

Chapitre P16

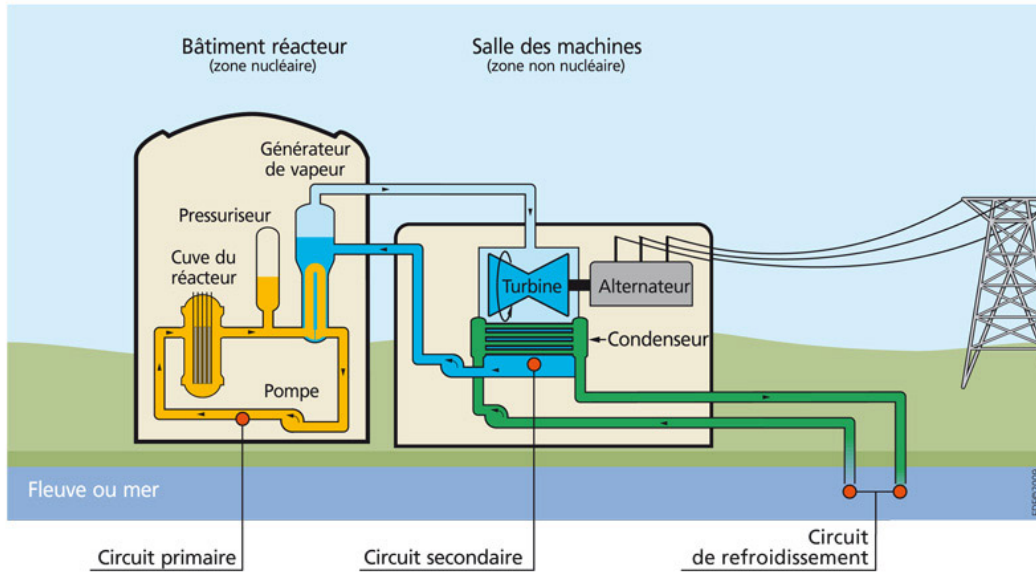
Machines thermiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.	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 les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Justifier et utiliser le théorème de Carnot. Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération. <i>Capacité expérimentale : mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.</i>

Questions de cours

- Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur ditherme.
- Définir l'efficacité d'une machine thermique et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle pour un moteur, une machine frigorifique, ou une pompe à chaleur.
- Montrer que le rendement r d'un moteur vérifie $r \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$.
- Définir le cycle de Carnot et énoncer le théorème de Carnot.

Document 1. Fonctionnement d'un moteur



Dans un moteur comme une centrale thermique, le fluide caloporteur (de l'eau) effectue un cycle en traversant successivement :

- ❑ un **générateur de vapeur** où le fluide s'évapore en recevant l'énergie libérée par la combustion d'un combustible (charbon, gaz, biomasse) ou par l'eau chaude pressurisée du circuit primaire d'une centrale nucléaire après son passage dans la cuve du réacteur :

$$Q_C > 0$$

- ❑ cette vapeur se déplace et met en rotation une **turbine** couplée à un **alternateur**, ce qui produit de l'électricité :

$$W < 0$$

- ❑ la vapeur est liquéfiée dans le **condenseur** au contact d'un circuit de refroidissement :

$$Q_F < 0$$

Document 2. Fonctionnement d'un récepteur

Dans un réfrigérateur, un climatiseur ou une pompe à chaleur (PAC), le fluide frigorigène effectue un cycle en traversant successivement :

- ❑ un **compresseur** qui augmente la pression et la température du fluide en exerçant dessus un travail :

$$W > 0$$

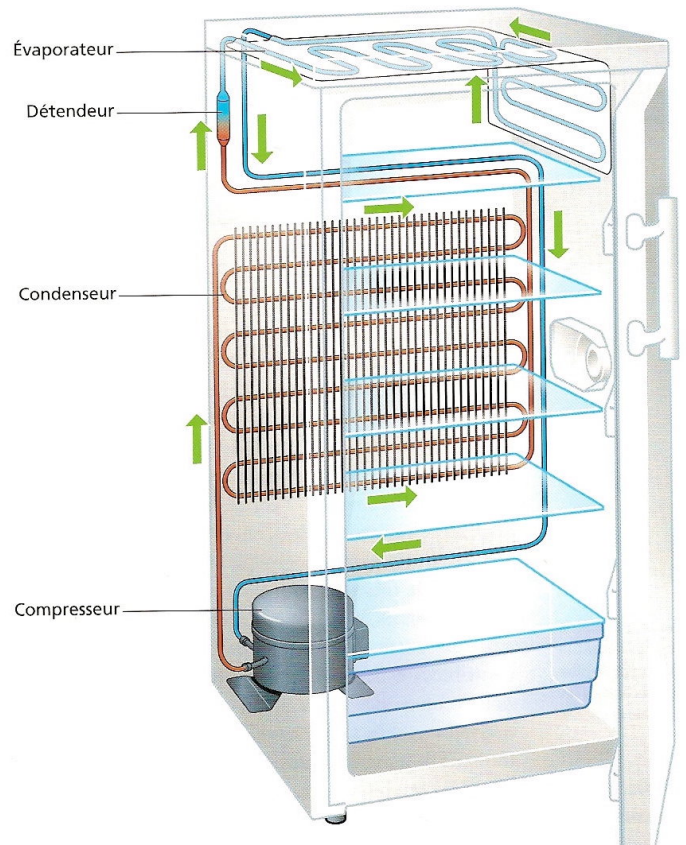
- ❑ un **condenseur** dans lequel le fluide cède en se refroidissant et/ou se liquéfiant un transfert thermique à la source chaude (air de la pièce pour le réfrigérateur, air extérieur pour un climatiseur, circuit d'eau de chauffage pour une PAC) :

$$Q_C < 0$$

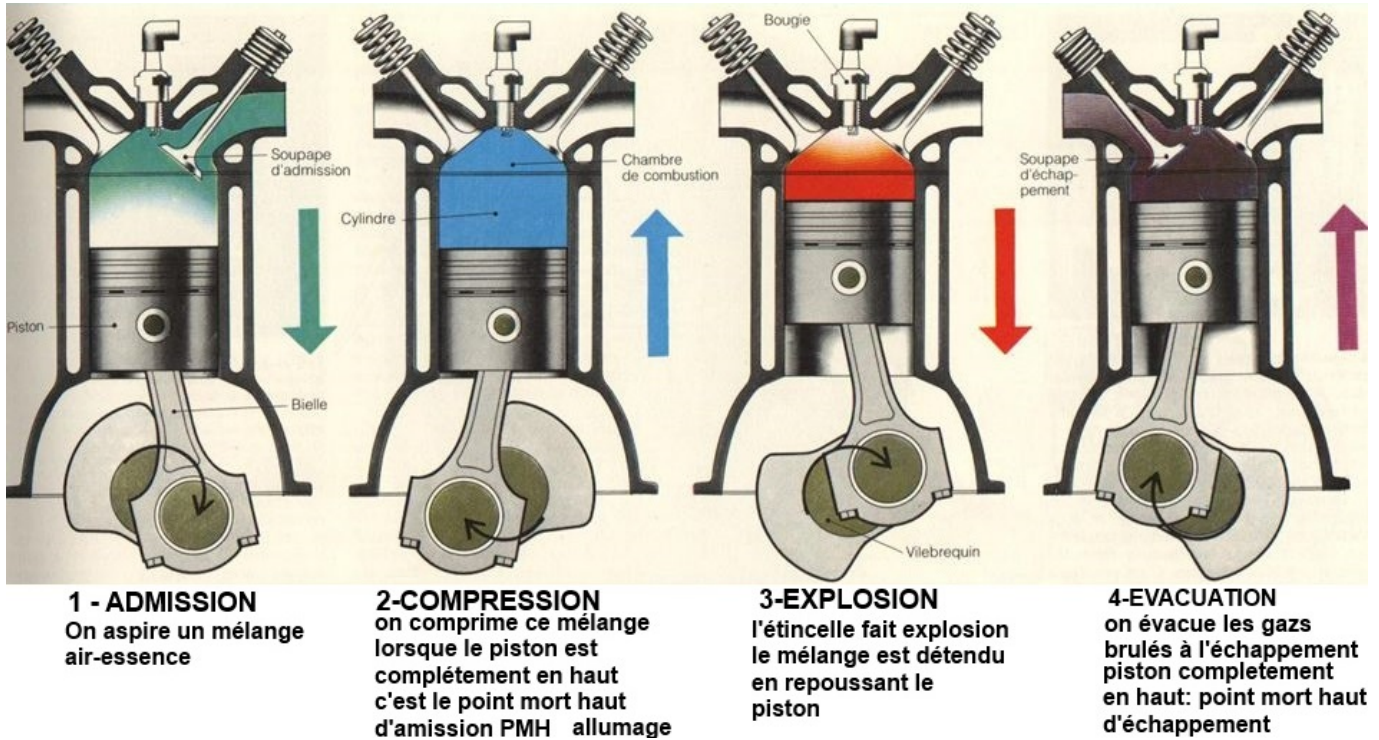
- ❑ un **détendeur** dans lequel la température et la pression du fluide baissent sans échange d'énergie ;

- ❑ un **évaporateur** dans lequel le fluide se réchauffe et/ou s'évapore en recevant un transfert thermique de la source froide (air intérieur du réfrigérateur, air de la pièce pour un climatiseur, air extérieur pour une PAC) :

$$Q_F > 0$$



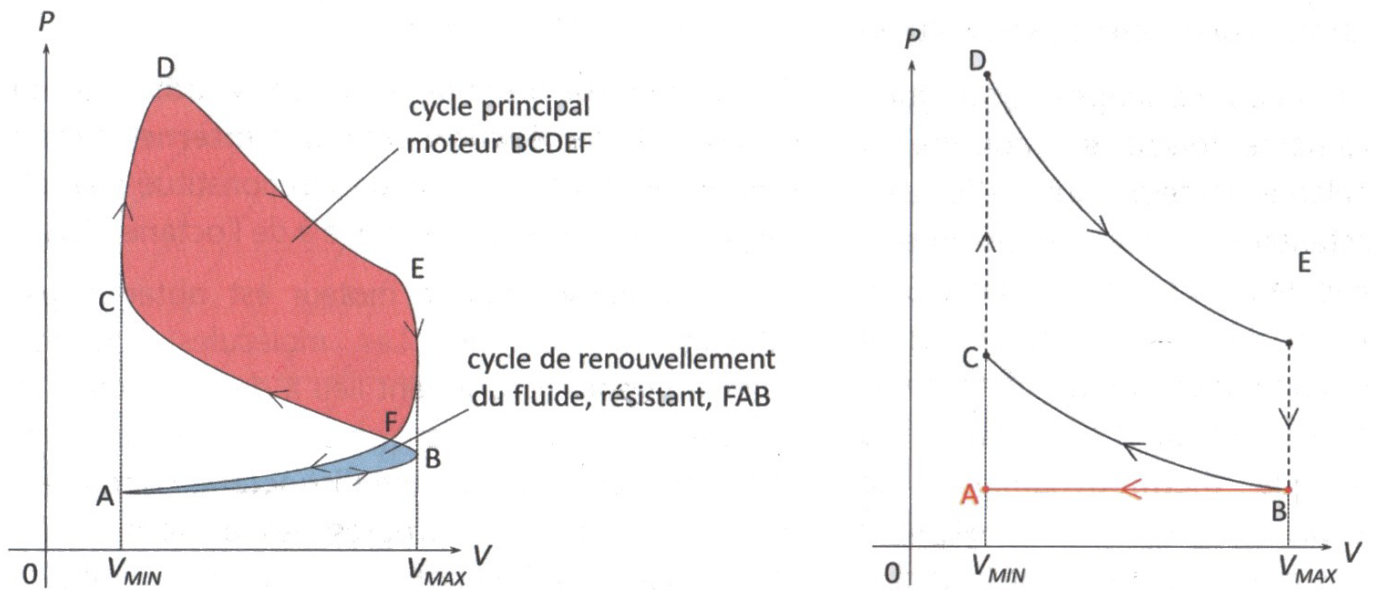
Document 3. Moteur à explosion



Le système thermodynamique est le mélange air-carburant introduit dans le cylindre. Les échanges d'énergie sont :

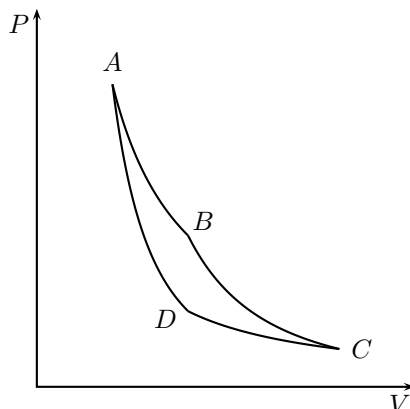
- un transfert thermique Q_C est apporté par la combustion du mélange au moment de l'explosion ;
- un travail $|W|$ est fourni au piston lors de la détente ;
- un transfert thermique $|Q_F|$ est cédé à l'air extérieur lors de l'évacuation.

Le cylindre est un système ouvert décrivant le cycle d'Otto (diagramme de Watt à gauche). On le modélise comme une machine thermique en raisonnant sur le système fermé de B à F en supposant qu'admission et refoulement se compensent exactement, et on idéalise les transformations. On obtient le cycle Beau de Rochas, constitué de deux adiabatiques et deux isochores.



Exercice de cours A. Cycle de Carnot

Soit une machine thermique constituée d'un gaz parfait d'indice adiabatique γ suivant un cycle de Carnot en contact avec des thermostats de température T_c et T_f . Dans le diagramme de Clapeyron, le cycle a l'allure suivante :



1. Quelle est l'équation d'une isotherme dans ce diagramme ? d'une adiabatique ?
2. Identifier les isothermes et les adiabatiques dans ce diagramme, en étudiant leur pente.
3. Le cycle parcouru dans le sens $ABCD$ est-il moteur ou récepteur ?
4. Soit $a = \frac{V_B}{V_A}$. Exprimer les volumes et les pressions en chaque point en fonction de V_A , P_A , a , T_f et T_c .
5. Calculer Q_C et Q_F . En déduire W .
6. Exprimer l'efficacité des machines fonctionnant selon le cycle de Carnot direct ou inversé : moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur.

Exercice de cours B. Rendement du cycle de Beau de Rochas

On considère un gaz parfait de coefficient adiabatique γ parcourant le cycle de Beau de Rochas de manière réversible. On note $a = V_{\max}/V_{\min}$ le taux de compression.

1. Déterminer l'expression des transferts thermiques, en fonction de n et des températures aux 4 points du cycle.
2. Exprimer le rapport $\frac{Q_f}{Q_c}$ en fonction de a et γ .
3. En déduire le rendement. Comparer le résultat au rendement de Carnot.

Exercice 1. Centrale électrique (★)

Une centrale électrique est modélisée par une machine ditherme fonctionnant entre une source chaude $T_1 = 593\text{ K}$ (cœur du réacteur) et une source froide constituée par l'eau d'un fleuve à la température $T_2 = 293\text{ K}$. On considère une centrale fournissant à l'alternateur une puissance utile $\mathcal{P} = 1\text{ GW}$.

1. Déterminer le rendement maximal atteignable pour une centrale fonctionnant avec ces deux sources. À quelle condition obtient-on un tel rendement ?

Le rendement effectif est égal à 60% du rendement maximal.

2. Déterminer alors la puissance thermique \mathcal{P}_c reçue de la source chaude.
3. En déduire la puissance thermique \mathcal{P}_f fournie à la source froide.

Exercice 2. Moteur Stirling (★★)

On considère un moteur fonctionnant entre une source froide à la température $T_f = 293\text{ K}$ et une source chaude à la température $T_c = 493\text{ K}$. Au cours d'un cycle, une mole de gaz parfait ($\gamma = 1,4$) subit les transformations suivantes :

- de A à B : compression isotherme quasistatique au contact de la source froide,
- de B à C : échauffement isochore (volume V_B) au contact de la source chaude,
- de C à D : détente isotherme quasistatique au contact de la source chaude,
- de D à A : refroidissement isochore (volume V_A) au contact de la source froide.

Le taux de compression est $\alpha = \frac{V_A}{V_B} = 5$.

1. Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron.
2. Quelles sont les étapes réversibles ? irréversibles du cycle ? Justifier.
3. Déterminer les transferts thermiques reçus par le gaz au cours du cycle. Montrer en particulier qu'ils sont opposés lors des transformations isochores.
4. Exprimer le rendement en fonction de T_c , T_f , α et γ . Application numérique.
5. Les frères Stirling ont amélioré ce dispositif en l'équipant d'un régénérateur interne de chaleur qui emmagasine la chaleur lors du refroidissement isochore et la restitue pour effectuer l'échauffement isochore. Ainsi, les seuls transferts thermiques avec l'extérieur ont lieu lors des transformations isothermes. Exprimer puis calculer à nouveau le rendement. Commenter et interpréter.

Exercice 3. Chauffage d'un spa (★★)

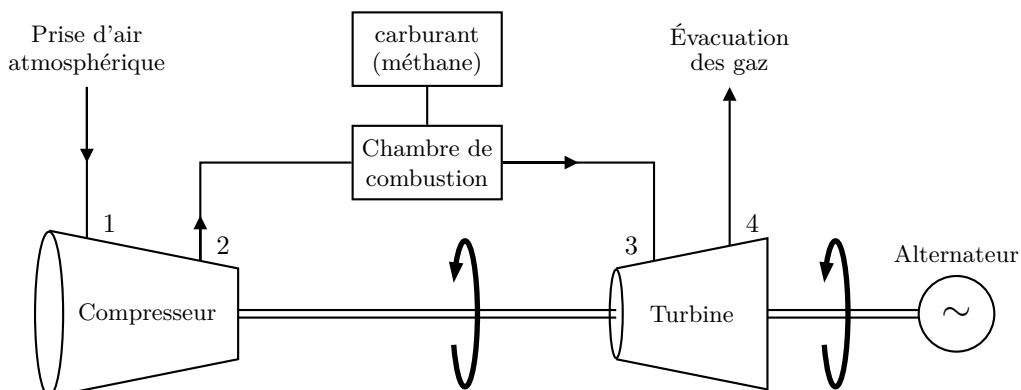
On souhaite chauffer l'eau d'un spa de volume $V = 5\text{ m}^3$ à l'aide d'une pompe à chaleur fonctionnant selon le cycle de Carnot parcouru de façon réversible dans le sens convenable. La source froide est l'air extérieur de température constante $T_f = 280\text{ K}$ et la source chaude l'eau du spa. Au cours d'un cycle de la machine, l'eau du spa passe de T à $T + dT$.

Données pour l'eau : capacité thermique massique $c = 4,18\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; masse volumique $\rho = 1,00 \times 10^3\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1. À l'aide d'un schéma représenter les différents transferts et donner leur signe.
2. Exprimer le transfert thermique δQ_c reçu par la machine au contact de la source chaude pendant un cycle.
3. En déduire les autres transferts en utilisant les principes de la thermodynamique sous forme différentielle.
4. Déterminer les transferts totaux lorsque la température de l'eau passe de la température de l'air T_f à sa température d'utilisation $T_c = 310\text{ K}$.
5. Définir l'efficacité thermodynamique du réchauffement, et la calculer.

Exercice 4. Cogénération avec une turbine à gaz (★★)

Le schéma simplifié d'un générateur à turbine est représenté ci-dessous :



L'énergie thermique est fournie dans la chambre de combustion et l'énergie mécanique est récupérée sur l'arbre de transmission de la turbine pour entraîner le compresseur et actionner l'alternateur.

On modélise le fonctionnement d'une turbine par un système fermé constitué d'une masse m , qui parcourt le cycle suivant, dit cycle de Brayton :

- 1 \rightarrow 2 : l'air atmosphérique à la pression $P_1 = 1,0$ bar et à la température $T_1 = 300$ K s'engage en (1) dans le compresseur où il est comprimé de façon isentropique à la pression $P_2 = 10$ bar.
- 2 \rightarrow 3 : l'air frais est ensuite admis dans la chambre de combustion où le gaz naturel est injecté et s'enflamme. Le fluide est porté à une température $T_3 = 1300$ K de façon isobare, sans apport de travail. Sa composition n'est pas modifiée.
- 3 \rightarrow 4 : le gaz chaud subit dans la turbine une détente isentropique. Cette détente est utilisée pour produire un travail mécanique dont une partie sert à faire fonctionner le compresseur alors que l'autre actionne l'alternateur. A la sortie (4) de la turbine, les gaz d'échappement sont évacués vers l'atmosphère.
- 4 \rightarrow 1 : le gaz chaud qui s'échappe subit un refroidissement sans apport de travail au contact de la source froide (l'air atmosphérique). Le transfert thermique est isobare.

L'air atmosphérique est assimilé à un gaz parfait. Le rapport de ses capacités thermiques à pression et volume constants est supposé constant et égal à : $\gamma = 1,4$. Sa capacité thermique massique à pression constante est : $c_P = 1,0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

On pose pour simplifier $\lambda = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$ et $\tau = \frac{T_3}{T_1}$.

1. Déterminer T_2 et T_4 en fonction de λ , τ et T_1 . Applications numériques.
2. Représenter le cycle parcouru par l'air dans le diagramme de Clapeyron (P, v). Quelle est la nature mathématique des différentes courbes tracées ?
3. Déterminer les transferts thermiques échangés par l'air dans la chambre de combustion et lors de son échappement, en fonction de m , c_P et des différentes températures au cours du cycle.
4. Exprimer le travail échangé par l'air au cours du cycle. Commenter son signe. Avec quel(s) élément(s) ce travail est-il échangé ?
5. Définir le rendement de cette machine thermique et montrer qu'il ne dépend que de λ . Calculer sa valeur et la comparer à celui de la machine de Carnot fonctionnant entre les températures extrêmes atteintes lors du cycle.

Plutôt que de laisser s'échapper de l'air encore chaud directement dans l'atmosphère après son passage dans la turbine, on peut l'exploiter dans un système de chauffage : c'est le principe de la cogénération d'énergie (mécanique + thermique).

Un échangeur thermique, dispositif dans lequel le gaz rejeté et l'eau domestique échangent de l'énergie thermique sans se mélanger, est ainsi placé en sortie de la turbine.

6. Pour faire passer 100 L d'eau de 15 °C à 60 °C par ce mécanisme, quelle masse d'air minimale doit circuler dans la turbine à gaz ?
7. Quelle est alors l'énergie mécanique fournie conjointement ?

Exercice 5. Chauffage d'une serre (★★★)

On souhaite maintenir la température d'une serre à la valeur constante $T_1 = 293$ K. L'air extérieur est à la température $T_2 = 283$ K. Dans ce but, on utilise une chaudière à la température $T_3 = 600$ K capable de fournir un transfert thermique $Q_3 > 0$. On décide de ne pas chauffer directement la chaudière pour chauffer la serre mais d'adopter le dispositif suivant : la chaudière fournit le transfert thermique Q_3 à l'agent thermique d'un moteur réversible fonctionnant entre la chaudière à T_3 et l'air extérieur à T_2 . Le travail récupéré est utilisé pour actionner une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre l'air extérieur à T_2 et l'intérieur de la serre à T_1 . On note Q_2 le transfert thermique algébrique de l'atmosphère extérieure vers l'agent thermique du moteur, Q'_1 et Q'_2 les transferts thermiques algébriques respectivement de l'intérieur de la serre et de l'atmosphère extérieure vers l'agent thermique de la pompe.

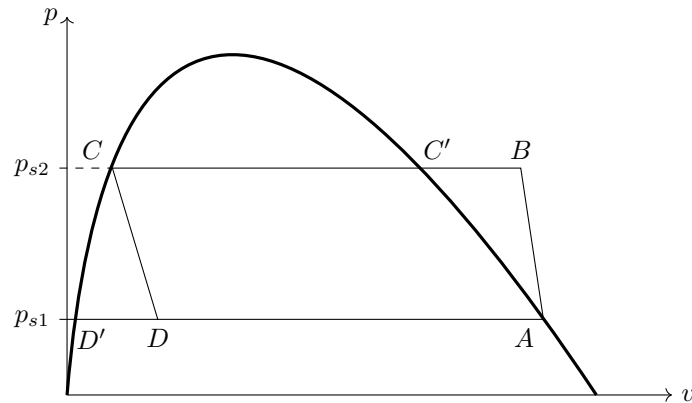
1. Reporter sur un schéma de principe les différents échanges énergétiques algébriques mis en jeu lors du chauffage.
2. Exprimer le travail algébrique W reçu par le moteur en fonction de Q_3 , T_2 et T_3 .
3. Exprimer le transfert thermique algébrique Q'_1 en fonction de W , T_1 et T_2 .
4. Définir puis exprimer l'efficacité e de l'ensemble du dispositif de chauffage en fonction de T_1 , T_2 et T_3 . Application numérique. Comparer avec l'efficacité du chauffage direct de la serre par la chaudière.

Exercice 6. Machine frigorifique (★★★)

Dans une machine frigorifique, un fluide frigorifique de type fréon circule dans un circuit fermé et échange au cours de son cycle un transfert thermique avec deux sources de températures $T_1 = 273\text{ K}$ et $T_2 = 313\text{ K}$ et du travail avec un piston dans un compresseur. Le fluide subit deux changements d'états pendant ce cycle de fonctionnement.

Le cycle peut être schématisé de la manière suivante (voir diagramme de Clapeyron ci-après) :

- en A , le fluide est à l'état de vapeur sèche à la température T_1 sur la courbe de saturation, donc à la pression de vapeur saturante p_{s1} du fréon à la température T_1 ;
- cette vapeur entre dans le compresseur où elle est comprimée de façon adiabatique et isentropique jusqu'à l'état B de pression p_{s2} , pression de vapeur saturante du fréon à la température T_2 ;
- dans le condenseur, le fluide se liquéfie complètement au contact avec la source chaude (température T_2), jusqu'au point C sur la courbe de saturation ;
- il est alors détendu de façon adiabatique et isenthalpique jusqu'à l'état D qui est un mélange liquide-vapeur à la température T_1 ;
- le fluide entre alors dans l'évaporateur où il se vaporise complètement au contact de la source froide (température T_1).



Données et hypothèses :

- pressions de vapeur saturante du fréon à T_1 et T_2 : $p_{s1} = 1\text{ bar}$ et $p_{s2} = 14\text{ bar}$;
- enthalpies massiques de vaporisation du fréon à T_1 et T_2 : $\Delta h_{v1} = 150\text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $\Delta h_{v2} = 130\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- capacités thermiques massiques à pression constante du fréon à l'état liquide $c_{p,l} = 960\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et vapeur $c_{p,v} = 412\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ supposées constantes ;
- la vapeur est modélisée par un gaz parfait de coefficient adiabatique $\gamma = 1,20$ et le liquide par une phase condensée incompressible et indilatable de volume massique négligeable devant celui de la vapeur ;
- pour un système ouvert à travers lequel s'écoule un fluide, le premier principe s'écrit (programme de deuxième année) : $\Delta h = q + w'$ où Δh est la variation d'enthalpie massique du fluide entre l'entrée et la sortie du système, q (resp. w') est le transfert thermique (resp. travail) massique échangé par le fluide avec le système.

1. Déterminer la température atteinte de l'état B .
2. En considérant le chemin $CD'D$ (D' est sur la courbe de saturation), déterminer le titre en vapeur x_D au point D .
3. Déterminer le transfert thermique massique échangé par le fluide avec le condenseur et avec l'évaporateur.
4. En déduire le travail échangé avec le compresseur.
5. Définir l'efficacité thermodynamique du système et calculer sa valeur. Comparer avec le rendement de Carnot.

Réponses

Exercice 1 : 1. $r_{\max} = 50,6\%$; 2. $\mathcal{P}_c = 3,3\text{ GW}$; 3. $\mathcal{P}_f = 2,3\text{ GW}$.

Exercice 2 : 3. $Q_{AB} = -nRT_f \ln(\alpha)$; $Q_{CD} = nRT_c \ln(\alpha)$; $Q_{BC} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_c - T_f)$; 4. 26% ; 5. 41% .

Exercice 3 : 4. $Q_c = \rho V c(T_f - T_c)$; $Q_f = \rho V c T_f \ln(T_c/T_f)$; $W = -Q_c - Q_f$; 5. $\eta = 20,0$

Exercice 4 : 1. $T_2 = 579\text{ K}$; $T_4 = 673\text{ K}$; 3. $Q_c = mc_P T_1(\tau - \lambda)$; $Q_f = mc_P T_1(1 - \tau/\lambda)$; 5. $r = 0,48$; 6. $m = 50\text{ kg}$; $|W| = 1,7 \times 10^7\text{ J}$.

Exercice 5 : 2. $W = Q_3 \left(\frac{T_2}{T_3} - 1 \right)$; 3. $Q'_1 = W \frac{T_1}{T_1 - T_2}$; 4. $e = 15,5$.

Exercice 6 : 1. $T_B = 424\text{ K}$; 2. $x_D = 0,26$; 3. $q_c = -176\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $q_f = 112\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; 4. $64\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; 5. $\eta = 1,7$; $\eta_C = 6,8$.