

### 3.2. La réaction d-t et le parcours de produits de réaction

Question optionnelle : On considère ici que le plasma est un mélange D-T dont les caractéristiques sont celles déterminées dans le cadre du BE n°1, c'est-à-dire une densité électronique de  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  et une température équivalente de 20 keV. Calculer l'ordre de grandeur du parcours des  $\alpha$  générés par la fusion D-T dans un tel milieu. Selon quel processus la particule  $\alpha$  reste-t-elle piégée dans le plasma ?

Le parcours  $\alpha$  par  $R_1 + R_2$  où :  $R_1 = \frac{9m_{i1}(K_B T)^2}{8\pi m_e n_e \alpha^2 \ln(\Lambda)} \ln\left(\frac{E_1(0)}{E}\right)$  et  $R_2 = \frac{E^2 m_i^2}{4\pi m_i \alpha^2 n \ln(\Lambda)}$

Les données numériques :

$$m_i = 4UA, \quad m_e = 1.675 \times 10^{-27} \text{ Kg}, \quad |\alpha| = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 2.3 \times 10^{-28} \text{ N.m}^2, \quad K_B T = 20 \text{ KeV}, \quad n_e =$$

$$10^{20} \text{ m}^{-3}, \quad \Lambda = \frac{\lambda_D \mu U^2}{|\alpha|} \text{ avec } \lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r K_B T}{n_e e^2}} = 10^{-4} \text{ m} \Rightarrow \Lambda = 2.8 \times 10^{12}.$$

$$E_1(0) = 4 \text{ MeV} \text{ et } E = 3 \text{ MeV} \Rightarrow R_1 = 2.8 \times 10^4 \text{ m} \text{ et } R_2 = 6.0 \times 10^7 \text{ m}.$$

Enfin,  $R_1 + R_2 = 6.0 \times 10^7 \text{ m}$ .

⇒ La particule  $\alpha$  reste confinée dans le plasma.

Question à traiter : On considère ici que le plasma est un mélange D-T dont la densité est celle déterminée dans le cadre du BE n°1, c'est à dire  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ . Calculer l'ordre de grandeur du libre parcours moyen des neutrons dans le mélange sachant que la section efficace totale vers 14 MeV est de l'ordre de grandeur de 1 barn (on rappelle que 1 barn =  $10^{-24} \text{ cm}^2$ ). Quel est alors le seul futur possible pour les neutrons ?

Le plasma étant un mélange D-T de densité  $n = 10^{20} \text{ m}^{-3}$  donc  $n_D = n_T = \frac{n}{2} = 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ .

Calcul du libre parcours moyen :  $\lambda = \frac{1}{n_2 \times \sigma_{TOT}}$ , avec  $n_2$  le nombre de noyaux cibles par unité de volume et  $\sigma_{TOT}$  la section efficace totale de réaction.

Application numérique :

$$\Rightarrow \lambda = \frac{1}{n_2 \times \sigma_{TOT}} = \frac{1}{5 \times 10^{19} \times 10^{-28}} = 2 \times 10^8 \text{ m}.$$

Le libre parcours moyen est de l'ordre de quelques centaines de milliers de kilomètres ! Il n'y a pas de collision entre les particules donc les neutrons vont conserver toutes leurs énergies et fuir hors du cœur pour contribuer aux déchets nucléaires, d'où l'intérêt des protections neutroniques.

## 4.1. Flux de neutrons – Fusion

Question à traiter : En se rappelant que l'énergie totale de la réaction de fusion D-T est de 17.6 MeV, calculez la puissance totale thermique du système (on supposera le facteur  $Q = \infty$ ).

La puissance totale thermique du système est  $P_{th} = P_{inj} + P_{fus} + P_{fiss}$ .

En supposant que  $Q = \infty$  et puisque  $Q = \frac{P_{fus}}{P_{inj}}$ , alors  $P_{inj} = 0$  d'où  $P_{th} = P_{fus} + P_{fiss}$ .

On a :  $P_{fus} = E_{th} \times \tau$  avec  $\tau = \frac{dN}{dt} = 1.44 \times 10^{20} s^{-1}$  et  $E_{th} = 17,6 MeV$ .

Pour  $P_{fiss}$ , supposons que  $\psi = \frac{P_{fiss}}{P_{fus}} = 0,16$  (en prenant  $M = 1.2$ ).

Finalement,  $P_{th} = (1 + \psi) \times E_{th} \times \tau$ .

Application numérique :

$$\Rightarrow P_{th} = 1.16 \times 17.6 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.44 \times 10^{20} = 47.1 \times 10^7 W = 471 MW.$$

Cette valeur correspond bien à la puissance d'une centrale nucléaire qui varie généralement de quelques mégawatts à plusieurs milliers de mégawatts selon le type du réacteur.

Question à traiter : À partir du flux de neutrons en énergie simulé dans le divertor, estimer un ordre de grandeur pour le flux de neutrons total, c'est à dire intégré sur l'énergie.

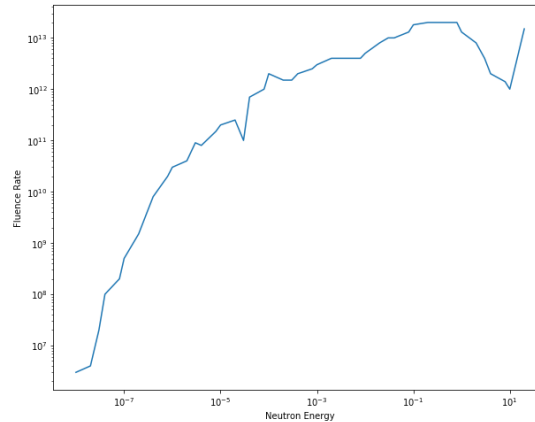
La figure 3 représente 4 courbes du flux de neutrons en énergie simulé dans les structures du Tokamak, pour 4 modèles de simulation. On remarque que pour les modèles 1, 2 et 3 les courbes se superposent quasiment. Pour retrouver un ordre de grandeur pour le flux de neutrons total, on peut procéder par intégration sur les énergies.

L'énergie totale de fusion d'une réaction D-T est de  $E_{tot} = 17.6 MeV$ .

$$\Rightarrow \varphi_{tot} = \int_0^{E_{tot}} \phi(E) dE.$$

Graphiquement, on peut avoir une approximation de cette intégrale en faisant la somme des différentes valeurs des points marqués sur le graphe.

On peut opter à une résolution numérique en utilisant des approximations d'intégrale qui sont prédéfinies dans la librairie *scipy* de *Python*.



```
In [56]: '%.2E' % Decimal(simps(FR,E))
```

```
Out[56]: '1.01E+14'
```

*Figure 1 - Reproduction du graphe avec Python*

On obtient la valeur :

$$\Rightarrow \varphi_{tot} = \int_0^{E_{tot}} \phi(E) dE = 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Question à traiter : Que pouvez-vous dire, au premier ordre, sur la comparaison entre le flux de neutrons dans un réacteur à fission et un réacteur à fusion ?

La Figure 4 représente le flux de neutrons simulé dans un REP (réacteur à eau sous pression) et un RNR (réacteur à neutrons rapides).

Le réacteur à eau pressurisée (REP) se nourrit de l'énergie produite par la fission des atomes présents dans le cœur nucléaire. On remarque que le flux de neutrons pour des faibles valeurs d'énergie (de l'ordre de  $10^{11}$  neutrons par  $\text{cm}^2$  par  $\text{s}$ ) est comparable à celui d'un réacteur à fusion. A hautes valeurs d'énergie, le flux de neutrons de fission atteint  $10^{13}$  neutrons par  $\text{cm}^2$  par  $\text{s}$  pour le réacteur à fission mais reste inférieur à celui du réacteur à fusion qui présente un pic au-delà de  $10 \text{ MeV}$ .

## 5.2. Comparaison fusion - fission

Question à traiter : À partir des éléments que vous avez à disposition, proposez une analyse argumentée sur la comparaison de la dangerosité des déchets nucléaires produits par les réacteurs à fission et ceux à fusion.

Les réactions nucléaires produisent des déchets plus ou moins dangereux selon leurs radioactivités et leurs durées de vie.

Les produits de la fission nucléaire sont dans la plupart des cas instables (actinides, plutonium...) et fortement radioactifs : on parle d'une émission des rayonnements gamma et beta, lors de l'activation, qui sont très énergétiques et donc dangereux pour l'environnement (modification d'ADN...). Ces déchets sont caractérisés par une activité de l'ordre de  $10^{12}$  Bq/g soit 1 térabecquerel par gramme et une durée de demi-vie supérieure à 31 ans (ils comprennent des HAVL).

En comparaison, les déchets issus de réaction de fusion nucléaire ont une activation faible. En outre, ils ont une durée de demi-vie plutôt courte. C'est pourquoi les déchets produits par les réacteurs à fusion sont moins dangereux que ceux produits par les réacteurs à fission.

## 5.3. Au global

Question à traiter : Tentez maintenant de caractériser la relation entre la masse de déchets nucléaires produits dans une centrale nucléaire à fusion et la quantité d'énergie électrique injectée sur le réseau.

Les réactions produisent des neutrons. Une partie de ces neutrons sont absorbés par les parois ce qui produit des déchets.

Ainsi, une grande quantité d'énergie injectée induit un grand nombre de réactions et donc une grande quantité de déchets nucléaires.

On en conclut que la masse de déchets nucléaires produits augmente avec la quantité d'énergie injectée dans le réseau.