

CCP Physique 1 PSI 2004 — Corrigé

Ce corrigé est proposé par Stanislas Antczak (Professeur agrégé) ; il a été relu par Karol Kozłowski (ENS Lyon) et Jean-Julien Fleck (ENS Ulm).

Ce sujet comporte deux problèmes totalement indépendants. Au sein de chacun des problèmes, de nombreuses questions sont elles-mêmes indépendantes, ce qui aide à la progression.

Le premier problème fait l'étude énergétique d'une unité de production nucléaire. Dans une première partie, on étudie du point de vue énergétique la réaction de fission de l'uranium 235. Ensuite, on étudie les différents circuits qui constituent l'unité, en faisant tout d'abord l'étude énergétique du cœur du réacteur, puis en s'intéressant au circuit primaire et enfin au circuit secondaire. Plusieurs versions de ce dernier sont étudiées. L'aboutissement de ce problème est le calcul du rendement global de la tranche nucléaire.

Ce problème ne fait pas appel à beaucoup de concepts de la thermodynamique, mais nécessite d'avoir une vision claire de ce qui se passe en pratique. Il est résolument axé sur une étude réaliste du fonctionnement de la tranche nucléaire ; beaucoup d'applications numériques sont demandées. L'énoncé n'est pas toujours clair, de sorte qu'il est nécessaire de le lire de nombreuses fois pour trouver le renseignement cherché (par exemple une donnée numérique), ce qui prend beaucoup de temps.

Le deuxième problème traite d'écoulements dans un canal, d'abord à hauteur constante, puis à hauteur variable, et enfin dans le cas où une onde de ressaut remonte le courant.

Ce problème est relativement classique et, là encore, une difficulté réside dans la désinvolture de l'énoncé, qui laisse parfois bien des libertés, parfois non – cela peut dérouter. Il importe de rester très rigoureux jusqu'au bout.

INDICATIONS

Problème A

- A.1.a L'énergie de liaison nucléaire est l'énergie libérée par la réaction de séparation du noyau en nucléons séparés.
- A.1.d Passer par l'intermédiaire d'une étape fictive où les nucléons sont séparés.
- A.1.f Un joule est égal à un watt.seconde.
- A.3.a Intégrer l'équation de la chaleur et utiliser la loi de Fick.
- A.3.e Faire une analogie avec les conductances en électricité.
- A.3.h Réutiliser le résultat de la question A.3.e.
- A.3.k La puissance produite par le cœur est de 2,6 GW. Ne pas oublier qu'il y a trois pompes primaires.
- A.4.a Faire le bilan d'enthalpie massique au niveau du condenseur, puis multiplier par le débit massique pour avoir la puissance évacuée.
- A.4.b Diviser la puissance thermique à évacuer par l'enthalpie massique évacuée pour obtenir le débit.
- A.5.a La surchauffe est le chauffage de la vapeur sèche.
- A.5.d Faire un bilan d'enthalpie massique au niveau de P2, puis multiplier par le débit pour obtenir la puissance apportée par P2. Procéder de même au niveau du GV.
- A.5.f On découpe la détente en deux ; entre-temps on resurchauffe le fluide.
- A.6.b (et jusqu'à A.6.f) Faire des bilans de puissance thermique aux points d'entrée et de sortie du fluide, avec $P_i = H_i D_i$.

Problème B

- B.1.e Utiliser le théorème de Bernoulli en deux points de la surface de l'eau, l'un dans le tube et l'autre ailleurs dans le canal.
- B.2.a Que donne le théorème de Bernoulli à la surface de l'eau ?
- B.2.e Où s'annule la dérivée de $Q(h)$?
- B.3.a Faire un dessin du système (S) à deux instants voisins.
- B.3.b Faire le bilan de la quantité de mouvement horizontale perdue en amont et gagnée au niveau de l'onde de ressaut.
- B.3.e L'air exerce sur le front de l'onde une pression constante.
- B.3.f Utiliser les lois de la dynamique pour relier les questions B.3.e et B.3.b.

A. ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE ET THERMODYNAMIQUE D'UNE TRANCHE NUCLÉAIRE FRANÇAISE REP 900 MW

1. Fission nucléaire, aspect énergétique

A.1.a L'énergie de liaison nucléaire est l'énergie nécessaire pour casser le noyau assemblé et obtenir ses constituants séparés. Pour un noyau ${}^A X_Z$, la réaction nucléaire qui a lieu est ${}^A X_Z \rightarrow Z p + N n$, dont le bilan énergétique est $(Z m_p + N m_n - m_X) c^2$. C'est cette énergie que l'on appelle l'énergie de liaison du noyau.

Pour l'uranium 235, cela donne :

$$B_N(\text{U5}) = (92 m_p + 143 m_n - m(\text{U5})) c^2$$

A.1.b L'équation de la réaction de fission peut s'écrire



L'énergie libérée par une réaction nucléaire s'écrit

$$Q_N = E_{\text{produits}} - E_{\text{réactifs}} = (m_{\text{produits}} - m_{\text{réactifs}}) c^2$$

L'énergie libérée par la fission est donc, ici :

$$Q_N = (m_{\text{PF1}} + m_{\text{PF2}} + (x - 1) m_n - m_{\text{U5}}) c^2$$

Il faut faire attention à ne pas oublier le neutron lent initiateur de la fission, car sinon le nombre x de neutrons libérés n'est pas le même. Cela n'a pas grande importance ici, mais cela en aura à la question A.1.d.

A.1.c Ici la réaction considérée est



Pour déterminer x , il faut écrire la conservation du nombre de masse A : on a

$$235 + 1 = 132 + 100 + x$$

d'où

$$x = 4$$

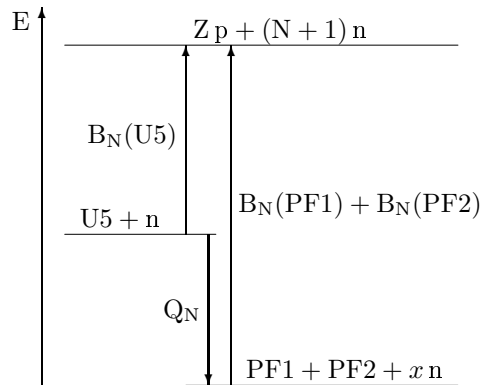
On calcule ainsi l'énergie libérée par la réaction :

$$Q_N = -173,34 \text{ MeV}$$

Cette énergie est négative : cela signifie que le système cède à l'extérieur de l'énergie (sous forme d'énergie cinétique), donc que la réaction est bien exothermique.

A.1.d Pour mieux comprendre le lien entre les énergies de liaison des noyaux et l'énergie moyenne libérée par la fission, on imagine que la réaction passe par l'intermédiaire des nucléons séparés. On doit donc d'abord fournir l'énergie de liaison de

U5 pour séparer ses constituants, puis on récupère l'énergie de liaison des produits de la fission lorsqu'ils se forment. Représentons les choses sur un diagramme en énergie :



On peut écrire pour chaque réaction de fission

$$Q_N = B_N(\text{U5}) - (B_N(\text{PF1}) + B_N(\text{PF2}))$$

On a donc besoin des énergies de liaison du noyau d'U5 et de celle de ses produits de fission.

L'énergie de liaison du noyau d'uranium vaut

$$B_N(\text{U5}) = 7,55 \times 235 = 1,77 \text{ GeV}$$

Les produits ont, à eux deux, $235 + 1 - 2,5 = 233,5$ nucléons en moyenne : en effet, les 236 nucléons du départ (les 235 de l'uranium plus le neutron lent) donnent les produits PF1 et PF2 plus en moyenne 2,5 neutrons. L'énergie de liaison moyenne des produits est, par conséquent,

$$B_N(\text{PF1}) + B_N(\text{PF2}) = 8,4 \times 233,5 = 1,96 \text{ GeV}$$

On peut à présent calculer Q_N comme expliqué ci-dessus :

$$Q_N = -187 \text{ MeV}$$

A.1.e Il s'agit de transformer une masse exprimée en MeV en masse exprimée en kilogrammes. On passe par l'intermédiaire des joules :

$$m c^2(\text{U5}) (\text{J}) = m c^2(\text{U5}) (\text{eV}) \times e$$

$$\text{d'où} \quad m(\text{U5}) = \frac{m c^2(\text{U5}) (\text{eV}) \times e}{c^2} = 3,902 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

Pour une mole d'atomes, cela donne

$$m(\text{U5}) \times N_A = 3,902 \cdot 10^{-25} \times 6,022 \cdot 10^{23} = 2,350 \cdot 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

La masse molaire de l'uranium 235 est donc

$$M_{\text{U5}} = 235,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

A.1.f Chaque réaction libère une énergie Q_N . Une mole de réactions libère donc une énergie totale $|Q_N| N_A$. Or, une mole d'atomes contient une masse d'atomes de M_{U5} grammes, donc l'énergie E_{U5} libérée par la fission d'un gramme d'uranium 235 est

$$E_{\text{U5}} = \frac{|Q_N| N_A}{M_{\text{U5}}} = 4,79 \cdot 10^{23} \text{ MeV}$$

ou encore

$$E_{\text{U5}} = 4,79 \cdot 10^{29} \text{ eV}$$