



Capacités exigibles :

- Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme ☒.
- Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme ●.
- Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours du cycle □.
- Citer quelques ordres de grandeurs des rendements des machines thermiques réelles actuelles ✨.

Exercice 1 Une valve à deux temps*** ☒●□✨

En 1860, Étienne Lenoir déposa un brevet pour le premier moteur à combustion interne à deux temps, utilisant un piston à double effet. Il le fabriqua la même année en 400 exemplaires qui servirent à faire fonctionner les premiers bateaux à moteur, sur la Seine. Ce moteur reste le moteur exclusif des cyclomoteurs.

Le principe de fonctionnement idéalisé en est le suivant.

- De (0) à (1) : phase d'admission et inflammation du mélange gazeux en (1) à la pression P_1 . La valve d'admission est fermée en (1), le système renferme un nombre n de moles gazeuses du mélange, supposé homogène.
- De (1) à (2) : combustion isochore du mélange, due à l'explosion, jusqu'à la pression P_2 .
- De (2) à (3) : détente adiabatique réversible du mélange jusqu'à la pression P_1 .
- De (3) à (0) : évacuation isobare des gaz brûlés, la valve d'échappement s'ouvrant en (1).

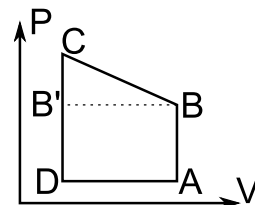
On considère que le mélange se comporte comme un gaz parfait de coefficient isentropique γ , de masse molaire $M \approx 29 \text{ g mol}^{-1}$ et que tout se passe comme si le système fermé constitué des n moles de gaz admises décrivait continûment le cycle (1) $\rightarrow$ (2) $\rightarrow$ (3) $\rightarrow$ (1). La pression initiale en (1) est $P_1 = 1,0 \text{ bar}$, le volume V_1 , la température $T_1 = 300 \text{ K}$. La pression à la fin de la combustion est $P_2 = 6,0 \text{ bar}$, le volume en (3) V_3 .

On note $a = \frac{V_3}{V_1}$ et $\delta = \frac{P_2}{P_1}$. La cylindrée de ce moteur est $C = V_3 - V_1 = 50 \text{ cm}^3$ et on prend $\gamma = 1,4$.

1. En considérant la transformation (2) $\rightarrow$ (3), déterminer la relation qui existe entre a et δ . Donner la valeur numérique de ces deux quantités.
2. Caractériser entièrement les états (1), (2), (3), en donnant les volumes, pressions et températures correspondants. On pourra présenter les résultats dans un tableau. Que vaut alors n ?
3. Placer les points (0), (1), (2), (3) sur un diagramme de Watt (P, V). Le cycle est-il un cycle moteur ? On justifiera la réponse.
4. Pour chacune des transformations correspondant au cycle (1) $\rightarrow$ (2) $\rightarrow$ (3) $\rightarrow$ (1), déterminer les expressions des travaux W_{ij} et des transferts thermiques Q_{ij} reçus par les n moles de gaz. On exprimera les résultats en fonction des données et on effectuera les applications numériques.
5. Définir le rendement η de ce moteur et l'exprimer en fonction de a , γ et δ . Faire l'application numérique. Comment évolue η avec γ ?

Exercice 2 Le cœur : une pompe ☒●✨

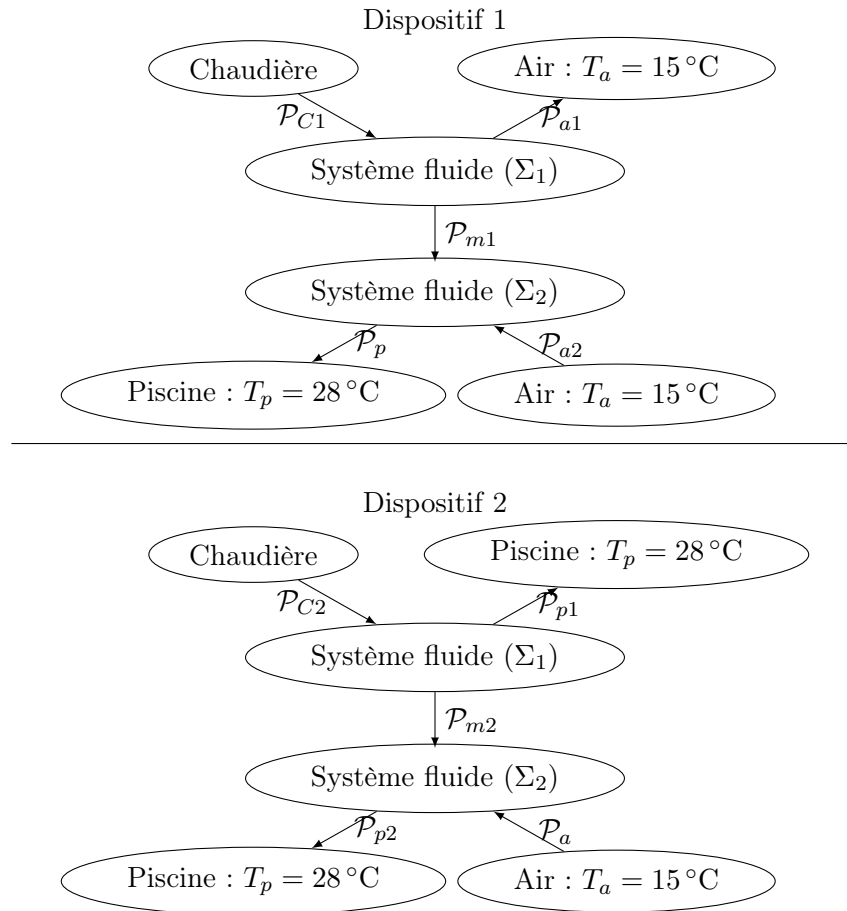
La circulation du sang dans l'organisme est assurée par le cœur, qui joue le rôle de pompe. Le cycle cardiaque, représenté par un diagramme de Watt (P, V) concerne le ventricule gauche du cœur, principale partie active du cœur du point de vue mécanique ; ce cycle est représenté sur la figure ci-contre, qui décrit l'évolution de la pression et du volume du sang circulant dans ce ventricule : $V_A = V_B = 150 \text{ cm}^3$, $V_C = V_D = 90 \text{ cm}^3$, $P_A - P_0 = P_D - P_0 = 10 \text{ mm Hg}$, $P_B - P_0 = 80 \text{ mm Hg}$, $P_C - P_0 = 120 \text{ mm Hg}$ où $P_0 = 760 \text{ mm Hg} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. On admettra que l'on peut considérer le cycle comme étant décrit de manière réversible.



1. Préciser, en justifiant rapidement la réponse dans quel sens le cycle est décrit. Interpréter chaque étape. La pression P_0 joue-t-elle un rôle dans le raisonnement.
2. Déterminer littéralement, en fonction de V_A , V_D , P_A , P_B , P_C le travail reçu par le cœur au cours de chaque cycle.
3. Déterminer numériquement le travail reçu par le cœur au cours de chaque cycle.
4. Pour un cœur décrivant 70 cycles par minute, quelle est la puissance reçue par le cœur ?

Exercice 3 Tous dans la piscine! ✨

Jean-Michel vient de faire l'acquisition d'un petit chalet en Bourgogne et envisage d'y installer une petite piscine. Il dispose d'une chaudière à bois et envisage de l'utiliser comme source chaude d'un moteur puis de récupérer l'énergie fournie par ce dernier pour alimenter une pompe à chaleur (PAC), mais hésite entre les deux dispositifs ci-dessous.



On note (Σ_1) le système fluide parcourant le cycle moteur et (Σ_2) le système fluide parcourant le cycle récepteur de la PAC. Sur les schémas sont représentées les différentes puissances échangées, avec le sens des échanges correspondants. On supposera pour simplifier que la puissance mécanique fournie par le moteur est entièrement utilisée dans le fonctionnement de la PAC. Le régime de fonctionnement est supposé permanent.

Le cahier des charges de Jean-Michel est le suivant : fournir à la piscine la puissance thermique totale $\mathcal{P}_{p,t} = 3,0 \text{ kW}$. Le rendement du moteur est $\eta = 35\%$ et le coefficient de performance de la PAC est $e = 4,0$ dans les conditions de température indiquées sur le schéma.

1. Indiquer les signes des différentes puissances représentées sur les schémas 1 et 2.
2. En utilisant vos connaissances sur les machines thermiques, et en utilisant les données de l'énoncé, déterminer les valeurs numériques de $\mathcal{P}_{C1}$, $\mathcal{P}_{m1}$, $\mathcal{P}_{C2}$ et $\mathcal{P}_{m2}$.
3. Sachant que le but de l'installation est de chauffer la piscine, comment définir son efficacité globale e_t ? Calculer les valeurs de e_{t1} et e_{t2} correspondant aux deux dispositifs et commenter.
4. La PAC est-elle en fonctionnement réversible? On justifiera numériquement la réponse.
5. Quel est le dispositif qui utilise le principe d'une cogénération?

Exercice 4 Source à température variable - Cycle pompe à chaleur ✨

On veut échauffer une masse d'eau liquide, $m = 1,00 \text{ kg}$, de 10°C à 40°C sous la pression atmosphérique (la capacité thermique massique de l'eau $c = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). À cet effet, on utilise une pompe à chaleur fonctionnant réversiblement entre cette masse d'eau et un lac à une température θ_2 constante, égale à 10°C .

1. Définir l'efficacité thermique « instantanée », en considérant un cycle élémentaire au cours duquel la source chaude (la masse m d'eau) voit sa température évoluer de T à $T + dT$.
2. Calculer l'énergie à fournir au cours de cette opération.
3. En déduire l'efficacité thermique apparente, associée au bilan énergétique.

Exercice 5 Machine à vapeur-cycle de Rankine ☒☐☑☒

L'eau décrit le cycle suivant :

- AB : l'eau liquide saturant à T_1 et P_1 , est comprimé de façon isentropique dans une pompe jusqu'à la pression P_2 de la chaudière.
- BCD : l'eau passe dans la chaudière et s'y réchauffe jusqu'à T_2 (BC) puis s'y vaporise (CD) sous la pression P_2 .
- DE : la vapeur saturante passe dans le cylindre à T_2 , P_2 et on effectue une détente isentropique jusqu'à T_1 , P_1 : on obtient un mélange liquide-vapeur de titre x en vapeur.
- EA : le piston par son retour chasse le mélange dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

On assimile le liquide à un liquide incompressible de capacité thermique massique $c_l = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la vapeur à un gaz parfait. On donne les caractéristiques : $P_1 = 0,20 \text{ bar}$; $T_1 = 60^\circ\text{C} = 333 \text{ K}$; $\Delta h_{vap}(T_1) = l_1 = 2360 \text{ kJ.kg}^{-1}$; $P_2 = 12 \text{ bar}$; $T_2 = 188^\circ\text{C} = 461 \text{ K}$; $\Delta h_{vap}(T_2) = l_2 = 1990 \text{ kJ.kg}^{-1}$. On raisonne sur l'unité de masse du fluide.

1. Justifier que la compression isentropique AB du liquide (saturant en A) est confondue avec l'isotherme T_1 .
2. Représenter la totalité du cycle de Rankine en diagramme (P, v) .
3. Justifier que la détente isentropique DE de la vapeur saturante en E conduit nécessairement à un mélange diphasé dont on calculera le titre massique en vapeur.
4. Exprimer et calculer les divers transferts thermiques pour chaque étape du cycle de Rankine.
5. Définir le rendement de cette machine à vapeur. L'exprimer puis le calculer.
6. Quelles sont les causes d'irréversibilité d'une telle machine ?

Exercice 6 Machine frigorifique*** ☒☐☑☒

On peut modéliser le comportement thermodynamique du fluide dans une machine frigorifique à fluide diphasé par la succession de transformations suivantes :

- compression adiabatique en phase gazeuse de l'état A à l'état B ; au point A , le fluide est à l'état de vapeur saturante ;
- refroidissement isobare de la vapeur de l'état B à l'état C ; au point C , le fluide est à l'état de vapeur saturante ;
- liquéfaction isobare et totale de l'état C à l'état D ; au point D , le fluide est à l'état de liquide saturant ;
- détente adiabatique irréversible du fluide que l'on peut modéliser ici par une détente isenthalpique entre l'état D et l'état E ; au point E , le fluide est dans un état diphasé ;
- vaporisation isobare totale du fluide de l'état E à l'état A .

On donne les enthalpies massiques du fluide aux points A , B et D : $h_A = 1167 \text{ kJ.kg}^{-1}$, $h_B = 1355 \text{ kJ.kg}^{-1}$ et $h_D = 30 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

1. Représenter l'allure du cycle suivi dans un diagramme (P, v) , en indiquant les positions des points A , B , C , D et E .
2. Calculer les transferts thermiques massiques q_{chaud} et q_{froid} mis en jeu au cours d'un cycle, respectivement au contact de la source chaude et de la source à froide.
3. Calculer approximativement le coefficient d'efficacité e de la machine frigorifique.
4. Le titre massique en vapeur x est défini comme le rapport de la masse de vapeur sur la masse totale de fluide. On donne la chaleur latente massique de vaporisation du fluide $l_v(T_A) = 1293 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Calculer le titre massique en vapeur x_E dans l'état E .
5. On utilise cette installation frigorifique pour maintenir constante la température d'une chambre froide à laquelle il faut prélever 5000 kJ par heure. Sachant que la machine fonctionne en régime stationnaire, calculer le débit massique D_m du fluide frigorifique.

Exercice 7 Réfrigérateur à absorption ☒☉☼

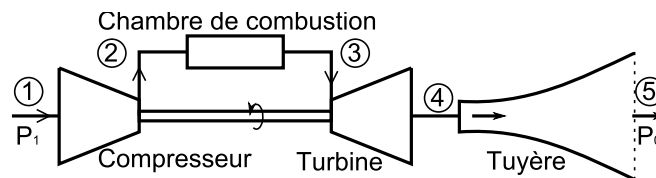
On sait réaliser des réfrigérateurs dits « à absorption » qui ne nécessitent pas de moteur. Ils extraient une énergie thermique Q_1 de la source froide à la température T_1 (effet frigorifique) et reçoivent une énergie thermique Q_3 d'une source auxiliaire à T_3 . Ils échangent également de l'énergie thermique avec l'air ambiant à T_2 ($T_3 > T_2 > T_1$).

1. Montrer qu'un tel appareil est thermodynamiquement possible si une condition sur Q_1 , Q_3 et les températures est réalisée.
2. Définir l'efficacité de ce type de réfrigérateur, et montrer que celle-ci reste inférieure à une valeur que l'on exprimera en fonction des seules températures. AN : $T_1 = 265 \text{ K}$; $T_2 = 300 \text{ K}$; $T_3 = 400 \text{ K}$.
3. Comparer avec l'efficacité d'un réfrigérateur classique fonctionnant avec deux sources thermiques (T_1 et T_2).

Exercice 8 Turboréacteur ☒☉☒

Un turboréacteur d'avion est constitué d'un compresseur, d'une chambre de combustion, d'une turbine et d'une tuyère dont le rôle est d'accélérer les gaz pour fournir une poussée importante. Le travail reçu par la turbine lors de la détente des gaz sert uniquement à entraîner le compresseur. Les différentes phases de ce cycle ouvert sont :

- 1 $\rightarrow$ 2 : compression isentropique de l'air admis dans le compresseur,
- 2 $\rightarrow$ 3 : combustion isobare du carburant dans la chambre de combustion,
- 3 $\rightarrow$ 4 : détente isentropique des gaz brûlés dans la turbine.
- 4 $\rightarrow$ 5 : détente isentropique des gaz dans la tuyère jusqu'à la pression atmosphérique P_0 .



Le débit massique de l'air est $D_m = 65 \text{ kg.s}^{-1}$ et le pouvoir calorifique du carburant est $P_{cal} = 45.10^6 \text{ J.kg}^{-1}$. La combustion s'effectuant avec un très large excès d'air, on assimilera gaz brûlés et air à un gaz parfait diatomique. La vitesse de l'air en entrée de la tuyère est négligeable et on pourra négliger toute variation d'énergie potentielle du gaz.

1. Déterminer la pression P_4 des gaz en sortie de la turbine.
2. Déterminer la masse de carburant consommée par seconde.
3. Déterminer la vitesse d'éjection des gaz, la poussée du turboréacteur et le rendement thermique η_{th} défini comme le rapport de la variation d'énergie cinétique du gaz entre l'entrée et la sortie sur la chaleur fournie par la chambre de combustion.

Données : $T_3 = 1200 \text{ K}$, $\tau = \frac{P_2}{P_1} = 8$, $T_1 = 300 \text{ K}$, $\gamma = 1,4$, $P_1 = P_0 = 1 \text{ bar}$, masse molaire de l'air $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$.

Solutions des exercices

¹Réponses : 1) $\delta = 6,0$, $a = 3,6$, 2) $n = 7,7 \times 10^{-4} \text{ mol}$, 5) $\eta = 0,27$

²Réponses : 2) $W = (V_A - V_D)(\frac{P_B + P_C}{2} - P_A)$; 3) $W = 0,72 \text{ J}$; $\mathcal{P} = 0,84 \text{ W}$

³Réponses : 2) $\mathcal{P}_{C1} = 2,1 \text{ kW}$, $\mathcal{P}_{C2} = 1,5 \text{ kW}$, $\mathcal{P}_{m2} = 0,51 \text{ kW}$; 3) $e_{t1} = 1,4$, $e_{t2} = 2,1$.

⁴Réponses : 1) $e(T) = \frac{T}{T - T_2}$; 2) $W = 6,21.10^6 \text{ J}$; 3) $e(T_2, T_1) = 20,2$.

⁵Réponses : 3) $x = 0,801$; 5) $\eta = 25\%$

⁶Réponses : 2) $q_c = -1325 \text{ kJ.kg}^{-1}$, $q_f = 1137 \text{ kJ.kg}^{-1}$; 3) $e = 6,0$; 4) $x = 0,12$; 5) $D_m = 1,2 \text{ g.s}^{-1}$

⁷Réponses : 1) $Q_3 \geq Q_1 \frac{T_3(T_2 - T_1)}{T_1(T_3 - T_2)}$; 2) $e \leq 1,9$

⁸Réponses : 1) $P_4 = 3,62 \text{ bar}$; 2) $D_m^{carb} = 0,95 \text{ kg.s}^{-1}$; 3) $T_4 = 956,6 \text{ K}$, $c_5 = 767 \text{ m.s}^{-1}$, $\eta_{th} = 44,8\%$