

Épreuve B - Thermodynamique

Durée : 2 heures

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

Le sujet comporte 5 pages, et est composé de deux parties indépendantes.
L'utilisation des calculatrices n'est pas autorisée pour cette épreuve.

AVERTISSEMENT

La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats de leurs calculs.

* * *

Données

Masse volumique de l'eau liquide : $\rho_e = 1,0 \text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_e = 4,2\cdot 10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$

Aide aux calculs

Les résultats des applications numériques seront donnés avec deux chiffres significatifs maximum.

$$\frac{2,09}{3,6} \approx 0,6 \quad \frac{338}{58} \approx 6; \quad \frac{280}{58} \approx 5; \quad \frac{4,3}{8,36} \approx 0,5$$

Première partie - Étude d'un climatiseur

Tiré de Banque PT 2024 (Modélisation)

I.A - Transferts thermiques

On envisage la construction d'un climatiseur monotherme, c'est-à-dire une machine thermique cyclique capable de recevoir ou de fournir un travail, et d'absorber de l'énergie thermique d'une source de chaleur, thermostat à la température T .

- Q1.** Exprimer la variation d'énergie interne et d'entropie pour cette machine, en fonction de W , Q , T et l'entropie créée S_c sur un cycle.
- Q2.** Déterminer les signes du travail W et du transfert thermique Q .
- Q3.** Conclure sur la possibilité de concevoir un tel climatiseur monotherme.

I.B - Efficacité d'un cycle réversible

On s'intéresse désormais à un climatiseur ditherme, c'est-à-dire une machine cyclique thermique capable de recevoir ou de fournir un travail, et d'échanger de l'énergie thermique avec deux thermostats aux températures T_f (pour la source "froide") et T_c (pour la source "chaude").

- Q4.** Réaliser un schéma de principe d'un tel climatiseur, où tous les échanges d'énergie seront comptés comme reçus par le climatiseur.
- Q5.** Préciser le signe des différents échanges d'énergie.
- Q6.** Définir l'efficacité du climatiseur ditherme, et déterminer son expression en fonction des températures T_f et T_c dans l'hypothèse d'un fonctionnement réversible.
- Q7.** La pièce à climatiser doit conserver une température constante. Commenter l'évolution de l'efficacité dans l'hypothèse d'un fonctionnement réversible, en fonction de la température extérieure.

- Fin de la première partie -

Deuxième partie - Étude thermodynamique d'un chauffe-eau

Tiré de Centrale TSI 2021

Un chauffe-eau est composé d'une cuve cylindrique fermée, généralement en acier émaillé, dans laquelle se trouve un dispositif de chauffage piloté par un thermostat (figure 1). La cuve est en permanence remplie d'eau. En effet, lorsqu'on puise de l'eau chaude, de l'eau froide remplace au fur et à mesure la quantité d'eau chaude utilisée. Le dispositif de chauffage réchauffe l'eau jusqu'à une température de consigne préalablement définie, puis s'arrête. Si de l'eau est puisée, il se remet en fonctionnement.

Il existe plusieurs types de chauffe-eau. On s'intéresse ici plus particulièrement :

- 1) aux chauffe-eaux électriques à résistance thermoplongée (figure 1);
- 2) aux chauffe-eaux thermodynamiques faisant appel à une pompe à chaleur (figure 2).

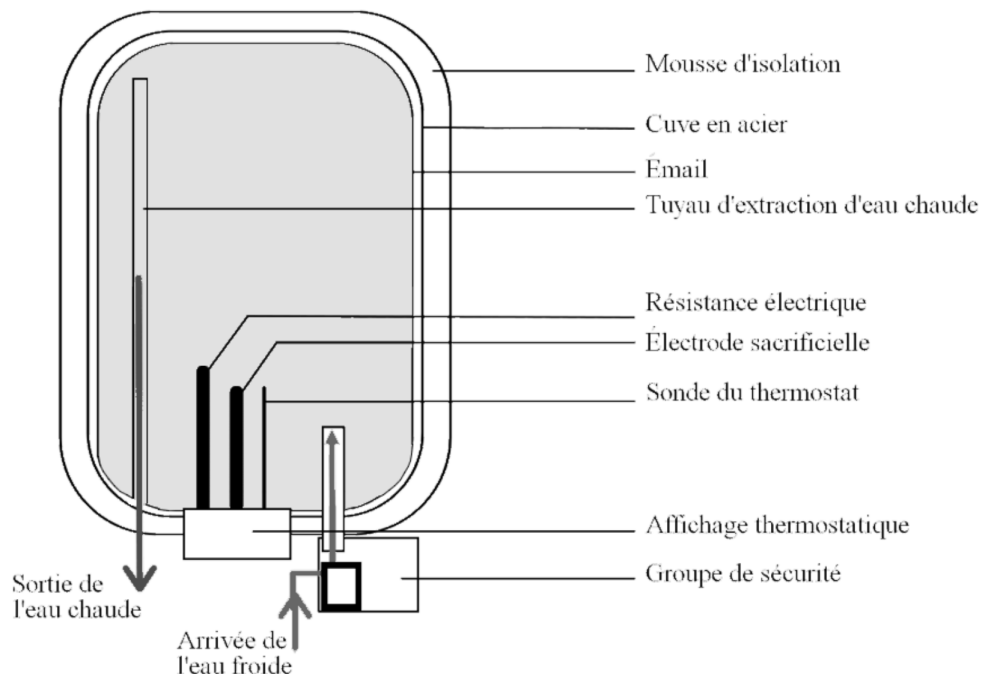


Figure 1: Schéma descriptif d'un chauffe-eau électrique

Ce chauffe-eau a une puissance électrique égale à $P = 2\,000\text{ W}$ et sa cuve contient un volume $V = 200\text{ L}$ d'eau. Cette cuve est remplie avec de l'eau froide à $T_{e1} = 288\text{ K}$ ($\theta_{e1} = 15\text{ °C}$). Grâce à une résistance chauffante, cette eau est chauffée à $T_{e2} = 338\text{ K}$ ($\theta_{e2} = 65\text{ °C}$).

II.A - Chauffe-eau électrique

- Q8.** Déterminer la valeur de l'énergie calorifique Q nécessaire pour chauffer l'eau.
- Q9.** En déduire le temps nécessaire Δt pour chauffer l'eau. On précisera le résultat en heures.

II.B - Chauffe-eau thermodynamique

Dans cette partie, on s'intéresse à la pompe à chaleur d'un chauffe-eau thermodynamique schématisé sur la figure 2.

Cette pompe à chaleur est située dans une pièce dont l'air environnant est à la température $T_a = 280 \text{ K}$ ($\theta_a = 7 \text{ °C}$) que l'on suppose constante. Elle est destinée à maintenir l'eau du chauffe-eau à la température $T_{e2} = 338 \text{ K}$ ($\theta_{e2} = 65 \text{ °C}$) en prélevant de l'énergie thermique à l'air environnant, grâce à un fluide frigorigène qui circule en circuit fermé dans la machine.

On suppose que la pompe à chaleur fonctionne de manière réversible selon un cycle de Carnot.

Au cours d'un cycle, on note W le travail reçu par le fluide de la part du compresseur, Q_f le transfert thermique reçu par le fluide de la part de la source froide et Q_c le transfert thermique reçu par le fluide de la part de la source chaude. On désigne par T_c la température de la source chaude et T_f la température de la source froide.

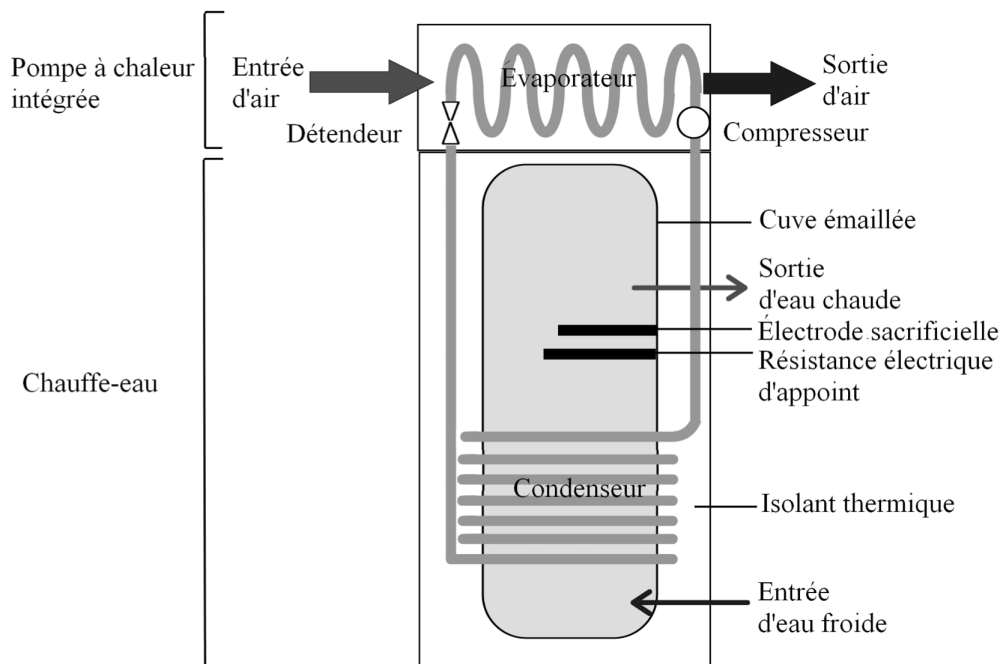


Figure 2: Schéma descriptif d'un chauffe-eau thermodynamique

Q10. Rappeler le schéma de principe d'une pompe à chaleur ditherme. Préciser le signe des échanges d'énergie W , Q_f et Q_c .

Q11. Quel élément joue le rôle de source froide et quel élément joue le rôle de source chaude ?

On rappelle que le cycle de Carnot se compose de deux transformations isothermes aux températures T_c et T_f et de deux transformations adiabatiques réversibles.

Q12. Définir une transformation isotherme et une transformation adiabatique.

Q13. Schématiser ce cycle en diagramme de Clapeyron (P, v). Justifier le sens du cycle et l'allure des portions représentées.

Q14. Appliquer le premier principe de la thermodynamique au fluide au cours d'un cycle réversible.

- Q15.** Appliquer le second principe de la thermodynamique au fluide au cours d'un cycle réversible.
- Q16.** Définir le coefficient de performance COP (ou efficacité) d'une pompe à chaleur.
- Q17.** En déduire l'expression du coefficient de performance maximal COP_{\max} en fonction de T_c et T_f .
- Q18.** Effectuer l'application numérique.
- Q19.** Dans ces conditions d'utilisation ($T_a = 280$ K et $T_{e2} = 338$ K), le constructeur annonce un $COP = 3,6$. Pour quelle raison est-il différent du COP_{\max} ?
- Q20.** Commenter la recommandation suivante du constructeur :

"Le chauffe-eau thermodynamique trouvera sa place dans une pièce de la maison dont la température n'est pas trop faible notamment en hiver, comme un cellier ou une lingerie."

Lors de l'utilisation de l'eau du chauffe-eau, de l'eau froide remplace l'eau chaude utilisée. L'eau à l'intérieur du chauffe-eau doit alors être ramenée à 338 K.

Au cours du chauffage, la température $T_e(t)$ de la masse m_e d'eau, thermiquement isolée dans la cuve, varie. On s'intéresse à un cycle provoquant la variation élémentaire dT_e de température de l'eau de la cuve. Ce cycle est supposé réversible et au cours de ce cycle, on note δW le travail élémentaire reçu par le fluide de la part du compresseur, δQ_f le transfert thermique élémentaire reçu par le fluide de la part de la source froide et δQ_c le transfert thermique élémentaire reçu par le fluide de la part de la source chaude.

L'air environnant est toujours à la température $T_a = 280$ K ($\theta_a = 7$ °C) que l'on suppose constante.

- Q21.** Appliquer le premier principe de la thermodynamique au fluide au cours de ce cycle.
- Q22.** Appliquer le second principe de la thermodynamique au fluide au cours de ce cycle et en déduire une relation liant les transferts thermiques δQ_c et δQ_f aux températures T_a et $T_e(t)$.
- Q23.** Exprimer le transfert thermique δQ_c en fonction de m_e , de la capacité thermique massique de l'eau c_e et de la variation élémentaire dT_e de température de l'eau.
- Q24.** En déduire les expressions du transfert thermique δQ_f et du travail δW en fonction de m_e , c_e , dT_e , T_a et $T_e(t)$.

On suppose initialement que cette masse d'eau est à la température $T_{e1} = 288$ K ($\theta_{e1} = 15$ °C) et qu'elle est chauffée jusqu'à atteindre $T_{e2} = 338$ K ($\theta_{e2} = 65$ °C).

- Q25.** Déterminer alors l'expression du travail W reçu par le fluide de la part du compresseur pour faire évoluer la température de l'eau de la cuve de T_{e1} à T_{e2} en fonction de m_e , c_e , T_a , T_{e1} et T_{e2} .
- Q26.** L'application numérique donne $W = 4,33$ MJ. Quelle serait l'élévation de température si la même énergie W avait été fournie par un chauffe-eau électrique ?

- Fin de l'épreuve -