chaîne s'arrête au plomb 208, stable. Une telle chaîne peut être modélisée avec Modelica, par exemple avec le modèle ci-dessous :

```

model Plomb

parameter Real T1=10.64*60;
parameter Real T2=60.55;
parameter Real T3=299e-9/60;
parameter Real T4=3.05;
parameter Real Po=64.07/100;
parameter Real Tl=35.93/100;

Real N1(start=T1/log(2));
Real N2(start=Modelica.Constants.eps);
Real N3(start=Modelica.Constants.eps);
Real N4(start=Modelica.Constants.eps);
Real N5(start=Modelica.Constants.eps);
Real A1,A2,A3,A4,Atot;

equation
A1=log(2)/T1 * N1;
A2=log(2)/T2 * N2;
A3=log(2)/T3 * N3;
A4=log(2)/T4 * N4;

der(N1)=-A1;
der(N2)=+A1-A2;
der(N3)=+A2*Po-A3;
der(N4)=+A2*Tl-A4;
der(N5)=+A4+A3;

Atot=A1+A2+A3+A4;
end Plomb;

```

Commenter ce code : quelle est l'unité de temps choisie, avec le choix de la condition initiale, quelle est l'activité initiale de l'échantillon, reconnaître les équations, discuter la façon dont est modélisée l'embranchement au niveau du bismuth 212,....

Question 2.7 :

Le résultat du calcul, intégré sur 20 heures est fourni en Fig. 2.

Quelle est l'activité maximale de l'échantillon ? Au bout de combien de temps est-elle atteinte ? Au bout de combien de temps revient-on à l'activité initiale ? Quelle est la principale source de radioactivité ? L'échantillon émet-il plus de particules α ou β ?

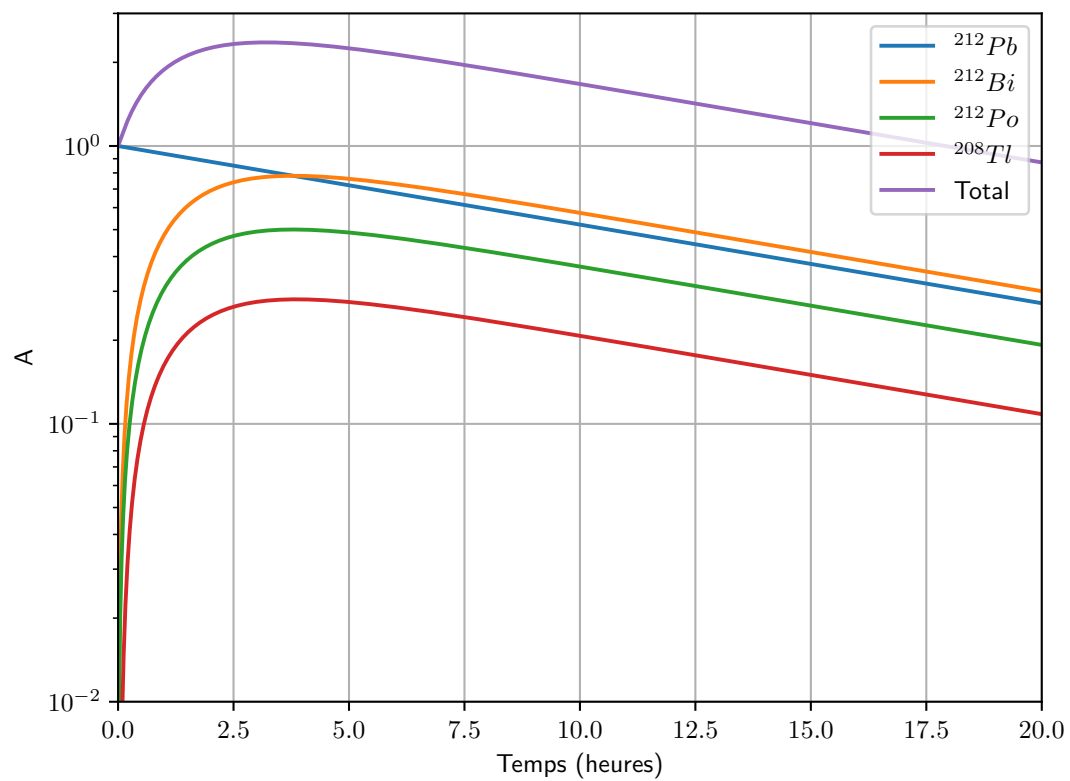


FIGURE 2 – Activité totale et activité due à chaque noyau dans un échantillon contenant uniquement du plomb 212 à $t = 0$. L'activité est normalisée par $A(t = 0)$.

3 Technologie des réacteurs (6 points)

Question 3.1 :

Quels sont les quatre composants se trouvant dans un cœur de centrale nucléaire ? Pour chacun, citer un exemple d'élément ou de matériau possible.

Question 3.2 :

A quoi sert un modérateur (recopier la bonne réponse) :

1. A modérer, c'est-à-dire à abaisser le taux de réaction en capturant des neutrons ;
2. A modérer, c'est-à-dire à favoriser les réactions en ralentissant les neutrons ;
3. A modérer, c'est-à-dire à absorber les rayonnements nocifs.

Question 3.3 :

Que signifie qu'un réacteur fonctionne en régime *critique* ? Quelle est la signification de la relation $k = 1$ (k est le facteur mesurant la criticité) ?

Question 3.4 :

Citer trois filières de réacteurs, donner leurs caractéristiques.

Question 3.5 :

Pourquoi doit-on avoir recours à un combustible enrichi pour la plupart des filières ?

Question 3.6 :

Quelle est la filière de réacteurs présente en France ? Faire un schéma (avec une légende) des éléments d'une centrale de ce type (ne pas tenir compte des circuits annexes et de sécurité). Décrire le rôle des principaux éléments.