

Vrai / Faux

1. Sur un cycle, la variation des fonctions d'état (U , S) est nulle.

Vrai Faux

2. L'inégalité de Clausius pour un cycle est $\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} \geq 0$.

Vrai Faux

3. Pour un cycle moteur, $W > 0$.

Vrai Faux

4. Dans une machine frigorifique, on cherche à refroidir la source froide donc $Q_F < 0$.

Vrai Faux

5. Le rendement d'un moteur ditherme peut être supérieur à 1.

Vrai Faux

Pour bien démarrer

Exercice n°1 - Pompe à chaleur domestique (★)

On veut maintenir la température d'une maison à $T_1 = 20^\circ\text{C}$ alors que la température extérieure est égale à $T_2 = 5^\circ\text{C}$ en utilisant une pompe à chaleur. L'isolation thermique de la maison est telle qu'il faut lui fournir un transfert thermique égal à 200 kJ par heure.

1. Faire un schéma de principe de la pompe, sur lequel figurent les échanges thermiques et le travail, tous comptés comme reçus par le fluide circulant dans la pompe. Préciser le signe de ces échanges.
2. Quel doit être le cycle thermodynamique suivi par le fluide pour que l'efficacité de la pompe à chaleur soit maximale ?

3. Définir et calculer l'efficacité théorique maximale de la pompe dans ces conditions. Montrer qu'elle ne dépend que de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Quel est le sens physique de l'efficacité ?
4. En déduire la puissance électrique minimale consommée par la pompe à chaleur.
5. En supposant la température intérieure imposée, pour quelle température extérieure l'efficacité est-elle maximale ? Commenter.

Exercice n°2 - Se rafraîchir avec un frigo ? (★)

Un réfrigérateur est une machine thermique à écoulement, dans laquelle un fluide subit une série de transformations thermodynamiques cycliques. À chaque cycle le fluide extrait de l'intérieur du frigo un transfert thermique $|Q_{\text{int}}|$, cède un transfert thermique $|Q_{\text{ext}}|$ à la pièce dans laquelle se trouve le frigo et reçoit un travail $|W|$ fourni par un moteur électrique. On fait l'hypothèse que l'intérieur du réfrigérateur et l'air ambiant constituent deux thermostats aux températures respectives $T_{\text{int}} = 268 \text{ K}$ et $T_{\text{ext}} = 293 \text{ K}$ et qu'en dehors des échanges avec ces thermostats les transformations sont adiabatiques.

1. Quel est le signe des énergies échangées ?
2. Lorsqu'il fait très chaud, est-ce une bonne idée d'ouvrir la porte de son frigo pour refroidir sa cuisine ?
3. Pourquoi cela est-il possible avec un climatiseur ?

Exercices essentiels

Exercice n°3 - Réchauffement d'un fleuve par une centrale (★★)

Dans une centrale nucléaire, la turbine à vapeur est un moteur ditherme fonctionnant entre deux sources de chaleur : une source chaude (eau du circuit primaire) de température T_c , et une source froide (eau d'un fleuve) de température T_f . La centrale fournit une puissance \mathcal{P} .

1. Calculer le rendement η de la centrale nucléaire sachant qu'il est égal à 60% du rendement de Carnot.
2. Exprimer le transfert thermique \dot{Q}_c par unité de temps de la source chaude vers l'agent thermique en fonction de η et \mathcal{P} .

3. Exprimer le transfert thermique \dot{Q}_f par unité de temps de l'eau du fleuve vers l'agent thermique.
Réaliser l'application numérique.
4. L'eau du fleuve servant de source froide a un débit volumique noté D_v .
Calculer la variation de température ΔT de l'eau du fleuve en contact à chaque instant avec l'agent thermique.

Données : $T_c = 579 \text{ K}$; $T_f = 283 \text{ K}$; $D_v = 300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Exercice n°4 - Cycle Beau de Rochas (★★)

Le moteur à explosion est un moteur à combustion interne dont le fonctionnement est bien décrit par un cycle Beau de Rochas. Le fluide (mélange air-essence) décrivant le cycle est assimilé à un gaz parfait diatomique. Il subit les transformations suivantes :

- ▷ (AB) : compression isentropique de V_{\min} à V_{\max} jusqu'à l'explosion du mélange;
- ▷ (BC) : augmentation isochore de la pression;
- ▷ (CD) : détente isentropique de V_{\max} à V_{\min} des produits de la combustion;
- ▷ (DA) : diminution isochore de la pression jusqu'au point A (échappement).

1. Représenter le cycle sur un diagramme (P, V) . Préciser la fonction donnant l'allure des tronçons isentropiques.
2. Montrer que le rendement η du cycle s'exprime : $\eta = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}$.
3. Exprimer le rendement η du cycle en fonction du taux de compression du moteur $\alpha = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$. Calculer η pour $\alpha = 9,0$ et $\gamma = \frac{7}{5}$.

Donnée : relation algébrique : $\frac{a}{b} = \frac{c}{d} = \frac{a-c}{b-d}$.

Résolution de problème

Vous achetez six bouteilles de 1 L de jus de fruit que vous rangez dans votre réfrigérateur. Une heure plus tard, elles sont à la température du frigo. Combien vous coûte ce refroidissement ?

Données :

- ▷ l'efficacité thermodynamique du réfrigérateur vaut 70% de l'efficacité de Carnot ;
- ▷ l'isolation imparfaite du réfrigérateur se traduit par des fuites thermiques de puissance 10 W ;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide : $4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- ▷ tarifs EDF : 1 kWh coûte 15 centimes d'euros.

Éléments de réponse

Vrai / Faux

1. Vrai 2. Faux 3. Faux 4. Faux 5. Faux

Exercice n°1

- Une pompe à chaleur reçoit un transfert thermique de la source froide ($Q_f = Q_2 > 0$) et cède un transfert thermique à la source chaude ($Q_c = Q_1 < 0$). Cela nécessite de lui apporter du travail ($W > 0$).
- Cycle de Carnot : deux isothermes aux températures des sources et deux adiabatiques réversibles.
- L'efficacité de Carnot vaut $e_c = -\frac{Q_c}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = 20$

L'efficacité = performance énergétique de la PAC : pour 1J d'énergie électrique fournie au moteur, on récupère e joule de transfert thermique cédé à la source chaude.

- En utilisant la définition de l'efficacité, on trouve $e = \frac{P_{th}\Delta t}{P_{elec}\Delta t}$

$$\text{Soit } P_{elec} = \frac{P_{th}}{e} = 2,8 \text{ kW.}$$

- L'efficacité de la PAC augmente lorsque la différence de température entre les sources décroît, elle est optimale si les deux sources ont même température ... mais alors il n'y a plus besoin de chauffer !

Exercice n°2

- Frigo : machine réceptrice, qui prélève du transfert thermique à la source froide ($Q_{int} > 0$) car le transfert thermique est fourni au fluide) pour le céder à la source chaude ($Q_{ext} < 0$). Cela demande de fournir de l'énergie sous forme de travail ($W > 0$).
- Pour pouvoir refroidir sa cuisine en ouvrant son frigo, il faudrait que globalement le transfert thermique prélevé à l'intérieur du frigo $|Q_{int}|$ (qui serait au final prélevé à l'air de la cuisine, puisque la porte est ouverte) soit plus grand que celui cédé à la source chaude $|Q_{ext}|$, qui n'est autre que l'air de la cuisine. D'après le premier principe,

$$|Q_{int}| - |Q_{ext}| + W = 0 \quad \text{d'où} \quad |Q_{int}| - |Q_{ext}| = -W < 0.$$

- On en déduit qu'il est impossible d'avoir $|Q_{int}| > |Q_{ext}|$ comme on l'aurait aimé. Laisser son frigo ouvert ne peut conduire qu'à réchauffer l'air de la cuisine.

Exercice n°3

- Rendement de Carnot : $\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$.

Rendement de la centrale : $\eta = 0,60 \times \eta_c = 0,307 = 37 \%$.

- Rendement d'un moteur : $\eta = -\frac{W}{Q_c} = \frac{P}{Q_c}$. On en déduit $\dot{Q}_c = \frac{P}{\eta}$.

- Premier principe appliqué à l'agent thermique sur un cycle : $\dot{Q}_f = -\dot{Q}_c + P$.

On en déduit $\dot{Q}_f = \left(1 - \frac{1}{\eta}\right) P = -2,27 \text{ GW}$.

- Premier principe appliqué au volume d'eau $D_v t$ traversant la centrale pendant t : $\Delta H = -\dot{Q}_f t$.

Phase condensée idéale : $\Delta H = \rho D_v t c \Delta T$.

On en déduit $\Delta T = -\frac{\dot{Q}_f}{\rho c D_v} = 1,80 \text{ K}$.

Exercice n°4

- Transformation isentropique d'un gaz parfait : loi de Laplace.

$PV^\gamma = \text{cste}$ donc $P = \frac{1}{V^\gamma}$ sur AB et CD.

- Premier principe appliqué au cycle : $0 = W_{ABCD} + Q_{ABCD}$.

$W_{ABCD} = W_{AB} + W_{CD}$, car BC et AD isochores (volume constant) donc travail nul.

$Q_{ABCD} = Q_{BC} + Q_{DA}$, car AB et CD isentropiques ET sur un cycle (réversibilité) donc adiabatiques.

Première loi de Joule : $\Delta U_{MN} = C_v(T_N - T_M)$ pour une transformation MN.

Premier principe : $\Delta U_{MN} = W_{MN} + Q_{MN}$ pour une transformation MN.

Rendement : $\eta = \frac{\text{énergie récupérée}}{\text{énergie fournie}} = \frac{-W_{ABCD}}{Q_{BC}} = 1 + \frac{Q_{DA}}{Q_{BC}} = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}$.

- Loi de Laplace : $TV^{\gamma-1} = \text{cste}$ sur AB et CD, donc $\frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D} = \alpha^{\gamma-1} =$

$$\frac{T_B - T_C}{T_A - T_D}$$

Finalement $\eta = 1 - \alpha^{1-\gamma} = 58\%$.

Résolution de problème

On trouve que le prix de ce refroidissement est d'environ 0,2 centimes d'euros.