

TD 4	Machines thermiques Thermodynamique - Chap 5	SUP Aux Lazaristes
------	--	-----------------------

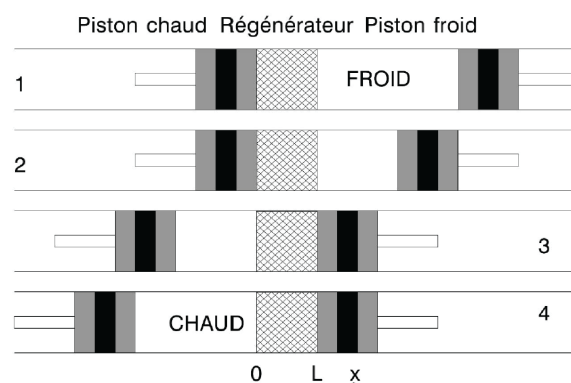
Exercice 1 : Pompe à chaleur

On veut maintenir la température d'une maison à $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ alors que la température extérieure est égale à $\theta_2 = 5^\circ\text{C}$ 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. Rappeler le schéma de principe d'une pompe à chaleur ditherme et le sens réel des échanges d'énergie du fluide caloporteur.
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 2 : Moteur de Stirling

Le moteur de Stirling est constitué de deux chambres, une chaude et une froide, reliées par un régénérateur de volume constant pouvant être constitué de fils de cuivre tressés. Le gaz, en circuit fermé, reçoit un transfert thermique d'une source chaude (par exemple une chaudière à combustion) et cède un transfert thermique à la source froide (par exemple l'atmosphère). Le rôle du régénérateur, base de l'invention de Robert Stirling, est fondamental pour obtenir une bonne efficacité. Dans son brevet original de 1816, Stirling explique que le gaz chaud entre dans la partie chaude du régénérateur et est progressivement refroidi durant son parcours pour ressortir par l'autre extrémité à une température presque identique à la température de la source froide.



Dans le parcours inverse, le gaz est progressivement réchauffé. Cette astuce technologique permet d'avoir une partie des échanges thermiques internes au moteur. On considérera le cycle parcouru par $n = 40$ mmol d'air, considéré comme un gaz parfait de rapport isentropique $\gamma = 1,4$.

Dans un premier temps, on néglige le régénérateur : les deux chambres ne font qu'une. Le cycle de Stirling est alors modélisable par la succession de deux isothermes et deux isochores à partir d'un état (1) ($P_1 = 1$ bar, $T_1 = 300$ K). Il est décrit comme suit :

- $1 \rightarrow 2$: compression isotherme réversible à $T_f = T_1$ jusqu'à l'état (2) où $V_2 = V_1/10$
- $2 \rightarrow 3$: échauffement isochore au contact de la source chaude à $T_c = 600$ K jusqu'à l'état (3) de température $T_3 = T_c$
- $3 \rightarrow 4$: détente isotherme réversible au contact de la source chaude à T_c jusqu'à l'état (4) de volume $V_4 = V_1$
- $4 \rightarrow 1$: refroidissement isochore au contact de la source froide jusqu'à revenir à l'état 1.

1. Calculer les valeurs numériques de P , V et T pour chacun des quatre états.
2. Représenter le cycle dans le diagramme de Watt (P, V). Comment peut-on déterminer sans calcul si ce cycle est moteur ou récepteur?
3. Calculer pour chaque étape le travail et le transfert thermique reçus par le gaz.
4. Commenter ces résultats : a-t-on bien un cycle moteur?
5. Quel est, sur le plan énergétique, la production de ce système sur un cycle? Quel est le coût énergétique? En déduire l'expression et la valeur du rendement.
6. Calculer l'entropie créée au sein du système au cours du cycle. Quel type d'irréversibilité entre en jeu?

L'invention du régénérateur par Stirling a permis d'améliorer considérablement le rendement de la machine précédente. Son idée est de faire en sorte que le gaz échange du transfert thermique au cours des transformations $2 \rightarrow 3$ et $4 \rightarrow 1$ non pas avec les thermostats mais avec un système, le régénérateur, qui n'échange aucune énergie autrement qu'avec les gaz au cours des transformations $2 \rightarrow 3$ et $4 \rightarrow 1$.

7. Justifier l'idée de Stirling.
8. Que vaut le rendement dans ces conditions? Ce rendement peut-il être amélioré sans changer les sources?

Exercice 3 : Source à température variable dans une PAC

On veut échauffer une masse d'eau liquide $m = 1000 \text{ kg}$ de $T_1 = 10^\circ\text{C}$ à $T_2 = 40^\circ\text{C}$ sous la pression atmosphérique (la capacité thermique massique de l'eau vaut $c = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$). A cet effet, on utilise une pompe à chaleur fonctionnant réversiblement entre cette masse d'eau et un lac à une température T_0 constante, égale à 10°C .

1. L'eau à chauffer constitue un pseudo-thermostat puisque sa température varie. Cette variation de température est lente par rapport à la durée d'un cycle de la pompe à chaleur. On considère donc un cycle élémentaire au cours duquel la source chaude (la masse m d'eau) voit sa température évoluer de T à $T + dT$. Établir l'expression de l'efficacité thermique dite « instantanée » ou « vraie » en fonction de T et T_0 .
2. Déterminer le travail à fournir pour réaliser la transformation complète chauffant la masse m d'eau de T_1 à T_2 . Application numérique.
3. En déduire l'efficacité thermique apparente e_a associée au bilan énergétique global.

Exercice 4 :

Un moteur thermique réversible utilise comme sources de chaleur, deux bassines d'eau de même capacité thermique $C = 400 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}$, dont les températures $T_c(t)$ et $T_f(t)$ ne sont pas constantes à cause de leurs tailles finies. Les températures initiales des sources sont respectivement $T_1 = 373 \text{ K}$ et $T_2 = 293 \text{ K}$.

1. Déterminer une relation entre les variations de température des sources dT_c et dT_f sur un cycle. En déduire une relation entre T_1 , T_2 , T_c et T_f .
2. Calculer la température commune T_0 des deux sources quand le moteur s'arrête de fonctionner. Calculer alors le travail total W_F fourni par la machine jusqu'à son arrêt.
3. Calculer le rendement énergétique global η du moteur. Le comparer au rendement η_0 que l'on aurait obtenu si l'on avait maintenu constantes les températures initiales des deux sources.

Exercice 5 : Étude d'un complexe piscine-patinoire

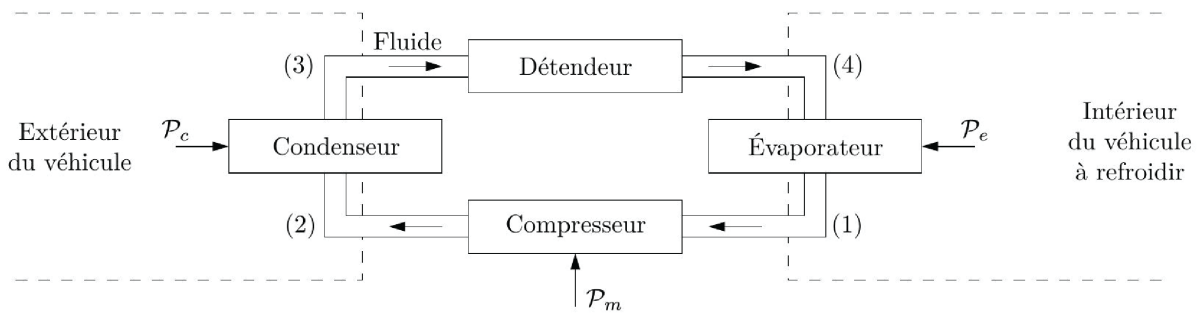
Données : $\Delta_{\text{fus}}h = 335 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$; $c_{\text{glace}} = 2,10 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$.

On étudie un complexe piscine-patinoire dont le chauffage et le refroidissement sont assurés en partie par une pompe à chaleur, au fonctionnement réversible, utilisant la piscine comme source chaude et la patinoire comme source froide. Lorsqu'elles sont en fonctionnement, la piscine est à $T_1 = 300 \text{ K}$ et la patinoire à $T_2 = 263 \text{ K}$. Elles ont des masses respectives d'eau $m_1 = 2 \cdot 10^6 \text{ kg}$ et $m_2 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ kg}$. On part d'un état initial où les deux masses d'eau sont à $T_i = 280 \text{ K}$. La température de l'équilibre eau-glace est $T_0 = 273 \text{ K}$.

1. Calculer numériquement les capacités thermiques C_1 de l'eau de la piscine, C_2 de l'eau de la patinoire lorsqu'elle est liquide et C'_2 de l'eau de la patinoire lorsqu'elle est gelée.
2. Lorsque les deux masses d'eau sont liquides, établir une expression liant leur température à la température initiale. Calculer la température T_3 de la piscine lorsque l'eau encore liquide de la patinoire atteint T_0 . Calculer le travail W_3 consommé par la pompe à chaleur.
3. On s'intéresse ici uniquement à la phase au cours de laquelle l'eau de la patinoire gèle. Établir l'expression de la température T_4 de la piscine lorsque toute la patinoire est gelée et qu'elle est encore à T_0 . Calculer le travail W_4 consommé par la pompe à chaleur.
4. Établir l'expression de la température T_5 de la piscine lorsque la patinoire atteint T_2 . Calculer le travail W_5 consommé par la pompe à chaleur.
5. L'élévation de température de T_5 à T_1 s'effectue par un chauffage direct, calculer le transfert thermique Q_6 nécessaire.
6. La pompe à chaleur et le chauffage direct consomment la même puissance $P = 200 \text{ kW}$. Quelle est la durée de mise en température du complexe ?

Exercice 6 : Climatisation d'une voiture

La quasi-totalité des véhicules neufs sont aujourd'hui équipés d'une climatisation. Pour refroidir l'air intérieur du véhicule, un fluide frigorigène, l'hydrofluorocarbure HFC désigné par le code R134a, effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur du véhicule et le compresseur.



1. Les chlorofluorocarbures ou CFC, comme le fréon, sont des fluides frigorigènes qui ont été très longtemps utilisés. Pourquoi ces fluides ont-ils été abandonnés ?

Sur le diagramme des frigorigères (P, h) de l'hydrofluorocarbure HFC, de masse molaire $M = 32 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, sont représentés :

- la courbe de saturation de l'équilibre liquide-vapeur de l'hydrofluorocarbure HFC
- les isothermes pour des températures comprises entre -40°C et 120°C par pas de 10°C ;
- les isentropes pour des entropies massiques comprises entre $1650 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $2200 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ par pas de $25 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$
- les isotitres en vapeur sous la courbe de saturation pour des titres massiques en vapeur x_V variant de 0 à 1 par pas de 0,1
- P est en bar et h en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Lors de l'exploitation du diagramme, les résultats seront donnés avec les incertitudes suivantes : $\Delta h = \pm 5 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\Delta s = \pm 25 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\Delta x = \pm 0,05$, $\Delta T = \pm 5^\circ\text{C}$, $\frac{\Delta P}{P} = \pm 5\%$.

2. Indiquer sur le diagramme les domaines liquide, vapeur et équilibre liquide-vapeur du fluide.
3. Dans quel domaine du diagramme le fluide à l'état gazeux peut-il être considéré comme un gaz parfait ?

On étudie dans la suite l'évolution du fluide au cours d'un cycle en régime permanent. Le débit massique vaut $D_m = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. On rappelle l'expression du premier principe appliqué à un système ouvert (par exemple le compresseur) en régime permanent :

$$D_m(h_s - h_e) = \mathcal{P}_w + \mathcal{P}_q$$

La puissance thermique $\mathcal{P}_e$ reçue par le fluide dans l'évaporateur permet la vaporisation isobare complète du fluide venant de (4) et conduit au point (1) à de la vapeur à température $T_1 = 5^\circ\text{C}$ et pression $P_1 = 3 \text{ bar}$. Aucune puissance mécanique n'est fournie au fluide dans l'évaporateur.

4. Placer le point (1) sur le diagramme. Relever la valeur de l'enthalpie massique h_1 et de l'entropie massique s_1 du fluide au point (1).

Le compresseur aspire la vapeur (1) et la comprime de façon adiabatique et isentropique avec un taux de compression $r = P_2/P_1 = 6$.

5. Déterminer P_2 . Placer le point (2) sur le diagramme. Relever la valeur de la température T_2 et celle de l'enthalpie massique h_2 en sortie du compresseur.
6. Déterminer la valeur de la puissance mécanique P_m reçue par le fluide lors de son passage dans le compresseur. Commenter le signe de P_m .

Le fluide sortant du compresseur entre dans le condenseur dans lequel il est refroidi de manière isobare jusqu'à la température $T_3 = 60^\circ\text{C}$.

7. Placer le point (3) sur le diagramme. Relever la valeur de l'enthalpie massique h_3 en sortie du condenseur.

Le fluide sortant du condenseur est détendu dans le détendeur supposé adiabatique jusqu'à la pression de l'évaporateur P_1 , ce qui constitue l'état (4). Un détendeur ne contient pas de parties mobiles, si bien que le fluide n'y reçoit aucun travail mécanique.

8. Montrer que la transformation dans le détendeur est isenthalpique.

9. Placer le point (4) sur le diagramme et tracer le cycle complet. Relever la valeur de la température T_4 et le titre en vapeur x_4 en sortie du détendeur.

10. En déduire la puissance thermique $\mathcal{P}_e$ échangée par le fluide lors de son passage à travers l'évaporateur entre (4) et (1). L'air intérieur du véhicule est-il refroidi ?

11. Définir l'efficacité e , ou coefficient de performance, du climatiseur. Calculer sa valeur.

12. Comparer cette valeur à celle d'un climatiseur de Carnot fonctionnant entre la température de l'évaporateur et la température de liquéfaction du fluide sous la pression P_2 . Commenter le résultat obtenu.

