

DS 3 (4 heures)
Thermodynamique (Centrale)

La calculatrice est **autorisée**

La plus grande importance sera apportée au soin de la copie ainsi qu'à la clarté des raisonnements. Toute réponse, même qualitative, se doit d'être justifiée. Les affirmations, même justes, mais non justifiées ne seront pas prises en compte. Les résultats doivent être **encadrés**.

En cas de non respect de ces consignes, un malus sera attribué à la copie comme indiqué dans les tableaux suivants qui stipulent les critères et les effets sur la note le cas échéant :

Critère	Indicateur
Lisibilité de l'écriture	L'écriture ne ralentit pas la lecture.
Respect de la langue	La copie ne comporte pas de fautes d'orthographe ni de grammaire.
Clarté de l'expression	La pensée du candidat est compréhensible à la première lecture.
Propreté de la copie	La copie comporte peu de ratures, réalisées avec soin et les parties qui ne doivent pas être prises en compte par le correcteur sont clairement et proprement barrées.
Identification des questions et pagination	Les différentes parties du sujet sont bien identifiées et les réponses sont numérotées avec le numéro de la question. La pagination est correctement effectuée.
Mise en évidence des résultats	Les résultats littéraux et numériques sont clairement mis en évidence.

Nombre de critères non respectés	Palier de Malus	Effet sur la note
0	0	aucun
1-2	1	-3.3%
3-4	2	-6.7%
5-6	3	-10%

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

Exercice 1 : Effets thermiques aux jonctions lors de frottements

Lorsque deux solides Σ_1 et Σ_2 glissent l'un contre l'autre, les jonctions s'échauffent à cause de la dissipation d'énergie associée aux frottements. Cet exercice s'attache à quantifier cet effet. Les données utiles ainsi qu'un formulaire sont regroupées en fin d'énoncé.

I – Diffusion thermique dans un milieu semi-infini

On considère pour l'instant un solide indilatable, homogène et semi-infini, situé dans le domaine $z \in [0, +\infty[$, latéralement limité par un cylindre de section s et de génératrices parallèles à \vec{e}_z (Fig. 1). On note λ la conductivité thermique du matériau dont est constitué le cylindre, ρ sa masse volumique et c sa capacité calorifique massique, quantités indépendantes de la température.

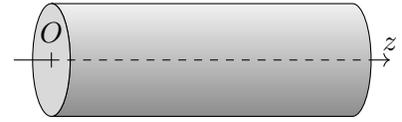


FIGURE 1 – Cylindre

Ce solide cylindrique, calorifugé latéralement, présente initialement une température uniforme T_0 et va recevoir de l'énergie thermique au travers de sa surface d'équation $z = 0$ seulement. Le rythme auquel ce transfert s'effectue sera précisé plus loin.

On analyse l'évolution de sa température T supposée ne dépendre que de z et du temps t . On note $\theta(z, t) = T(z, t) - T_0$ l'élévation de température provoquée par l'apport thermique.

Q.1 Montrer que l'élévation de température $\theta(z, t)$ obéit à l'équation aux dérivées partielles

$$\rho c \frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta(z, t)}{\partial z^2} \quad (1)$$

Que devient cette équation si λ dépend de la température T ?

I.A Milieu chauffé brièvement

Dans cette partie, le solide n'est chauffé que pendant une durée extrêmement brève entre les instants $t_0 - \delta t$ et $t_0 = 0$. Pendant ce très court échange, le solide reçoit la quantité de chaleur $\delta Q_0 = j_0 s \delta t$. Il en résulte une petite élévation de température notée $\delta \theta(z, t)$.

Q.2 Que vaut $\delta \theta(z, t)$ pour $t < -\delta t$ et $z \geq 0$?

On pose $G(z, t) = \frac{B}{\sqrt{t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4Dt}\right)$ avec $D = \frac{\lambda}{\rho c}$.

Q.3 Vérifier que la fonction $\delta \theta(z, t) = G(z, t) \delta t$ est solution de l'équation aux dérivées partielles (1).

Q.4 Exprimer la variation de l'énergie interne U du solide entre un instant $t_1 < -\delta t$ et un instant $t_2 > 0$, d'une part en fonction de j_0 , d'autre part en utilisant $G(z, t)$. En déduire l'expression de B en fonction de j_0 , expression que l'on simplifiera en introduisant l'effusivité thermique $e = \sqrt{\lambda \rho c}$.

Q.5 Plaçons-nous maintenant dans la situation où le très bref échange thermique δQ_0 a lieu à un instant $t_0 > 0$. Exprimer $\delta \theta(z, t)$ en distinguant deux intervalles de temps.

I.B Milieu chauffé continument

Le système est maintenant chauffé sans interruption à partir de l'instant initial avec une densité de flux thermique j_0 fonction du temps.

- Q.6** Quelle quantité de chaleur δQ_0 est reçue par le système entre $t_0 - \delta t$ et t_0 ? Quelle élévation de température $\delta\theta(z, t)$ cela provoque-t-il à la cote z à un instant $t > t_0$?
- Q.7** En déduire, sous la forme d'une intégrale, l'élévation de température $\theta(z, t)$ produite par l'apport thermique ininterrompu depuis l'instant initial.

Dans le cas particulier où j_0 ne dépend pas du temps, le calcul de l'intégrale précédente, non demandé, conduit à la relation suivante :

$$\theta(z, t) = \frac{2j_0\sqrt{t}}{e\sqrt{\pi}} f\left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2)$$

où f est une fonction dont le graphe est fourni sur la Fig. 2.

- Q.8** Exprimer l'élévation de température $\theta(0, t) = T(0, t) - T_0$ de l'interface $z = 0$. La profondeur δ , caractéristique de l'échauffement à un instant t est définie par $\theta(\delta, t) = \frac{1}{2}\theta(0, t)$. En donner une expression approchée.

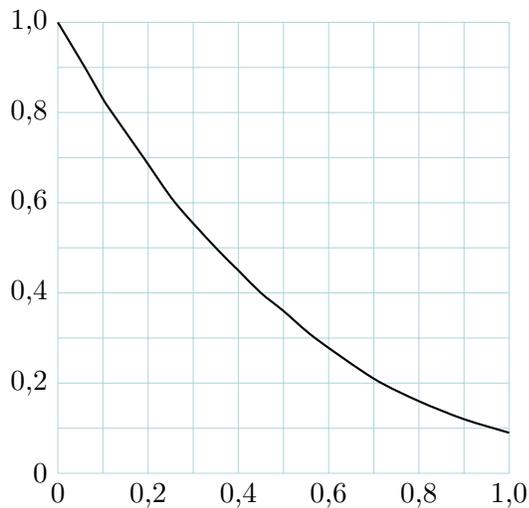


FIGURE 2 – Graphe de la fonction f

II – Production d'énergie thermique par frottements

On étudie dorénavant la situation où deux cylindres \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 identiques au précédent, occupant respectivement les régions $z > 0$ et $z < 0$, s'échauffent à cause des frottements sur leur interface $z = 0$. On note s l'aire de cette interface, $\Phi_1 = j_1 s$ et $\Phi_2 = j_2 s$ les flux thermiques reçus par chacun d'eux.

Pour simplifier, on suppose que \mathcal{C}_1 glisse sur \mathcal{C}_2 immobile et que les deux solides n'échangent d'énergie que l'un avec l'autre, leur ensemble étant isolé thermodynamiquement du reste de l'univers. Soit p_s la puissance surfacique négative des forces de frottement exercées par \mathcal{C}_2 sur \mathcal{C}_1 .

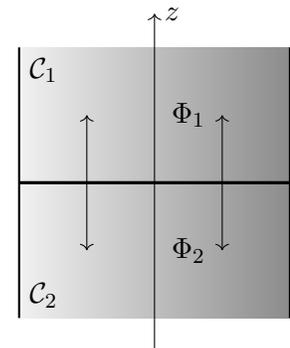


FIGURE 3 – Deux solides en contact

- Q.9** On note $\mathcal{E}_i = U_i + E_{ci}$ avec $i \in \{1, 2\}$ l'énergie totale du cylindre \mathcal{C}_i , composée de ses énergies interne et cinétique. Appliquer le premier principe de la thermodynamique à chacun des deux solides entre deux instants séparés de dt .
- Q.10** Appliquer le premier principe à l'ensemble des deux solides.

Q.11 En déduire une relation entre p_s , j_1 et j_2 .

III – Application aux jonctions

Le modèle développé dans les questions précédentes permet d'estimer l'échauffement des jonctions lorsque \mathcal{C}_1 glisse sur \mathcal{C}_2 à la vitesse v . Dans ce cas, on note τ_c la force tangentielle par unité de surface exercée par \mathcal{C}_2 sur \mathcal{C}_1 . La puissance surfacique correspondante s'exprime par $p_s = -\tau_c v$.

Q.12 Quand \mathcal{C}_1 et \mathcal{C}_2 sont formés du même matériau avec le même état de surface, donner l'expression de j_1 et de j_2 en fonction de p_s .

Q.13 Les jonctions ont un diamètre de l'ordre de 0,1 mm. Quelle est la durée τ du contact si $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$?

Pour estimer les effets thermiques au niveau des jonctions, on utilise les résultats de I.B à l'instant $t = \tau$.

Q.14 Comparer quantitativement les propriétés de l'acier, du granit et du Téflon en calculant l'élévation de température de l'interface et la profondeur δ à la fin du contact.

Q.15 Analyser la pertinence de l'approximation qui consiste à supposer les deux milieux semi-infinis pour étudier la diffusion thermique dans chaque jonction.

Exercice 2 : L'énergie électrique d'origine nucléaire

Le but de ce problème est d'étudier, en tant que scientifique non expert du sujet, quelques aspects d'une centrale nucléaire de type EPR (signifiant Evolutionary Pressurised water Reactor), qui est un type de réacteur à eau pressurisée (REP).

Les deux parties du problème sont largement indépendantes, mais les données numériques fournies dans les différentes parties sont susceptibles d'être utilisées dans toutes les parties. Les applications numériques seront faites avec un nombre de chiffres significatifs adapté. Les données numériques sont fournies en fin d'énoncé.

Certaines questions peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré par une barre en marge. Il est alors demandé d'explicitier clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

Autorité de Sécurité Nucléaire, informations mises à jour en février 2018

Les 19 centrales nucléaires actuellement en fonctionnement en France ont été globalement construites sur le même mode. Tous leurs réacteurs utilisent la même technologie, dans laquelle de l'eau sous pression sert à transporter la chaleur produite par les réactions nucléaires. [...] Les centrales nucléaires regroupent un total de 58 réacteurs dont 34 produisent chacun une puissance électrique de 900 MégaWatt (MWe) — 900 MWe permet d'alimenter près de 500000 foyers. À cela s'ajoutent 20 réacteurs de 1300 MWe, tandis que les quatre derniers délivrent 1450 MWe. Un 59ème réacteur est actuellement en construction à Flamanville, dans la Manche. De type EPR (Evolutionary Pressurised water Reactor), il développera une puissance électrique de l'ordre de 1600 MWe. Actuellement, ces installations produisent près de 80% de l'électricité produite en France.

Le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire est représenté FIGURE 4. Le réacteur chauffe une certaine quantité d'eau qui circule, en boucle fermée, dans le circuit primaire. L'eau du circuit primaire permet de vaporiser l'eau contenue dans le circuit secondaire dont la circulation assure la rotation de turbines couplées à

des alternateurs. Le circuit tertiaire est utilisé pour liquéfier l'eau du circuit secondaire en sortie des turbines, avant qu'elle ne soit à nouveau injectée dans les générateurs de vapeur.

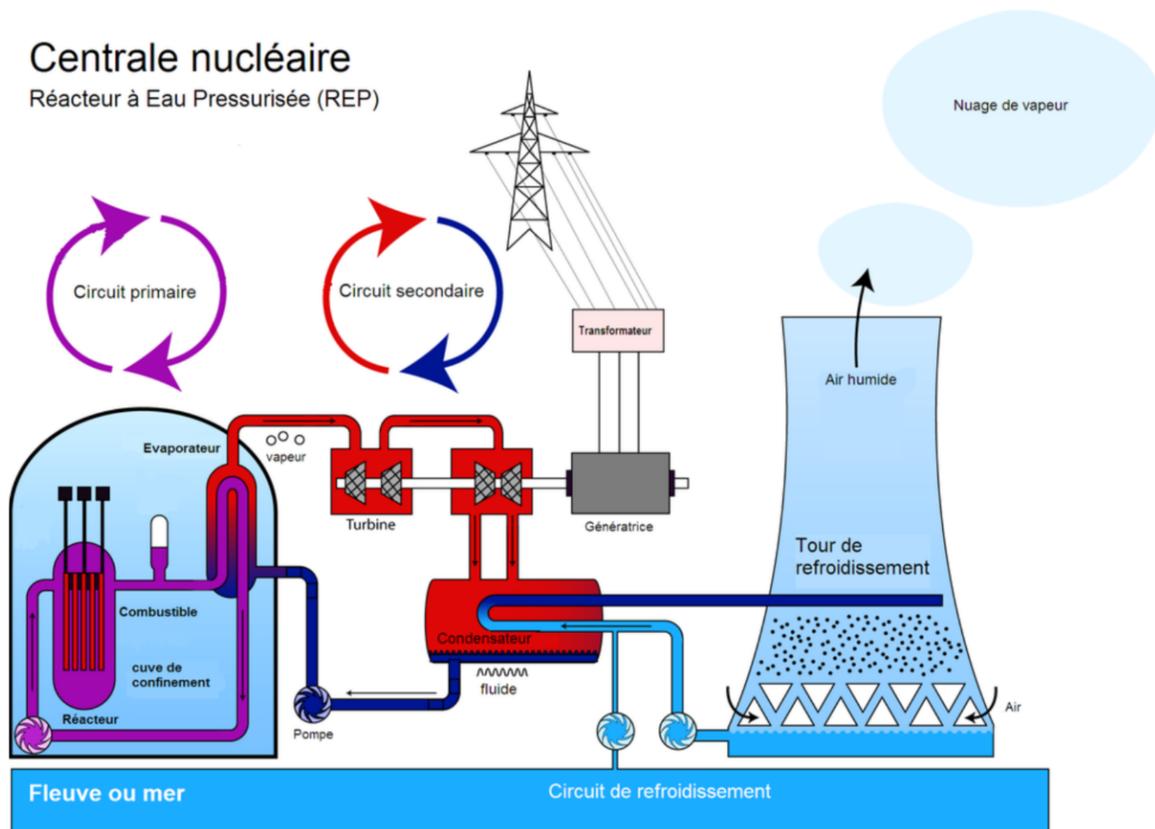


FIGURE 4 – Principe d'une centrale nucléaire

I – Le cœur du réacteur

Au cœur d'une tranche de centrale (qui comporte en général 2 ou 3 tranches), le combustible nucléaire est sous forme de pastilles cylindriques. Ces pastilles sont regroupées en crayons, eux-même réunis en assemblages (FIGURE 5). Un assemblage contient 600 kg de dioxyde d'uranium enrichi. Un cœur de réacteur est l'association de 241 assemblages.

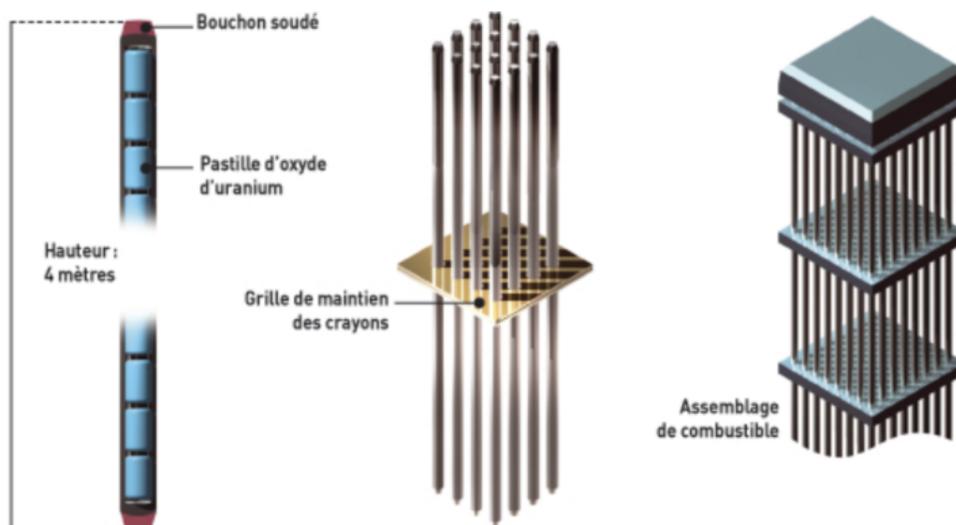


FIGURE 5 – Assemblage de combustible

I.A Quelques analyses préliminaires

- Q.1** Pourquoi produire le combustible sous forme de pastilles au lieu de cylindres prêts à mettre dans la gaine du crayon ? Quel est l'intérêt de faire une multitude de petits crayons de combustibles plutôt que quelques-uns, plus gros ?
- Q.2** Un assemblage est un quadrillage de 17×17 emplacements. Or, il ne contient que 265 crayons de combustible. À quoi peuvent servir les autres emplacements ?
- Q.3** Vérifier que la surface totale d'échange entre l'eau du circuit primaire et les crayons indiquée dans les données (environ 8000 m^2) est cohérente avec la structure du cœur du réacteur.

I.B Approche théorique

On modélise un crayon radioactif par un cylindre d'axe (Oz) et de rayon R dans lequel les réactions nucléaires produisent une puissance volumique uniforme. Le régime est considéré stationnaire. On utilise le système de coordonnées cylindriques d'axe (Oz) : (r, θ, z) .

- Q.4** Justifier que la température est une fonction de r uniquement. Que peut-on en déduire sur la densité de courant thermique \vec{j} ?
- Q.5** La FIGURE 6 présente quatre profils de température à l'intérieur du crayon, ainsi que les expressions analytiques de $T(r)$ associées (pour chacune de ces expressions, la constante K est une constante positive). Parmi ces profils, quel est le seul susceptible de correspondre au crayon radioactif étudié ? Justifier votre réponse à partir d'arguments qualitatifs uniquement.

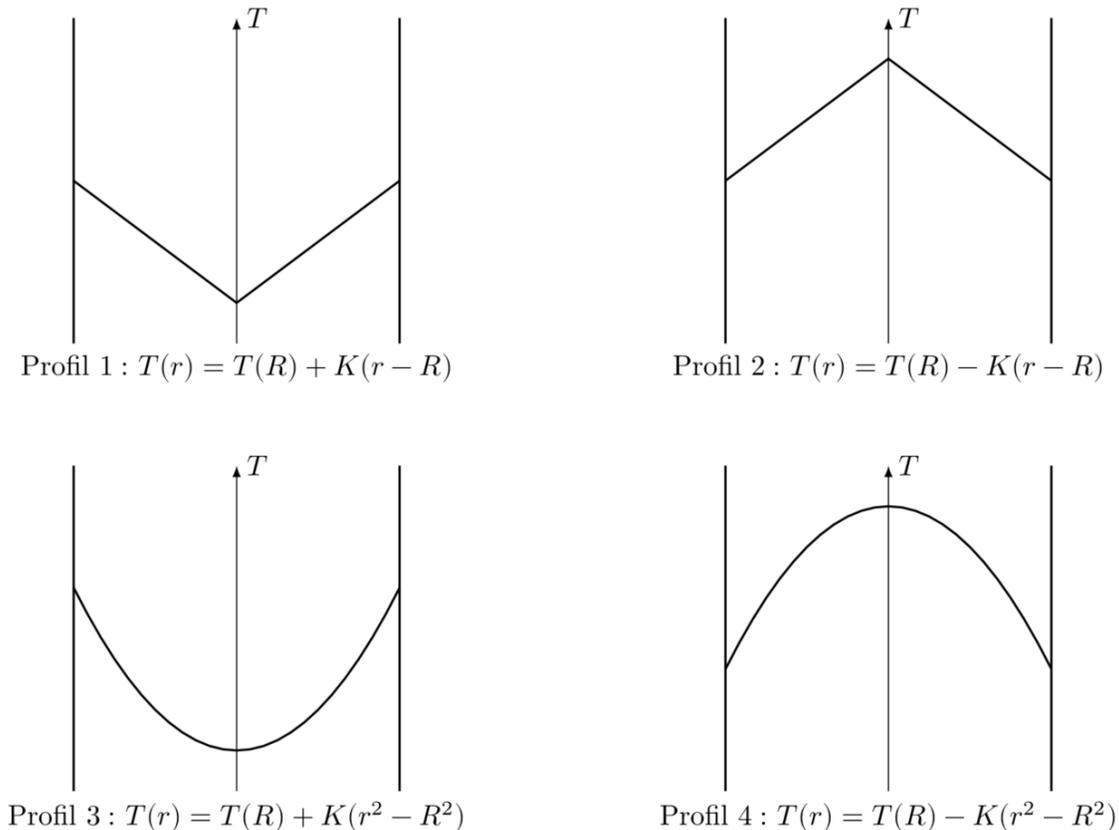


FIGURE 6 – Profils de température

- Q.6** En admettant que le profil identifié représente réellement le champ de température à l'intérieur du crayon, relier la constante K aux grandeurs physiques pertinentes dont les valeurs numériques sont données en fin d'énoncé.
- Q.7** À l'aide des caractéristiques du cœur fournies, proposer une estimation de la puissance volumique libérée dans le combustible lorsque le réacteur est en fonctionnement nominal.
- Q.8** Proposer une définition plausible de la puissance linéique. Confirmer (ou non) cette définition par un calcul d'ordre de grandeur (une page maximum). Comment expliquer l'existence d'une puissance linéique maximale ?
- Q.9** En supposant que la température en $r = R$ est celle de l'eau au voisinage des crayons, calculer numériquement la température au centre du crayon (en $r = 0$). Commenter.
- Q.10** Pourquoi la température en $r = R$ ne vaut-elle pas exactement la température de l'eau indiquée dans les données ?
- Q.11** À l'aide d'une démarche à préciser (une page maximum), proposer un modèle conduisant à une meilleure estimation de la température au cœur du crayon en tenant compte du constat précédent. Ne pas hésiter, pour cela, à introduire les grandeurs physiques pertinentes en proposant, le cas échéant, des ordres de grandeur raisonnables.
- Q.12** En réalité, la conductivité thermique du dioxyde d'uranium n'est pas indépendante de la température mais possède le profil donné FIGURE 7. Expliquer, de manière qualitative mais argumentée, de quelle manière est modifié le profil de température et, en particulier, si on peut s'attendre à une température plus élevée ou plus basse que celle calculée précédemment.

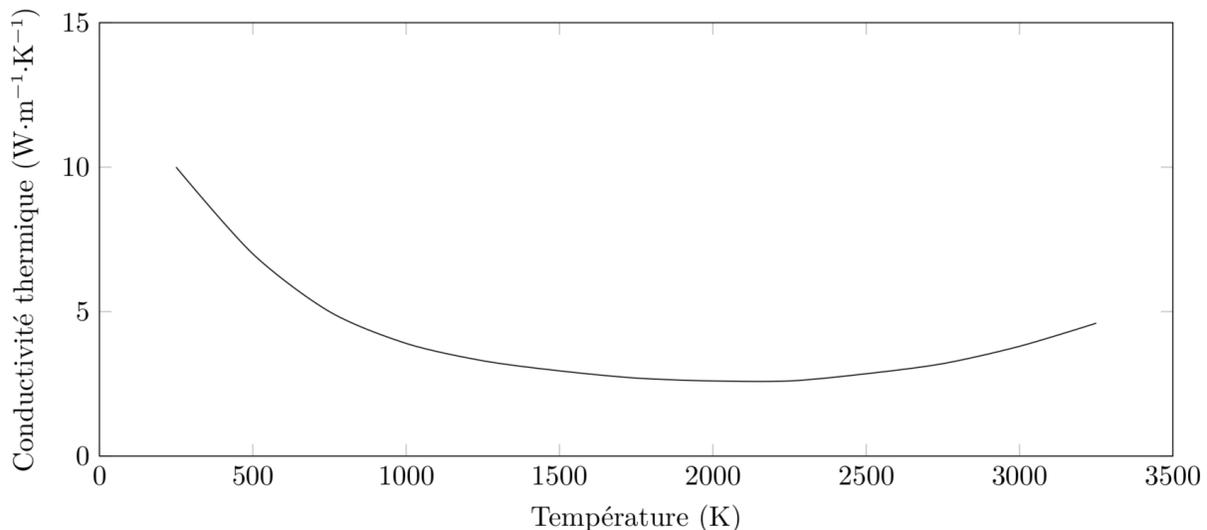


FIGURE 7 – Évolution de la conductivité thermique du dioxyde d'uranium

II – Du réacteur aux turbines

Au niveau du circuit secondaire, la centrale fonctionne comme représenté sur le schéma de la FIGURE 8. Dans ce schéma x désigne le titre de vapeur, c'est à dire le rapport entre le débit massique de vapeur d'eau et le débit massique total (liquide et vapeur).

Les échanges d'énergie avec le circuit primaire se font au niveau du générateur de vapeur (GV), dans lequel l'eau du circuit secondaire entre avec un débit R_0 , initialement à l'état (D). À la sortie du générateur de vapeur,

l'eau est sous forme de vapeur saturante (état A). La plus grande partie (débit R_1) est dirigée vers la turbine haute pression (HP); une autre (débit R_3) est destinée au surchauffeur. Dans la turbine haute pression, l'eau passe de l'état (A) à l'état (B). De là, l'eau passe dans un séparateur dont le seul rôle est de répartir les deux phases par gravité. En haut de ce séparateur sort de la vapeur saturante dans l'état (E), avec un débit R_2 , qui est ensuite surchauffée jusqu'à $T_F = 281\text{ °C}$ grâce à la liquéfaction totale jusqu'à l'état (F) d'une partie de la vapeur issue du générateur de vapeur. Une fois surchauffée, la vapeur dans l'état (F) passe dans une turbine basse pression (BP) dont elle sort à l'état (G). Elle est ensuite entièrement liquéfiée par échange thermique avec le circuit tertiaire (en général, de l'eau de rivière ou de mer) jusqu'à l'état (H). Avant d'être réinjectée dans le générateur de vapeur, un récupérateur-compresseur, récolte l'eau entièrement liquide issue du séparateur, du surchauffeur et du condenseur et les comprime jusqu'à l'état (D).

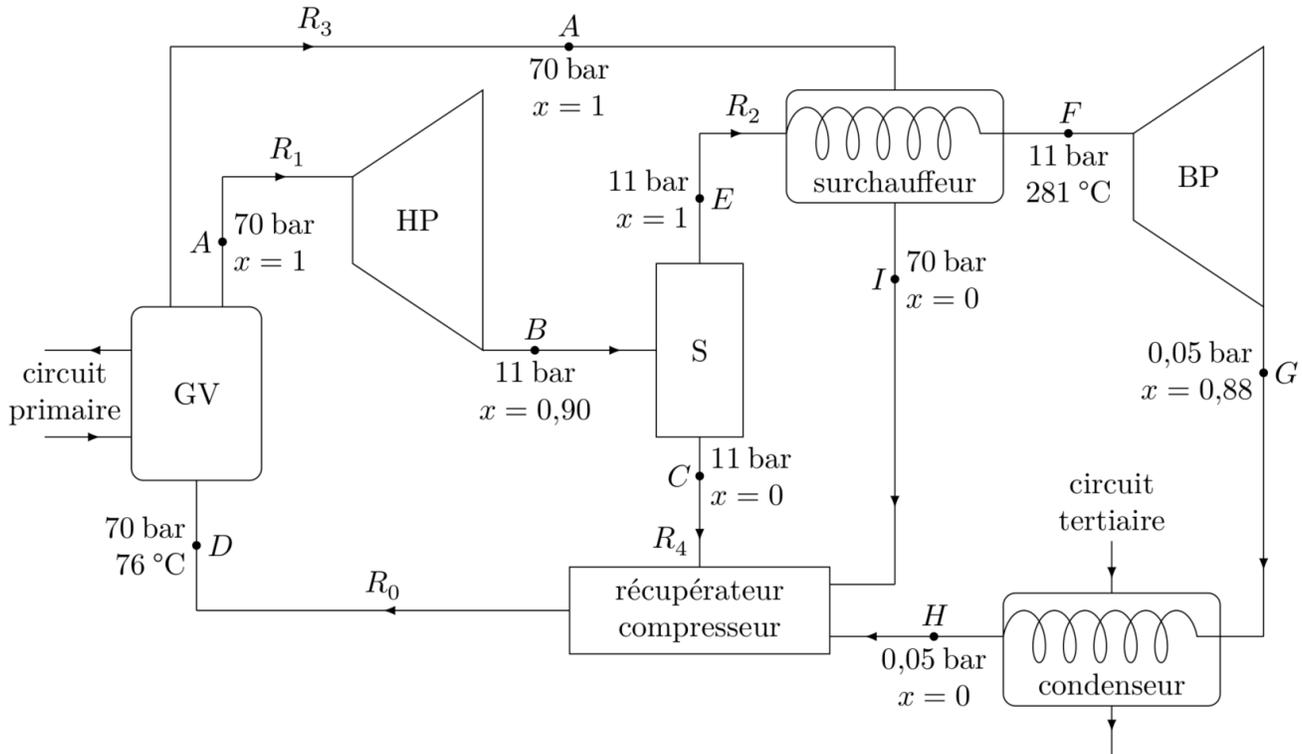


FIGURE 8 – Circuit secondaire d'une centrale nucléaire

II.A Approche générale

Soit un élément quelconque, avec une seule entrée et une seule sortie, pour lequel on note :

- R le débit massique de fluide à travers l'élément ;
- P_u la puissance fournie au fluide par les forces autres que pressantes ;
- P_{th} la puissance thermique fournie au fluide ;
- h_e l'enthalpie massique du fluide juste avant l'entrée ;
- h_s l'enthalpie massique du fluide juste après la sortie.

Q.13 Montrer que $R(h_s - h_e) = P_u + P_{th}$.

Dans le cas d'un élément comportant plusieurs entrées et sorties, le bilan précédent se généralise en :

$$\sum_{i(\text{sorties})} R_i h_{s,i} - \sum_{j(\text{entrées})} R_j h_{e,j} = P_u + P_{th}$$

II.B Analyse du cycle

- Q.14** Placer tous les états A, B, C, \dots, I sur le diagramme (T, s) de l'eau fourni dans le document réponse à rendre avec la copie.
- Q.15** Par lecture graphique, déterminer la valeur de l'enthalpie massique h_F de l'eau dans l'état (F) .
- Q.16** Calculer les valeurs des enthalpies massiques h_B et h_G à partir des données numériques fournies.
- Q.17** Estimer la valeur de l'enthalpie massique h_D .
- Q.18** Exprimer les relations simples qui existent entre les débits R_0, R_1 et R_3 , puis entre R_2, R_1 et x_B (titre de vapeur au point B) et enfin entre R_4, R_1 et x_B .
- Q.19** Le surchauffeur est un simple échangeur de chaleur entre deux fluides ; il n'y a donc aucune puissance mécanique mise en jeu. En supposant que le surchauffeur soit parfaitement calorifugé, trouver une relation entre les débits R_2 et R_3 faisant intervenir des enthalpies massiques à préciser.
- Q.20** Calculer numériquement les différents débits.

Les machines réalisant la compression ou la détente d'un fluide ont une conception très compacte pour des raisons de poids, d'encombrement et de coût. Pour les mêmes raisons, elles tournent très vite (plusieurs milliers de tours par minute).

- Q.21** Les transformations dans les turbines HP et BP sont-elles réversibles ? Justifier soigneusement votre réponse. Dans le cas où les transformations sont irréversibles, quelles sont les causes de cette irréversibilité ?

Le condenseur fonctionne de la même manière que le surchauffeur.

- Q.22** Déterminer l'expression du débit que doit avoir le circuit tertiaire pour que son élévation de température ne dépasse pas 5°C . Estimer puis commenter son ordre de grandeur. Justifier l'existence d'une limite supérieure de l'élévation de température.

II.C Rendement du cycle

- Q.23** Définir et calculer un rendement pour l'ensemble du circuit secondaire. Comparer ce rendement à d'autres rendements connus. (Pour information, chaque réacteur est en fait associé à 4 circuits secondaires identiques.)
- Q.24** À l'aide d'une démarche à préciser, déterminer une estimation du rendement que l'on obtiendrait en l'absence de surchauffeur. Commenter.

Formulaire

Intégrales connues :

$$\int_0^{\infty} e^{-u^2} du = \frac{1}{2}\sqrt{\pi} \quad ; \quad \int_0^{\infty} u e^{-\alpha u} du = \frac{1}{\alpha^2} \quad ; \quad \int_0^{\infty} u^{3/2} e^{-\alpha u} du = \frac{3\sqrt{\pi}}{4\alpha^{5/2}}$$

Analyse vectorielle : Pour α un champ scalaire et \vec{A} un champ vectoriel :

$$\operatorname{div}(\alpha\vec{A}) = \alpha \operatorname{div}(\vec{A}) + \vec{A} \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\alpha)$$

En coordonnées cylindriques, pour un champ scalaire $f(r, \theta, z)$:

$$\overrightarrow{\operatorname{grad}}f = \frac{\partial f}{\partial r}\vec{u}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial f}{\partial \theta}\vec{u}_\theta + \frac{\partial f}{\partial z}\vec{u}_z$$

$$\Delta f = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial f}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

et pour un champ vectoriel $\vec{A} = A_r(r, \theta, z)\vec{u}_r + A_\theta(r, \theta, z)\vec{u}_\theta + A_z(r, \theta, z)\vec{u}_z$:

$$\operatorname{div}\vec{A} = \frac{1}{r}\frac{\partial(rA_r)}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

Données numériques

Propriétés des matériaux

Matériau	ρ (kg · m ⁻³)	c (J · K ⁻¹ · kg ⁻¹)	λ (W · K ⁻¹ · m ⁻¹)	τ_c (Pa)
acier	$7,9 \times 10^3$	$4,5 \times 10^2$	75	2×10^8
granit	$2,7 \times 10^3$	$8,0 \times 10^2$	2,2	2×10^8
Téflon	$2,2 \times 10^3$	$1,1 \times 10^3$	2,3	2×10^6
cuivre	$9,0 \times 10^3$	$3,9 \times 10^2$	$3,9 \times 10^2$	–
chêne	$8,0 \times 10^2$	$2,0 \times 10^3$	0,2	–
glace	$9,2 \times 10^2$	$2,1 \times 10^3$	2,3	–

Constantes

Fission	
Énergie libérée par un ^{235}U	$2,0 \times 10^2 \text{ MeV}$
Oxygène	
Masse molaire	$16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Constante d'Avogadro	
\mathcal{N}_A	$6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Unités énergétiques	
1 eV	$1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$
1 tonne équivalent charbon	$29,3 \times 10^9 \text{ J}$
1 tonne équivalent pétrole	$41,9 \times 10^9 \text{ J}$

Caractéristiques du cœur du réacteur

Pastille de combustible	
forme géométrique	cylindre
Hauteur	14 mm
Diamètre	8,2 mm
Structure	
Réseau assemblage	carré 17×17 crayons
Nombre de crayons de combustible	265
Diamètre d'un crayon	9,5 mm
Épaisseur de la gaine d'un crayon	0,57 mm
Nombre d'assemblages	241 par cœur
Masse de UO_2 par assemblage	600 kg
Combustible (dioxyde d'uranium)	
Conductivité thermique moyenne	$5,0 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Température de fusion	$2865 \text{ }^\circ\text{C}$

Circuit primaire	
Débit par boucle	$27,2 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Nombre de boucles	4
Pression	155 bar
Température à l'entrée	$296 \text{ }^\circ\text{C}$
Température au voisinage des crayons	$332 \text{ }^\circ\text{C}$
Température à la sortie	$330 \text{ }^\circ\text{C}$
Surface d'échange	8000 m^2
Densité de courant thermique en périphérie d'un crayon (fonctionnement nominal)	$157 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$
Puissance linéique (fonctionnement nominal)	$470 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}$
Puissance linéique à ne pas dépasser	$590 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}$

Caractéristiques du circuit secondaire

Générateur de vapeur $D \rightarrow A$	
Débit de vapeur	$640 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
État physique à l'entrée	liquide
Température entrée	$76 \text{ }^\circ\text{C}$
État physique à la sortie	vapeur saturante
Pression	70 bar
Turbine haute pression $A \rightarrow B$	
État physique à l'entrée	vapeur saturante
Pression entrée	70 bar
État physique à la sortie	vapeur humide
Titre en vapeur à la sortie	0,90
Pression sortie	11 bar
Turbine basse pression	
État physique à l'entrée	vapeur sèche
Température entrée	$250 \text{ }^\circ\text{C}$
Pression entrée	11 bar
État physique à la sortie	vapeur humide
Titre en vapeur à la sortie	0,88
Pression sortie	0,05 bar

Surchauffeur $A \rightarrow I$ et $E \rightarrow F$	
État physique à l'entrée (A)	vapeur saturante sèche
Pression entrée (A)	70 bar
État physique sortie (I)	liquide saturant
Pression sortie (I)	70 bar
État physique à l'entrée (E)	vapeur saturante sèche
Pression entrée (E)	11 bar
État physique sortie (F)	vapeur sèche
Pression sortie (F)	11 bar
Température sortie (F)	$250 \text{ }^\circ\text{C}$
Condenseur $G \rightarrow H$	
État physique à l'entrée	vapeur humide
Titre en vapeur à l'entrée	0,88
État physique à la sortie	liquide saturant
Pression	0,05 bar

Propriétés de l'eau

Pression de 70 bar	
Température d'équilibre liquide – vapeur	286 °C
Enthalpie massique du liquide	1268 kJ · kg ⁻¹
Enthalpie massique de la vapeur	2772 kJ · kg ⁻¹
Entropie massique du liquide	3,12 kJ · K ⁻¹ · kg ⁻¹
Entropie massique de la vapeur	5,81 kJ · K ⁻¹ · kg ⁻¹
Pression de 11 bar	
Température d'équilibre liquide – vapeur	184 °C
Enthalpie massique du liquide	781 kJ · kg ⁻¹
Enthalpie massique de la vapeur	2781 kJ · kg ⁻¹
Entropie massique du liquide	2,18 kJ · K ⁻¹ · kg ⁻¹
Entropie massique de la vapeur	6,55 kJ · K ⁻¹ · kg ⁻¹

Pression de 0,05 bar	
Température d'équilibre liquide – vapeur	33 °C
Enthalpie massique du liquide	137,8 kJ · kg ⁻¹
Enthalpie massique de la vapeur	2561 kJ · kg ⁻¹
Entropie massique du liquide	0,48 kJ · K ⁻¹ · kg ⁻¹
Entropie massique de la vapeur	8,39 kJ · K ⁻¹ · kg ⁻¹

● ● ● **FIN** ● ● ●

Annexe du DS 3
(À détacher et à rendre avec la copie)

