

EXERCICE 4 (6 points) (physique-chimie)

Au cœur d'un réacteur nucléaire

Actuellement, près de 65% de l'électricité produite en France est issue de centrales nucléaires. À l'intérieur de ces centrales, des réacteurs nucléaires produisent chacun une puissance électrique comprise entre 900 MW et 1450 MW.

Ces réacteurs, dont la structure schématique est représentée sur la figure 1, utilisent la même technologie : de l'eau sous pression sert à transporter vers le générateur de vapeur l'énergie produite par les réactions nucléaires. Cet exercice propose d'étudier certains aspects du fonctionnement d'un réacteur nucléaire.

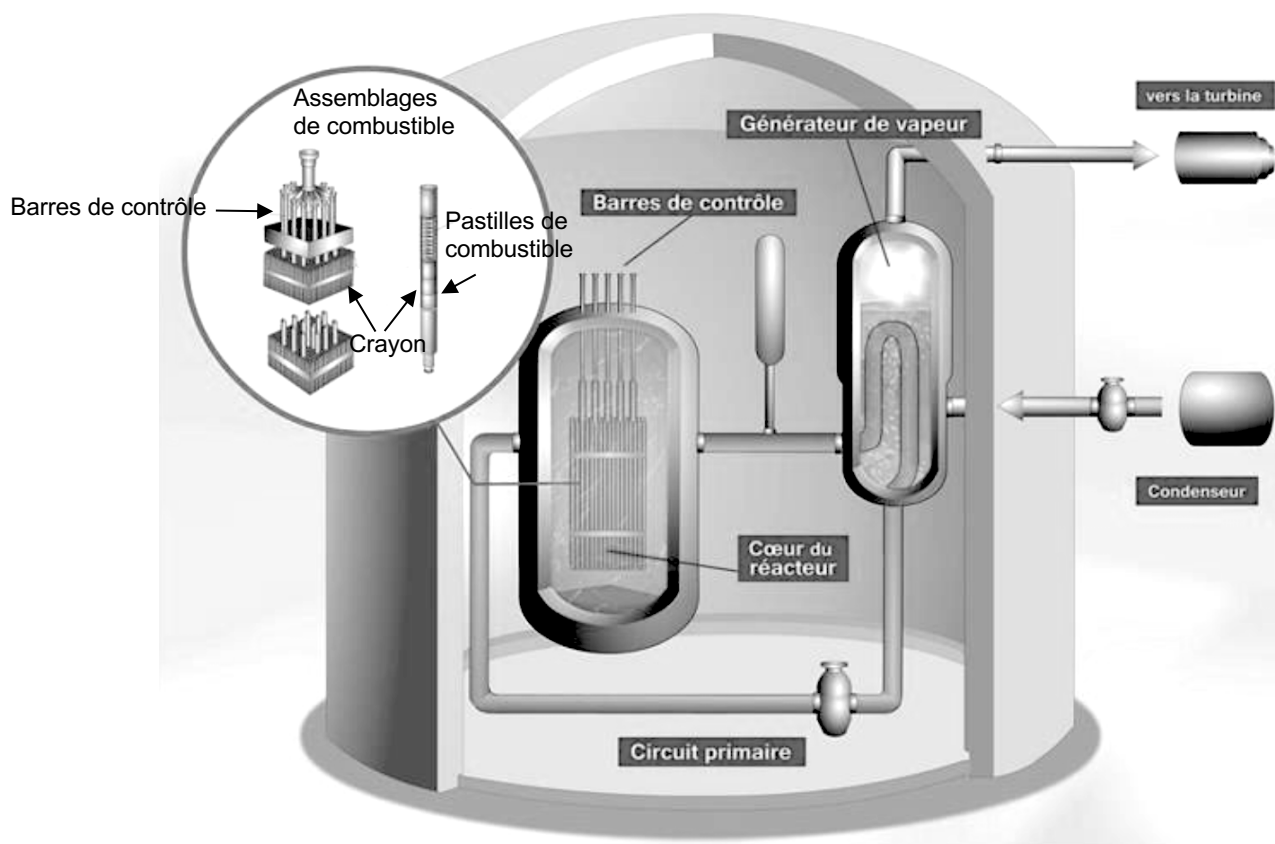


Figure 1 – Structure schématique d'un réacteur nucléaire

Partie 1 – Étude du combustible

Le combustible nucléaire présent dans le cœur du réacteur est constitué de dioxyde d'uranium, de formule UO_2 .

L'élément chimique uranium de symbole U, a pour numéro atomique 92.

L'uranium naturel existe sous la forme de trois isotopes : l'uranium 238, le plus abondant, l'uranium 235 et l'uranium 234. Dans le combustible nucléaire la proportion en masse d'uranium 235 doit être comprise entre 3% et 5%.

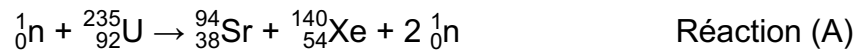
Données :

Une tonne d'uranium naturel contient :

- une masse $m_{234} = 0,056$ kg d'uranium 234 ($^{234}_{92}\text{U}$) ;
- une masse $m_{235} = 7,1$ kg d'uranium 235 ($^{235}_{92}\text{U}$) ;
- une masse $m_{238} = 992,8$ kg d'uranium 238 ($^{238}_{92}\text{U}$).

Q1. Montrer que la proportion d'uranium 235 dans l'uranium naturel est insuffisante pour le combustible nucléaire. Celui-ci doit donc être enrichi.

Par bombardement de neutrons, l'uranium 235 est le siège d'une transformation nucléaire libérant une grande quantité d'énergie. L'équation de réaction modélisant la transformation est la suivante :



Q2. À partir de l'équation de réaction (A), indiquer s'il s'agit d'une réaction de fission ou de fusion. Justifier la réponse.

Données :

- défaut de masse associé à la réaction (A) : $\Delta m = 2,39 \times 10^{-28}$ kg ;
- célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹.

Q3. Montrer que l'énergie ΔE libérée lors de cette réaction nucléaire par le noyau d'uranium 235, vaut approximativement $\Delta E = 2,2 \times 10^{-11}$ J.

Données :

- 1 kg de combustible UO_2 contient 70 g d'Uranium 235 ;
- masse d'un noyau d'uranium 235 : $m(^{235}_{92}\text{U}) = 3,90 \times 10^{-25}$ kg .

Q4. Calculer le nombre de noyaux d'uranium 235 contenus dans 1 kg de combustible UO_2 .

Q5. En déduire l'énergie libérée par la réaction (A) par kg de combustible UO_2 . Comparer la valeur obtenue au pouvoir calorifique du propane qui vaut $4,6 \times 10^7$ J.kg⁻¹. Commenter.

Partie 2 – Assemblage de combustible

Dans le cœur du réacteur se trouvent des assemblages de combustible. Chaque assemblage comporte 264 « crayons » combustibles composés chacun d'une gaine qui entoure un empilement de pastilles de dioxyde d'uranium UO_2 .

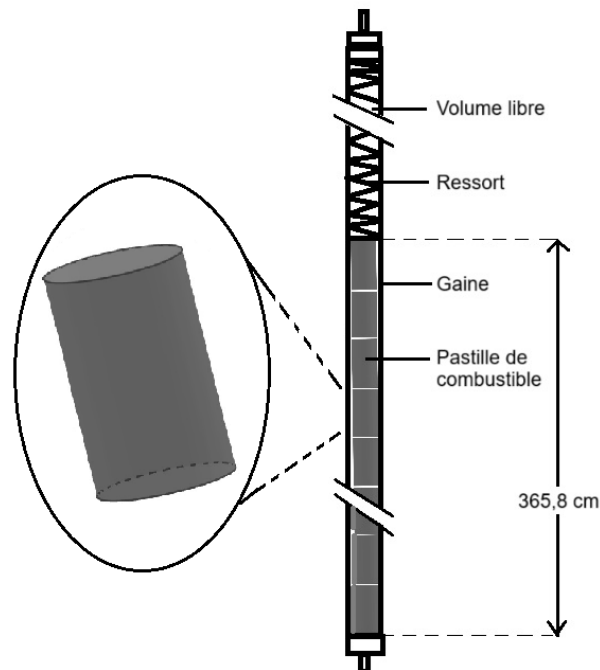


Figure 2 – Schéma d'un crayon combustible

Données :

- le réacteur nucléaire étudié est composé de 157 assemblages de combustible ;
- le volume de combustible dans chaque assemblage est égal à $V = 5,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3$.

Q6. Calculer la puissance P dégagée par l'ensemble du combustible dans ce réacteur, sachant que la puissance dégagée par unité de volume de combustible est de l'ordre de $4,0 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$.

Ce réacteur permet de produire une puissance électrique $P_e = 1100 \text{ MW}$.

Q7. Exprimer puis calculer le rendement de ce réacteur nucléaire.

Partie 3 – Pression de l'eau contenue dans la cuve du réacteur

Dans le cœur du réacteur, l'assemblage de combustible est plongé dans une cuve contenant de l'eau liquide. Cette eau permet de réguler la transformation nucléaire et d'assurer les échanges d'énergie dans le réacteur.

L'eau liquide entre dans la cuve à une température de l'ordre de 190°C et en ressort à environ 325°C après avoir reçu l'énergie thermique produite par la transformation nucléaire. Pour qu'elle reste liquide dans la cuve, l'eau se trouve sous une pression constante $P = 155$ bar.

La figure 3 ci-dessous représente le diagramme d'état (P, T) de l'eau.

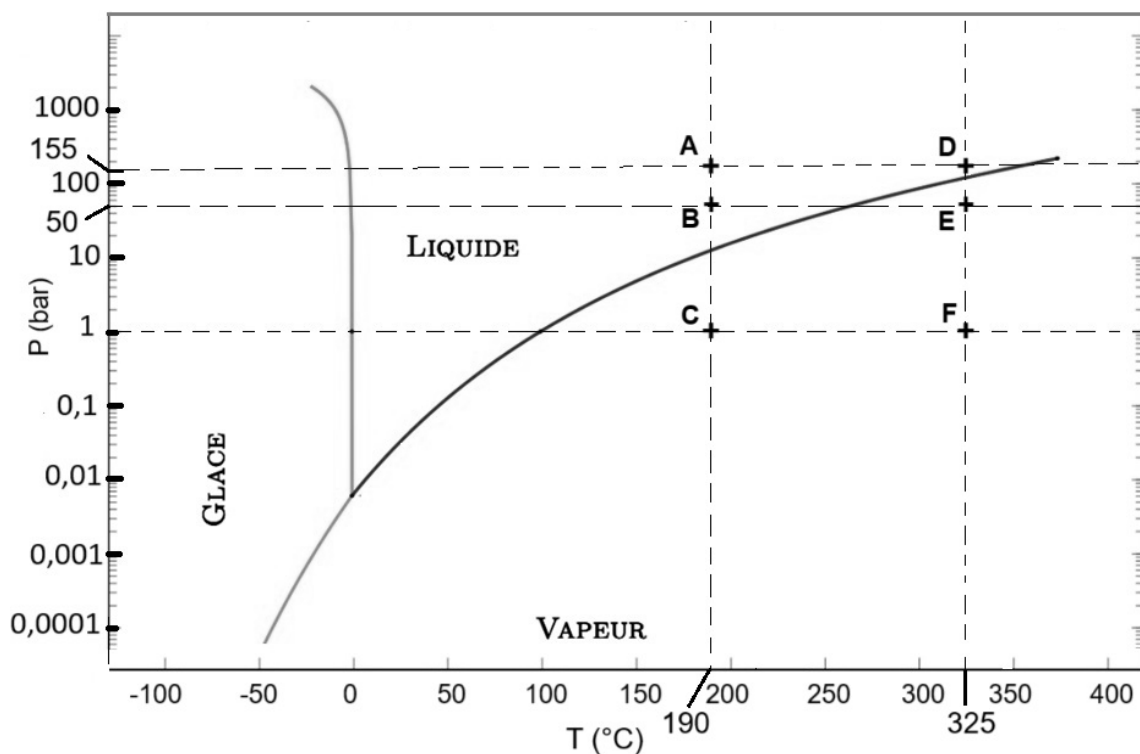


Figure 3 – Diagramme d'état (P, T) de l'eau

Q8. Justifier que le chauffage de l'eau dans la cuve est représenté par une transition du point A au point D sur le diagramme d'état (P, T) de l'eau.

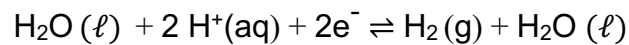
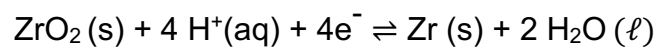
Q9. Expliquer pourquoi le réchauffement de l'eau liquide de 190 °C à 325 °C ne peut pas être réalisé à une pression de 50 bar.

Partie 4 – Protection du combustible

Pour des raisons de sécurité, le combustible nucléaire ne doit pas être en contact avec le reste du réacteur. La gaine qui entoure le crayon combustible est constituée d'un alliage appelé zircaloy, choisi pour sa résistance à la corrosion.

Dans la cuve, le zirconium Zr présent dans le zircaloy réagit avec l'eau qui l'entoure. Une réaction d'oxydoréduction se produit et conduit à la formation d'un oxyde de zirconium sur la surface de la gaine. Cette couche d'oxyde est imperméable à l'eau.

Les demi-équations des couples d'oxydoréduction mis en jeu au cours de cette transformation chimique sont :



Q10. Indiquer si le zirconium $\text{Zr}(\text{s})$ présent dans la gaine est un oxydant ou un réducteur. Justifier.

Q11. Écrire l'équation de la réaction d'oxydoréduction se produisant entre le zirconium $\text{Zr}(\text{s})$ et l'eau.

Q12. Expliquer pourquoi la couche d'oxyde de zirconium formée à la surface de la gaine permet de la protéger de la corrosion.