

## 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	Les différentes parties du sujet sont bien identifiées et les réponses sont numérotées avec le numéro de la question.
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 : De la cuisson des œufs

Cette partie a pour objet l'étude d'un cuiseur à œufs tel que celui représenté ci-dessous :



FIGURE 1 – Vue de profil, vue de dessus, vue de dessus sans la cloche (laissant voir la grille)

Cet appareil cuit des œufs (au nombre de 1 à 7) grâce à la vapeur d'eau qui se forme par ébullition de l'eau placée dans le fond du cuiseur. Les œufs à cuire selon différents degrés de cuisson (coque, mollet ou dur) sont placés sur une grille percée de 7 trous circulaires et de 6 trous périphériques permettant la circulation de la vapeur d'eau dans l'enceinte de cuisson. Des orifices sont percés au sommet de la cloche métallique pour permettre à la vapeur de s'échapper.

La puissance électrique consommée par l'appareil est :  $\mathcal{P} = 350 \text{ W}$ . On considèrera que cette puissance est intégralement consommée par la résistance chauffante. La quantité d'eau placée dans le cuiseur est mesurée à l'aide d'un gobelet gradué selon le nombre d'œufs à cuire et le type de cuisson désirée (voir FIGURE 2). Le fond est bombé à cause de la présence d'une pique sous la base du gobelet permettant le perçage du sommet de l'œuf avant la cuisson afin d'éviter la rupture de la coquille.

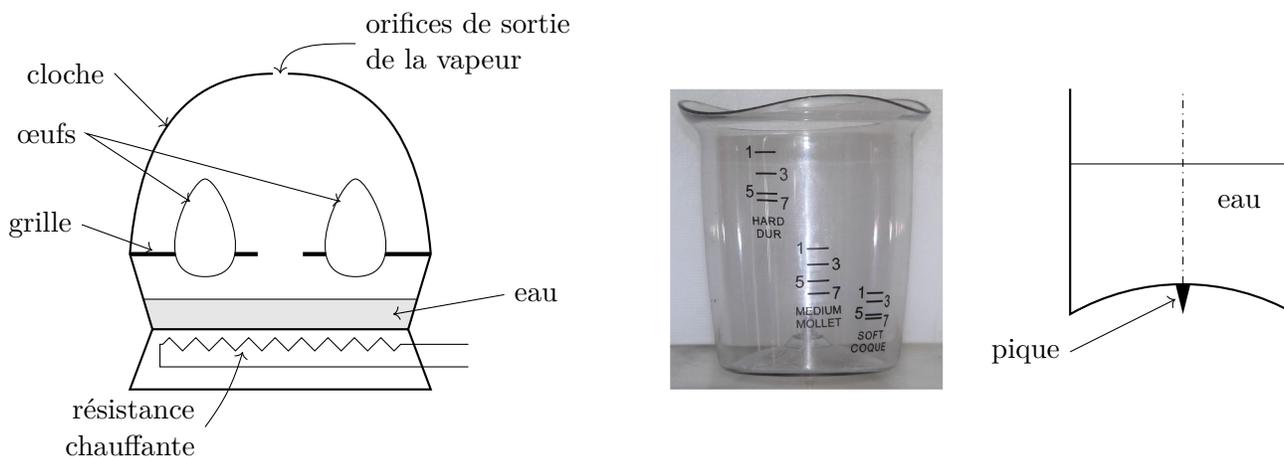


FIGURE 2 – Schéma général du cuiseur, photo et schéma du gobelet

**Problématique :** on voit sur les graduations du gobelet que la quantité d'eau nécessaire à la cuisson est d'autant plus grande que le nombre d'œufs à cuire est faible, ce qui est a priori étonnant. Les questions qui suivent vont permettre d'analyser ce phénomène.

**Fonctionnement du cuiseur :** le volume d'eau nécessaire à la cuisson d'un seul œuf dur est de 120 mL. Les œufs à la température initiale  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  sont placés dans le cuiseur et la masse d'eau  $m_0$  (à la même température initiale  $T_0$ ) est versée sous les œufs. Cette eau est portée à ébullition sous  $p = 1 \text{ bar}$ , puis évaporée. Le cuiseur s'arrête quand toute l'eau s'est évaporée.

Notons  $c$  la capacité thermique massique de l'eau liquide,  $T_{\text{eb}}$  sa température d'ébullition dans les conditions de l'expérience,  $h \approx 1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  le coefficient de transfert conducto-convectif (eau ↔ œuf) et  $m(t)$  la masse d'eau contenue dans le cuiseur à l'instant  $t$ .

Soient  $\Delta t_1$  la durée de chauffage de l'eau de  $T_0$  à  $T_{\text{eb}}$  et  $\Delta t_2$  la durée de la cuisson des œufs, qui correspond à l'évaporation totale de l'eau. Pendant cette deuxième phase, on supposera que la vapeur d'eau est à la température  $T_{\text{eb}} = 100^\circ\text{C}$  sous la pression  $p = 1 \text{ bar}$ .

**Données pour l'eau :** masse volumique  $\mu = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , capacité thermique massique  $c = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , conductivité thermique  $\lambda = 0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , chaleur latente massique de vaporisation  $\ell_{\text{vap}} = 2,26 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

**Formulaire d'analyse vectorielle :** le gradient d'un champ scalaire  $f$  et la divergence d'un champ vectoriel  $\vec{A}$  sont donnés, en coordonnées sphériques, par :

$$\vec{\text{grad}} f = \frac{\partial f}{\partial r} \vec{u}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \vec{u}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \vec{u}_\varphi \quad \text{et} \quad \text{div} \vec{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 A_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial (\sin \theta A_\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \varphi}$$

## I – Chauffage de l'eau

**Q.1** Soit  $m_c$  la valeur en eau du cuiseur (on rappelle que la valeur en eau d'un objet est la masse d'eau ayant même capacité thermique que cet objet). En supposant la transformation adiabatique pendant le chauffage, exprimer  $\Delta t_1$  en fonction des données.

**Q.2** On place dans le cuiseur une masse d'eau  $m_0 = 125 \text{ g}$  (sans œufs) et on mesure une durée de chauffage  $\Delta t_0 = 150 \text{ s}$  avant de parvenir à l'ébullition. En déduire la valeur en eau du cuiseur.

## II – Détermination de la durée de cuisson $\Delta t_2$

Un œuf est composé de trois parties :

- une coquille très mince ;
- le blanc d'œuf constituant les deux tiers de l'œuf. C'est un liquide composé à environ 90% d'eau et 10% de protéines, sels minéraux et vitamines ;
- le jaune d'œuf est composé à moitié d'eau, de 15% de protéines et de 35% de lipides.

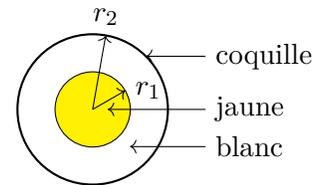


FIGURE 3

Lors de la cuisson (type œuf dur) les protéines se déroulent partiellement et se lient pour former un réseau qui piège l'eau : c'est un gel. Les œufs caoutchouteux sont ceux qui ont perdu trop d'eau ; c'est aussi la sur-cuisson du jaune qui le fait devenir sableux. Quand un œuf est cuit à  $100^\circ\text{C}$ , la masse diminue progressivement à mesure que l'eau est éliminée du gel formé. Quand un œuf est cuit à une température peu supérieure à la température de coagulation de ses protéines, il coagule en conservant son eau, gage de moelleux. Le jaune d'œuf commence à épaissir à  $65^\circ\text{C}$ . Il coagule totalement à une température de  $85^\circ\text{C}$ .

### II.A Modélisation et établissement de l'équation de la chaleur

Pour déterminer le temps de cuisson, il est nécessaire de résoudre l'équation de la chaleur en régime dépendant du temps. On modélise un œuf comme un ensemble de deux sphères concentriques de rayons  $r_1$  et  $r_2$  limitant le jaune et le blanc (FIGURE 3).

Afin de simplifier l'étude, on va négliger l'influence de la coquille et considérer l'intérieur de l'œuf comme homogène et ayant les propriétés thermodynamiques de l'eau : masse volumique  $\mu$ , capacité thermique massique  $c$  et conductivité thermique  $\lambda$ .

**Q.3** Établir l'équation traduisant le bilan thermique en coordonnées sphériques, en faisant un bilan énergétique sur une couche sphérique de rayon  $r$  et d'épaisseur  $dr$ .

On introduit les variables réduites :  $\rho = r/r_2$  et  $\tau = t/\theta$  pour que l'équation de la diffusion s'écrive :

$$\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho^2 \frac{\partial T(\rho, \tau)}{\partial \rho} \right) = \frac{\partial T(\rho, \tau)}{\partial \tau} \quad (1)$$

**Q.4** Exprimer  $\theta$  en fonction de  $\mu$ ,  $c$ ,  $r_2$  et  $\lambda$ . Commenter la dépendance de  $\theta$  par rapport à  $r_2$ .

### II.B Résolution de l'équation de la chaleur

Afin de résoudre cette équation en régime dépendant du temps, on pose dans un premier temps

$$T(\rho, \tau) = T_{\text{eb}} + f(\rho)g(\tau)$$

**Q.5** En utilisant l'équation de la diffusion, montrer que la composante temporelle  $g(\tau)$  vérifie l'équation

$$\frac{1}{g(\tau)} \frac{dg(\tau)}{d\tau} = -A^2$$

où  $A$  est une constante réelle positive, inconnue à ce stade de la résolution.

**Q.6** Exprimer alors  $g(\tau)$  à une constante multiplicative près et justifier le signe "-" figurant devant  $A^2$ .

Pour trouver la composante spatiale de  $T(\rho, \tau)$ , on pose  $f(\rho) = \frac{F(\rho)}{\rho}$ .

**Q.7** Montrer que  $F(\rho)$  est solution de l'équation  $\frac{d^2 F(\rho)}{d\rho^2} + A^2 F(\rho) = 0$ . En déduire l'expression de  $f(\rho)$ .

**Q.8** Montrer alors que la solution générale de l'équation (1) peut s'écrire sous la forme

$$T(\rho, \tau) = T_{\text{eb}} + \sum_i \frac{\beta_i \sin(A_i \rho)}{\rho} \exp(-A_i^2 \tau) \quad (2)$$

### II.C Détermination des constantes dans l'approximation de Fourier

Dans le cadre de l'approximation de Fourier, on ne conserve dans l'expression (2) que le terme associé à la constante de temps la plus longue, donc celui correspondant au coefficient  $A_i$  le plus petit (qui sera noté  $A$  dans la suite), car les autres termes sont rapidement amortis au cours du temps :

$$T(\rho, \tau) \approx T_{\text{eb}} + \frac{\beta \sin(A\rho)}{\rho} \exp(-A^2 \tau)$$

**Q.9** On suppose que les échanges thermiques au niveau de la coquille sont donnés par la loi de Newton  $\vec{j}_Q = h(T(\rho = 1, \tau) - T_{\text{eb}})\vec{u}_r$ . En écrivant deux expressions permettant d'exprimer le flux thermique entrant dans l'œuf, montrer que  $A$  est solution de l'équation  $\frac{\lambda A}{\lambda - r_2 h} = \tan A$ .

**Q.10** Pour un œuf moyen,  $r_2 = 2,5$  cm. Montrer que dans ces conditions, on peut prendre  $A \approx \pi$  comme première solution de l'équation précédente dans  $\mathbb{R}^{+*}$ . Évaluer l'erreur commise.

**Q.11** Exprimer alors  $T(\rho, \tau)$  avec la valeur de  $A$  précédente. Quelle conséquence peut-on en tirer sur la température à la surface de l'œuf? Montrer que cela revient à considérer une des grandeurs caractéristiques du problème comme infinie.

**Q.12** Calculer  $\beta$  en exprimant la température au centre de l'œuf à  $t = 0$ .

### II.D Calcul de la durée de cuisson $\Delta t_2$ pour un œuf dur

- Q.13** Exprimer, en fonction de  $\theta$  et des autres données du problème, la durée de cuisson  $\Delta t_2$  à l'état dur d'un œuf de rayon  $r_2$ , pour lequel la température au centre doit atteindre  $T_c = 80^\circ\text{C}$ .
- Q.14** Calculer  $\Delta t_2$  pour un œuf de rayon  $r_2 = 2,5\text{ cm}$ . Commenter le résultat obtenu.

## III – Détermination de la masse d'eau à placer dans le cuiseur

### III.A Estimation de l'énergie de cuisson d'un œuf dur

- Q.15** En faisant un bilan énergétique très simple entre l'état final et l'état initial, donner une borne inférieure  $\mathcal{E}_d^{\min}$  de l'énergie de cuisson  $\mathcal{E}_d$  d'un œuf dur. Faire l'application numérique.
- Q.16** De la même façon, donner une borne supérieure  $\mathcal{E}_d^{\max}$  de l'énergie  $\mathcal{E}_d$ . Faire l'application numérique.
- Q.17** Dans la suite, on adoptera comme valeur de l'énergie  $\mathcal{E}_d$  la moyenne arithmétique de  $\mathcal{E}_d^{\min}$  et  $\mathcal{E}_d^{\max}$ . Calculer numériquement cette valeur.

### III.B Modélisation et conclusion

Pendant la phase de cuisson, on peut considérer l'eau contenue dans le cuiseur comme un système ouvert en écoulement permanent, admettant en entrée de l'eau liquide à la température  $T_{\text{eb}}$  et en sortie de la vapeur d'eau à  $T_{\text{eb}}$  (noter que, dans cette modélisation, les œufs font partie de l'extérieur du système). Soit  $\mathcal{P}$  la puissance thermique fournie par la résistance chauffante,  $\mathcal{P}_f$  la puissance associée aux pertes thermiques dans les différentes parties du cuiseur (socle, cloche, ...). On note :

- $D_m$  le débit massique de vapeur en sortie ;
  - $n$  le nombre d'œufs dans le cuiseur ;
  - $\ell_v$  la chaleur latente massique de vaporisation de l'eau liquide à  $100^\circ\text{C}$ ,  $\ell_v = 2,26 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;
  - $\mathcal{E}(t)$  l'énergie cédée à un œuf entre le début de sa cuisson et l'instant  $t$  ;
  - $\mathcal{E}_X$  l'énergie nécessaire à la cuisson d'un œuf dans l'état  $X$  ( $d$  : dur ;  $m$  : mollet ;  $c$  : coque).
- Q.18** En appliquant le premier principe au système ouvert en régime permanent pendant la durée  $dt$ , établir la relation entre  $D_m$ ,  $\mathcal{P}$ ,  $\mathcal{P}_f$ ,  $\frac{d\mathcal{E}(t)}{dt}$  et le nombre d'œufs  $n$ .
- Q.19** On introduit dans le cuiseur une masse  $m_0$  d'eau liquide, qui va donc être vaporisée pendant la phase de cuisson de durée  $\Delta t_2$ . Montrer que :

$$m_0 = \frac{(\mathcal{P} - \mathcal{P}_f)\Delta t_2 - n\mathcal{E}_X}{\ell_v}$$

Justifier alors les graduations du gobelet.

- Q.20** Exprimer la puissance thermique minimale que doit fournir la résistance électrique pour pouvoir cuire 7 œufs durs. Faire l'application numérique en considérant  $\mathcal{P}_f \approx 0$  et en prenant  $\mathcal{E}_d = 19\text{ kJ}$  pour un œuf de  $2,5\text{ cm}$  de rayon dont le temps de cuisson est d'environ 10 minutes. Comparer à la puissance du cuiseur et commenter.
- Q.21** On donne FIGURE 4 la représentation graphique de la masse d'eau  $m_0$  contenue dans le gobelet en fonction du nombre d'œufs pour les trois degrés de cuisson ( $d, m, c$ ). Analyser ces courbes à la lumière des résultats précédents. En particulier :
- déterminer la taille des œufs (c'est-à-dire leur rayon) qui ont servi à étalonner le gobelet ;
  - le temps de cuisson d'un œuf dur vous semble-t-il conforme aux résultats obtenus plus haut ?

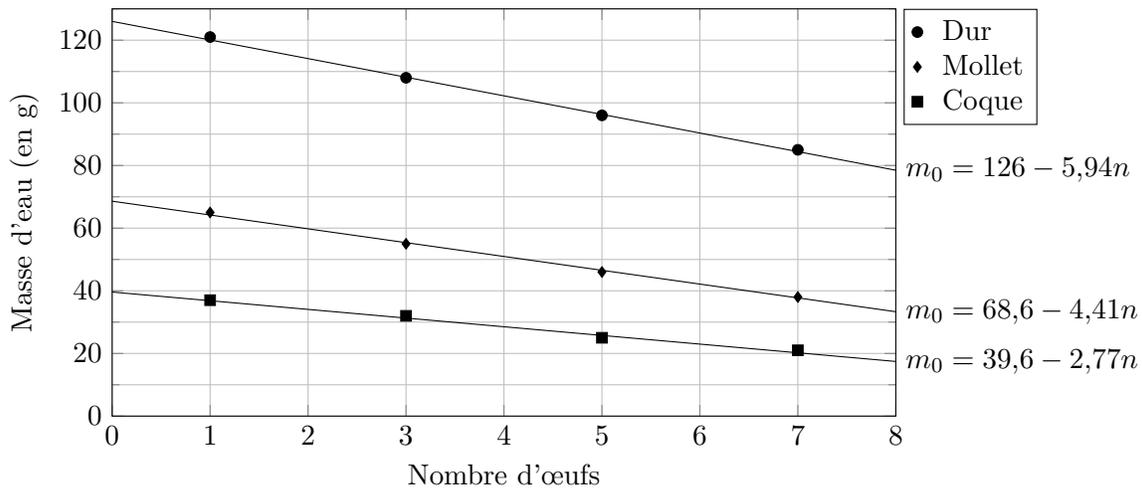


FIGURE 4 – Masse d'eau à introduire dans le cuiseur en fonction du nombre d'œufs, pour les différents choix de cuisson

## Exercice 2 : Thermodynamique dans un REP

Les réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP) exploitent l'énergie libérée par la fission de noyaux d'uranium 235 provoquée par des flux de neutrons pour chauffer l'eau d'un premier circuit appelé circuit primaire. Ce dernier va transférer son énergie thermique, via un échangeur appelé générateur de vapeur, à un deuxième circuit : le circuit secondaire. L'eau du secondaire subit un cycle thermodynamique qui consiste en une vaporisation au niveau de la source chaude, une détente de la vapeur dans une turbine (reliée à un alternateur qui va produire de l'électricité), une condensation de la vapeur sortant à basse pression de la turbine et une compression de l'eau condensée afin de ramener cette eau à la pression initiale. Ce problème a pour objectif d'étudier des aspects thermodynamiques du circuit secondaire et ce, systématiquement, en **régime permanent**.

On rappelle que l'enthalpie massique  $h$  d'un mélange diphasique de titre massique en vapeur  $x$  est donnée par la relation :

$$h = x h'' + (1 - x) h'$$

où  $h''$  et  $h'$  sont respectivement les enthalpies massiques à l'état de vapeur saturante et à l'état de liquide saturant. De même, l'entropie massique  $s$  d'un mélange diphasique de titre  $x$  est donnée par la relation :

$$s = x s'' + (1 - x) s'$$

où  $s''$  et  $s'$  sont respectivement les entropies massiques à l'état de vapeur saturante et à l'état de liquide saturant.

Pour l'ensemble du problème, nous négligerons les frottements ainsi que les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle du fluide secondaire. On suppose qu'il n'y a pas de pièce mobile dans le condenseur et dans le générateur de vapeur et que la détente et la compression sont adiabatiques. Des données numériques sont disponibles en fin d'énoncé.

### I – Questions préliminaires

- Q.1** Sur le diagramme de Clapeyron de la FIGURE 5 que vous reproduirez, préciser la position du point critique, les parties courbes de rosée et d'ébullition. Indiquer également les domaines où se trouve le liquide, le mélange diphasique et la vapeur surchauffée.

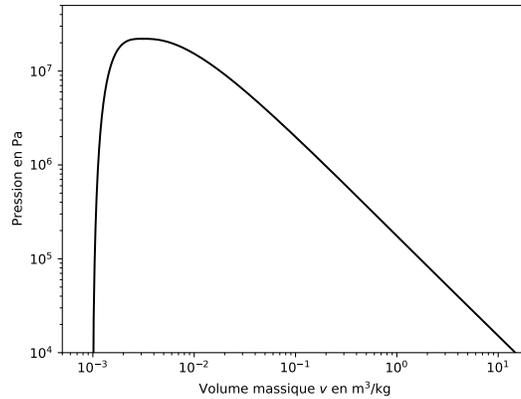


FIGURE 5 – Diagramme de Clapeyron de l'eau

**Q.2** Démontrer qu'une transformation adiabatique réversible est une transformation isentropique.

**Q.3** En considérant que l'eau liquide est incompressible et de volume massique  $v = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , calculer le travail utile massique  $w$  échangé par l'eau circulant dans une pompe, en considérant la transformation adiabatique réversible et une augmentation de pression de  $\Delta P = 70 \text{ bar}$ . On rappelle que la variation élémentaire de l'enthalpie massique  $dh$  du fluide peut s'écrire :  $dh = Tds + vdP$  (seconde identité thermodynamique).

Ce travail peut être considéré comme négligeable devant les autres échanges énergétiques. Dans toute la suite du problème, **le travail utile échangé par un liquide sera systématiquement considéré comme nul.**

**Q.4** En déduire alors que l'enthalpie massique du liquide reste constante lors de son passage dans la pompe.

## II – Étude thermodynamique du circuit secondaire simplifié

Le circuit secondaire représenté FIGURE 6 est constitué du générateur de vapeur (G.V.), d'une turbine (T) reliée à un alternateur, d'un condenseur (C) et d'une pompe d'alimentation secondaire (P).

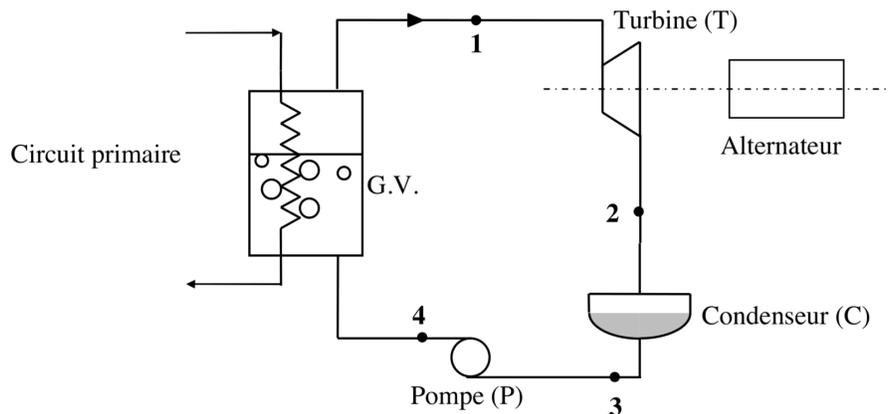


FIGURE 6 – Circuit secondaire simplifié

Le fluide secondaire subit le cycle thermodynamique suivant :

- 1 → 2 : détente adiabatique réversible dans la turbine,
- 2 → 3 : liquéfaction isobare totale dans le condenseur,
- 3 → 4 : compression adiabatique réversible dans la pompe d'alimentation secondaire,
- 4 → 1 : échauffement puis vaporisation isobare dans le générateur de vapeur.

La TABLE 1 précise l'état thermodynamique du fluide secondaire en certains points du cycle.

Point	Pression (bar)	Température (K)	État du fluide secondaire	Enthalpie massique ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Entropie massique ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
1	70	559	Vapeur saturante	2773,5	5,8162
2	0,05	306	Mélange diphasique	-	-
3	0,05	-	Liquide saturant	137,8	0,4763
4	70	-	Liquide sous saturé	-	-

TABLE 1

- Q.5** Tracer sur la FIGURE A fournie en annexe (et à rendre avec la copie), l'allure du cycle thermodynamique subi par le fluide secondaire. Y placer les points 1, 2, 3 et 4.
- Q.6** Quelle est la relation entre l'entropie  $s_1$  du fluide à l'entrée de la turbine et celle  $s_2$  en sortie ? Calculer alors, en sortie de turbine, le titre  $x_2$  (on rappelle que le titre correspond à la fraction massique de la vapeur dans le mélange liquide-vapeur). Une vapeur humide est d'autant plus corrosive pour les pales de la turbine que son titre est faible, que pensez-vous de la détente étudiée ?
- Q.7** En vous aidant de la question précédente, déterminer l'enthalpie massique  $h_2$  du fluide. En déduire le travail massique  $w_T$  échangé par le fluide dans la turbine.
- Q.8** Déterminer la température  $T_3$  et la valeur du titre  $x_3$  du fluide en sortie du condenseur.
- Q.9** Calculer la chaleur massique  $q_C$  échangée par le fluide avec le condenseur puis  $q_{GV}$ , celle échangée par le fluide dans le générateur de vapeur.
- Q.10** Calculer le rendement  $\eta_s$  de ce cycle thermodynamique simplifié puis celui de Carnot  $\eta_c$  en utilisant les mêmes sources chaude et froide. D'où provient la différence de rendement entre ces cycles ?

### III – Etude thermodynamique du circuit secondaire réel

Afin d'optimiser la qualité de la vapeur utilisée (augmentation du titre en sortie de turbine), l'industriel utilise un circuit secondaire plus complexe, représenté à la FIGURE 7. On rappelle qu'à chaque élément du circuit à plusieurs entrées/sorties, la conservation de l'énergie impose un bilan de puissance sous la forme générale :

$$\sum D_{me} h_e = \sum D_{ms} h_s$$

où  $h_e$  et  $h_s$  sont respectivement les enthalpies massiques d'entrée et de sortie de l'élément concerné,  $D_{me}$  et  $D_{ms}$  étant les débits massiques d'entrée et de sortie de l'élément considéré.

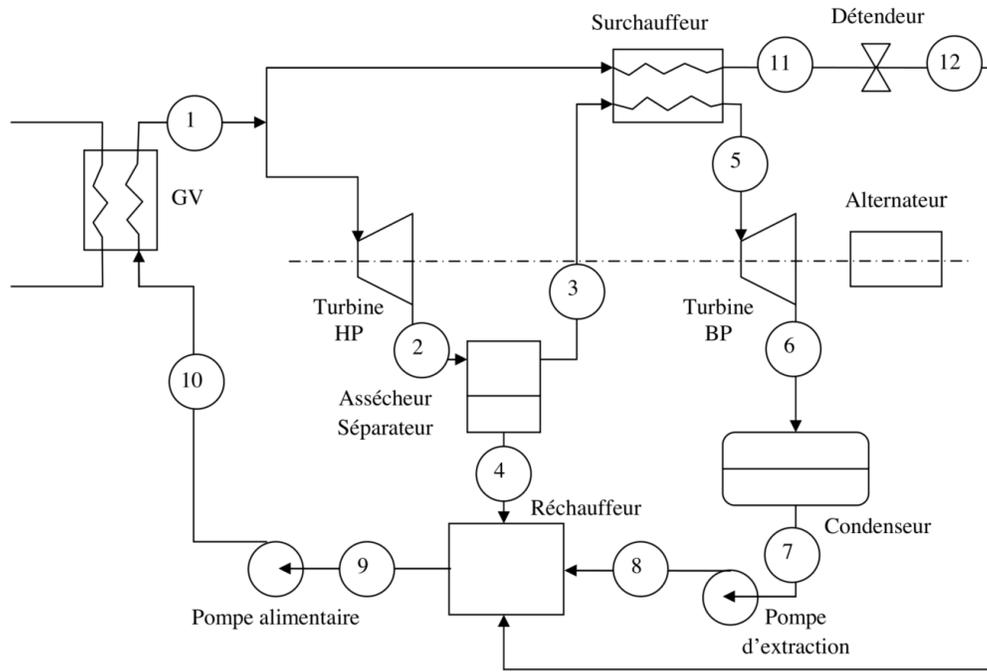


FIGURE 7 – Circuit secondaire industriel

Les turbines haute pression (HP) et basse pression (BP) entraînent l'alternateur. Le débit massique de vapeur en sortie du générateur de vapeur vaut  $D_{m1} = 1500 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , le débit massique de vapeur alimentant le surchauffeur est  $D_{m11} = 100 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ . La TABLE 2 précise l'état thermodynamique du fluide secondaire en certains points du cycle.

Point	Pression (bar)	Température (K)	État du fluide secondaire	Enthalpie massique ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Entropie massique ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
1	70	559	Vapeur saturante	2773,5	5,8162
2	10	453	Mélange diphasique	-	-
3	10	-	Vapeur saturante	-	-
4	10	-	Liquide saturant	-	-
5	10	502	Vapeur surchauffée	2943,0	6,9259
6	0,05	-	Mélange diphasique	-	-
7	0,05	-	Liquide saturant	-	-
8	10	-	Liquide sous saturé	-	-
9	10	-	Liquide sous saturé	-	-
10	70	-	Liquide sous saturé	-	-
11	70	-	-	-	-
12	10	-	-	-	-

TABLE 2

**Q.11** En considérant que la partie du fluide passant dans la turbine haute pression (HP) y subit une détente adiabatique réversible, déterminer les valeurs de l'entropie massique  $s_2$ , du titre  $x_2$  et de l'enthalpie massique  $h_2$  au point 2.

**Q.12** Calculer alors le travail massique  $w_{HP}$  échangé par le fluide dans la turbine haute pression. En déduire la puissance  $P_{HP}$  développée par cette turbine.

Un assécheur-séparateur calorifugé permet la séparation passive du mélange diphasique obtenu au point 2 en, d'une part, de la vapeur saturante au point 3 et d'autre part, du liquide saturant au point 4.

**Q.13** Écrire deux relations vérifiées, au niveau de l'assécheur-séparateur, par les débits massiques  $D_{m2}$ ,  $D_{m3}$ ,  $D_{m4}$  et les enthalpies massiques  $h_2$ ,  $h_3$  et  $h_4$ . Donner alors l'expression, en fonction de  $D_{m2}$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  et  $h_4$ , des débits massiques  $D_{m3}$  et  $D_{m4}$  aux points 3 et 4. Exprimer également les débits massiques  $D_{m3}$  et  $D_{m4}$  en fonction du titre  $x_2$  et du débit massique  $D_{m2}$ . Faire l'application numérique.

Une partie du fluide issu du générateur de vapeur circule dans un surchauffeur adiabatique pour échanger une partie de son énergie à la vapeur saturée issue de l'assécheur-séparateur afin de la surchauffer.

**Q.14** À partir d'un bilan de puissance sur le surchauffeur, déterminer l'enthalpie massique du fluide  $h_{11}$  au point 11.

**Q.15** La puissance développée par la turbine basse pression (BP) vaut  $P_{BP} = 963 \text{ MW}$ . Calculer le travail massique  $w_{BP}$  échangé par le fluide dans la turbine basse pression. Déterminer alors la valeur du titre  $x_6$  au point 6.

**Q.16** Calculer la chaleur massique  $q_C$  échangée par le fluide au condenseur.

Un détendeur est un organe adiabatique qui ne présente pas de pièces mobiles et qui permet au fluide d'abaisser sa pression.

**Q.17** Montrer qu'une des fonctions d'état reste constante lors de l'écoulement d'un fluide au travers d'un détendeur. Comment s'appelle ce type de détente? Est-elle réversible?

**Q.18** À l'aide d'un bilan de puissance sur le réchauffeur, déterminer l'enthalpie massique  $h_9$  au point 9. Quel est le rôle du détendeur?

**Q.19** Calculer la chaleur massique  $q_{GV}$  échangée par le fluide dans le générateur de vapeur. En déduire la puissance  $P_{GV}$  générée par le générateur de vapeur.

**Q.20** Calculer le rendement  $\eta_r$  de ce cycle thermodynamique réel. Le comparer avec le rendement  $\eta_s$  du circuit simplifié et en déduire quel pourrait être l'avantage principal du cycle réel.

### Données numériques

Pression (bar)	Enthalpie massique ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		Entropie massique ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	
	liquide saturant	vapeur saturante	liquide saturant	vapeur saturante
0,05	137,8	2561,6	0,4763	8,3960
10	762,6	2776,2	2,1382	6,5828
70	1267,4	2773,5	3,1219	5,8162

TABLE 3

● ● ● FIN ● ● ●

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

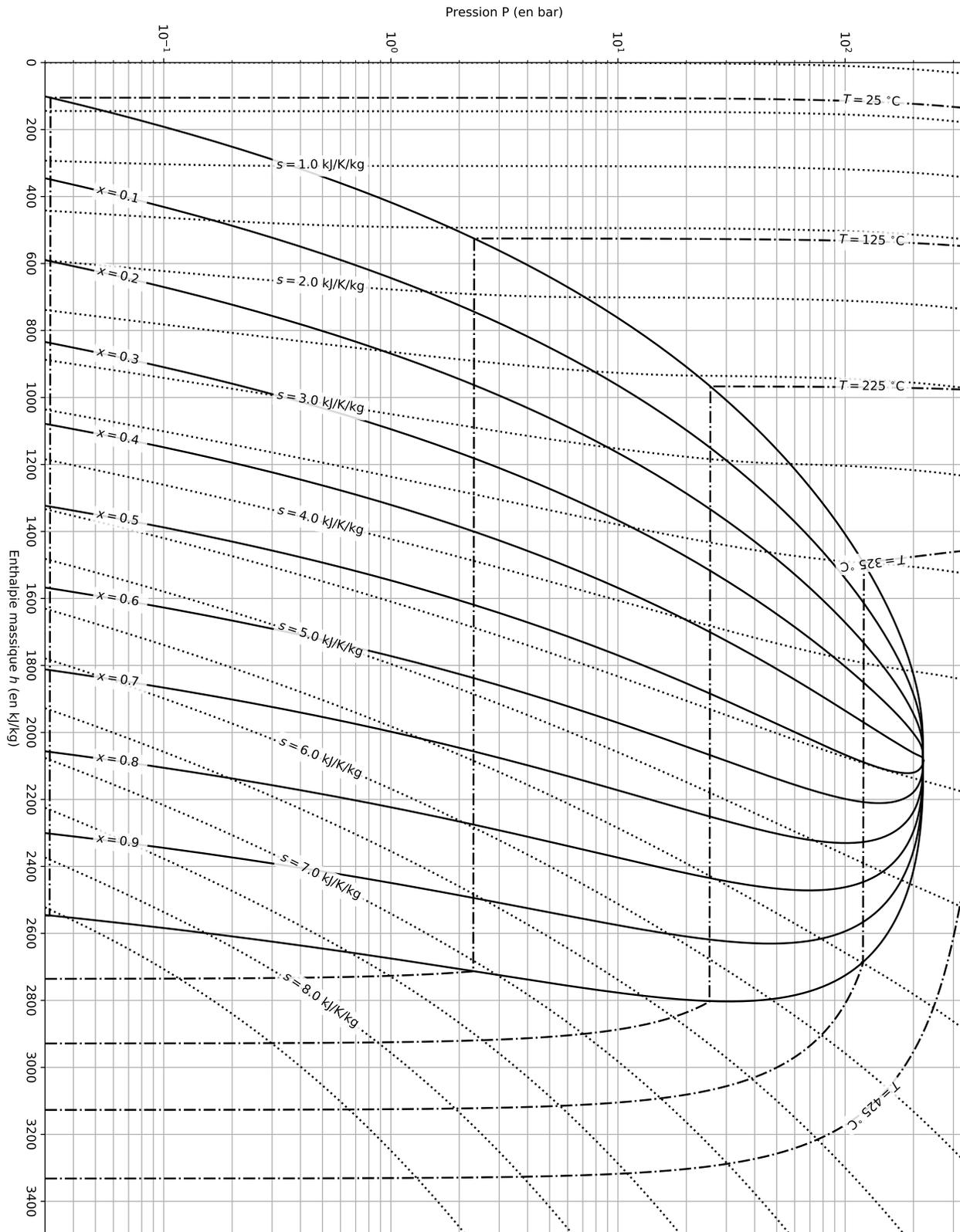


FIGURE A – Diagramme enthalpique, Exercice 2 Q.5