

Machines thermiques.

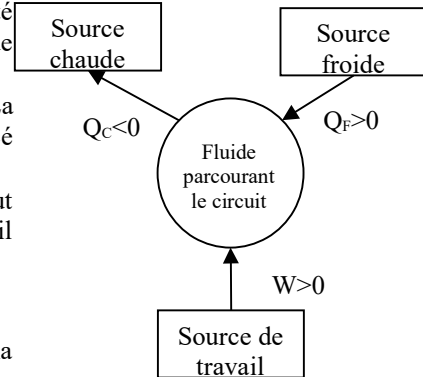
1. Introduction et étude générale des machines dithermes.

1.1. Machine frigorifique.

On peut regrouper sous les termes machine frigorifique les systèmes qui permettent de prélever de la chaleur depuis une source froide.

On peut schématiser son fonctionnement de la manière suivante :

- On considère un système qui évoluera de manière cyclique. Il s'agit d'un fluide qui circule dans le système actif du réfrigérateur par exemple.
- Au contact de la source froide, ce fluide reçoit une certaine quantité de chaleur $Q_F > 0$. Pour le réfrigérateur la source froide est l'espace de stockage intérieur.
- Le fluide cède ensuite de la chaleur à la source chaude, $Q_C < 0$. La source chaude d'un réfrigérateur est l'air de la pièce où est placé l'appareil.
- Pour réaliser ce transfert de chaleur dans le sens non spontané, il faut apporter du travail au système $W > 0$. Dans un réfrigérateur, ce travail est fourni par un compresseur.

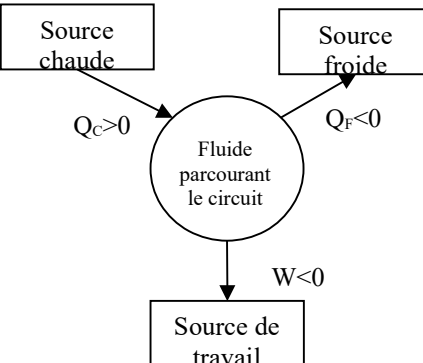


1.2. Pompe à chaleur.

Une pompe à chaleur est un système destiné à fournir de la chaleur à la source chaude. Elle présentera les mêmes caractéristiques que la machine frigorifique sauf qu'on s'intéresse à la chaleur fournie à la source chaude (par exemple l'intérieur d'une habitation) au lieu de s'intéresser à la chaleur prélevée à la source froide (l'extérieur de l'habitation).

1.3. Moteur.

Le moteur est une machine qui fournit du travail au milieu extérieur, $W < 0$. On va voir que pour cela, il prélève de la chaleur à une source chaude, $Q_C > 0$ (la chaudière d'une centrale électrique thermique ou nucléaire par exemple), pour la convertir en travail, cette conversion n'est pas possible sans qu'il ne soit cédé une certaine chaleur à une source froide, $Q_F < 0$ (l'eau prélevée puis restituée à la rivière au bord de laquelle la centrale est située par exemple).



1.4. Fonctionnement cyclique.

On constate donc que la modélisation de ces systèmes présente un schéma commun où le système étudié est en contact avec deux sources de chaleur et échange du travail avec le milieu extérieur. On les désigne sous le terme de machines dithermes.

Dans ces machines, le système étudié évolue de manière cyclique c'est-à-dire qu'il subit plusieurs fois de suite la même succession de transformations permettant d'assurer la fonction pour laquelle il est conçu.

Les variations des fonctions d'états du système sur chaque cycle de la machine sont nulles :

$$\Delta_{\text{Cycle}} U = 0 ; \Delta_{\text{Cycle}} S = 0 ; \Delta_{\text{Cycle}} V = 0 \text{ etc...}$$

A chaque cycle les mêmes transferts thermiques et le même travail sont reçus par le système : Q_C chaleur reçue de la source chaude, Q_F chaleur reçue de la source froide et W travail reçu de la source de travail.

On distingue alors la catégorie de machine ditherme en regardant le signe des échanges reçus par le système :

1. $Q_C > 0$, $Q_F < 0$, $W < 0$ correspond à un moteur.
2. $Q_C < 0$, $Q_F > 0$, $W > 0$ correspond à un système récepteur (pompe à chaleur ou machine frigorifique).

1.5. Le diagramme de Raveau.

Pour une machine ditherme, le premier principe affirme que : $\Delta_{\text{Cycle}} U = 0 = W + Q_C + Q_F$

Le second principe affirme que : $\Delta_{\text{Cycle}} S = 0 = S^e + S^c = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} + S^c$

D'après le second principe : $S^c > 0$ pour une évolution irréversible, $S^c = 0$ pour une évolution réversible.

On en conclut que dans la machine ditherme, les chaleurs reçues par le système depuis les sources chaude et froide vérifient l'inégalité de Clausius-Carnot : $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$

Sur le diagramme de Raveau, on représente en abscisse la chaleur échangée avec la source froide Q_F et en ordonnée la chaleur échangée avec la source chaude Q_C .

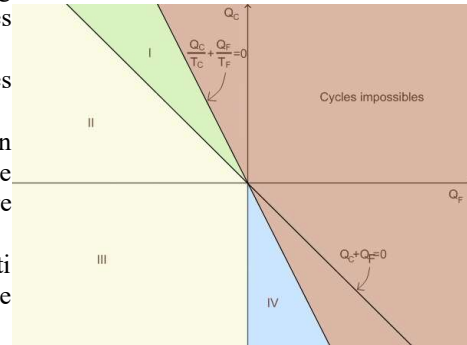
- L'inégalité de Clausius-Carnot permet alors de définir un demi-plan d'équation $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$ dans lequel doit se trouver le point représentatif de la machine pour que cette dernière soit réalisable.
- Les signes des chaleurs reçues des deux sources se trouvent directement par lecture du diagramme.
- Le signe du travail est obtenu grâce au premier principe : $W = -Q_C - Q_F$. La droite D_2 d'équation $(Q_C + Q_F = 0)$ passant par l'origine et de pente -1 sépare le plan en deux parties, le demi plan où le travail reçu est positif se trouve en dessous de D_2 , le demi plan où le travail reçu est négatif se trouve au-dessus de D_2 .

Sur le domaine I ; $Q_C > 0, Q_F < 0, W < 0$, c'est le domaine des cycles moteurs.

Sur le domaine IV : $Q_C < 0, Q_F > 0, W > 0$, c'est le domaine des machines frigorifiques et des pompes à chaleur.

Sur le domaine II : $Q_C > 0, Q_F < 0, W > 0$, c'est un domaine où on apporte du travail pour aider le transfert thermique à se faire dans le sens spontané (système de refroidissement d'un moteur de voiture par exemple).

Sur le domaine III : $Q_C < 0, Q_F < 0, W > 0$, du travail fourni est converti en chaleur transférée aussi bien à la source chaude qu'à la source froide (à priori, pas d'intérêt).



2. Etude du moteur ditherme.

2.1. Rendement d'un moteur ditherme : définition.

Pour un moteur, la grandeur d'échange qui doit être fournie est la chaleur reçue de la source chaude Q_C . La grandeur utile est le travail récupéré, c'est-à-dire $(-W)$.

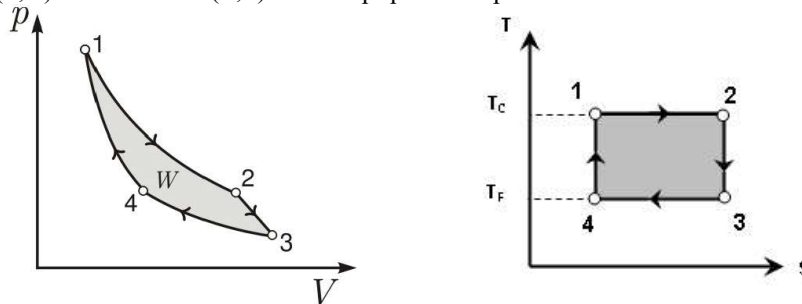
Définition : Pour un moteur, on définit le rendement ρ comme le rapport de la grandeur d'échange utile $(-W)$ par la grandeur d'échange fournie Q_C : $\rho = \frac{\text{Grandeur utile à l'utilisateur}}{\text{grandeur à fournir à la machine}} = \frac{-W}{Q_C}$

2.2. Le moteur de Carnot.

Le moteur de Carnot est un moteur dans le cycle de fonctionnement est uniquement constitué de transformations réversibles. En partant de l'état d'équilibre 1, le fluide subit donc successivement :

- 1 → 2 détente isotherme à la température T_C .
- 2 → 3 détente adiabatique réversible.
- 3 → 4 compression isotherme à la température T_F .
- 4 → 1 compression adiabatique réversible.
- Sur les représentations, on constate que le cycle est parcouru dans le sens horaire.

Les diagrammes (P,V) dit de Watt et (T,S) dit entropique correspondant au moteur de Carnot sont les suivants :



Le travail fourni par le système au milieu extérieur lors des détentes est visualisé sur le diagramme (P,V) par l'aire sous la courbe reliant 1 → 2 → 3.

Le travail reçu par le système de la part du milieu extérieur lors des compressions est visualisé sur le diagramme (P,V) par l'aire sous la courbe reliant 3 → 4 → 1.

Le travail total fourni par le système au milieu extérieur est donc bien positif ($W < 0$) et peut être visualisé sur le diagramme de Clapeyron par l'aire de la zone délimitée par le cycle.

La chaleur reçue de la source chaude est visualisée sur le diagramme (T,S) par l'aire sous la droite 1 → 2.

La chaleur fournie à la source froide est visualisée sur le diagramme (T,S) par l'aire sous la droite 3 → 4.

La chaleur totale reçue par le système est bien positive ($Q_C + Q_F > 0$) et peut être visualisée par l'aire de la zone délimitée par le cycle.

On constate que pour les deux cycles, le sens de parcours est identique. Pour un moteur, on tourne sur ce cycle dans le sens horaire sur le diagramme (P,V) et sur le diagramme (T,S) .

2.3. Rendement d'un moteur : détermination.

Pour le moteur ditherme, fonctionnant selon un cycle :

- Le premier principe s'écrit $\Delta_{\text{Cycle}} U = 0 = W + Q_C + Q_F$
- Le second principe s'écrit $\Delta_{\text{Cycle}} S = 0 = S^e + S^c = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} + S^c$ d'où l'inégalité de Clausius-Carnot $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$

Pour le rendement, on obtient donc : $\rho = -\frac{W}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$ puis $\rho \leq 1 - \frac{T_F}{T_C}$

Le cas d'égalité correspond à une machine ditherme réversible qui n'échange de la chaleur qu'avec une source chaude de température T_C et une source froide de température T_F , c'est-à-dire le moteur de Carnot.

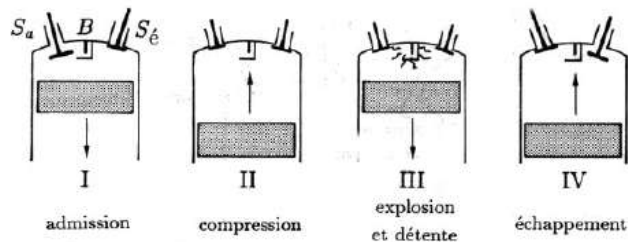
Le rendement du moteur ditherme est donc toujours positif et inférieur à 1. Le rendement maximum est celui du

moteur de Carnot dont il faut connaître le cycle : $\rho \leq \rho_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$

2.4. Le moteur à explosion classique.

Le cycle du moteur à explosion classique est composé de 4 temps.

- L'admission au cours de laquelle, une quantité de gaz est admise dans le cylindre ainsi qu'une quantité de carburant de volume négligeable.
- La compression au cours de laquelle le gaz précédemment admis est comprimé.
- L'explosion et la détente, on déclenche la réaction de combustion du carburant ce qui entraîne son explosion et la détente des gaz dans le cylindre.
- L'échappement réalise la vidange du cylindre qui est ainsi prêt à réaliser un nouveau cycle.

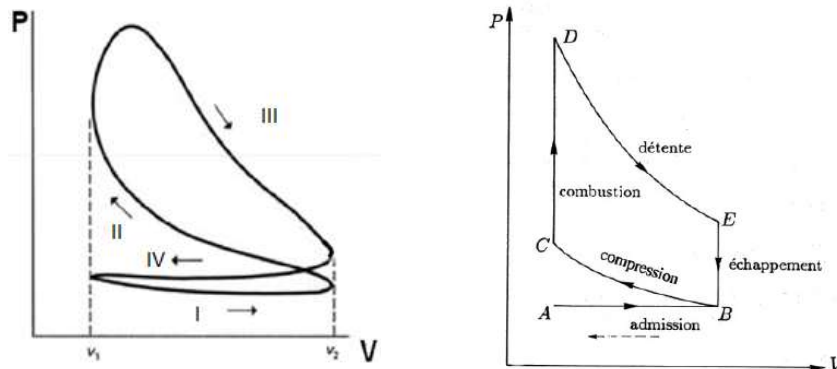


$\begin{cases} S_a = \text{soupape d'admission} & B \text{ bougie} \\ S_e = \text{soupape d'échappement} \end{cases}$

Moteur à explosion à 4 temps

Le diagramme (P,V) du cycle réalisé dans ce type de moteur est représenté ci-dessous à gauche bien qu'il ne soit pas vraiment représentable en toute rigueur, les transformations ne sont certainement pas quasi-statiques.

On le modélise par le cycle d'Otto, ou de beau de Rochas représenté ci-dessous à droite.



Dans la modélisation, on exclut du cycle d'étude les échanges gazeux avec le milieu extérieur. Du point de vue chimique c'est une aberration, car si on n'effectue pas le renouvellement de l'air admis, la réaction de combustion du carburant dans le dioxygène n'est plus réalisable. Du point de vue de l'étude du cycle moteur, cela permet de simplifier grandement l'étude tout en conservant les caractéristiques principales des transformations mises en œuvre.

On se ramène donc à l'étude d'une quantité de gaz fixe réalisant le cycle BCDE composé de :

- Une compression adiabatique de B en C.
- Une combustion isochore lors de la combustion de C en D.
- Une détente adiabatique de D en E qui est l'étape au cours de laquelle du travail est fourni par le moteur.
- L'échappement est modélisé comme une détente isochore de E en B puis le retour au point A en supposant qu'il suit le chemin inverse de celui suivi à l'admission.

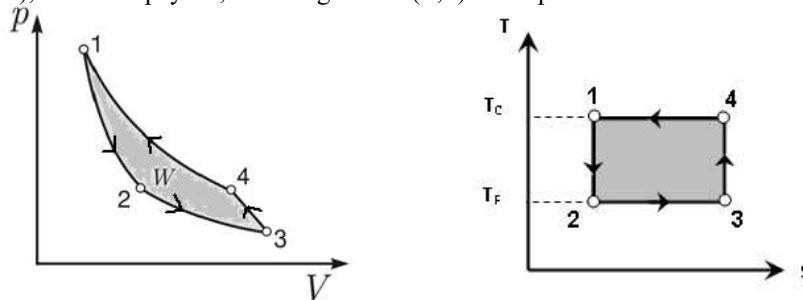
On peut montrer que le rendement de ce moteur s'exprime en fonction du rapport des volumes $a = V_2/V_1$ et prend la forme : $\rho = 1 - a^{1-\gamma}$ Pour un rapport $a=10$ et un facteur $\gamma=1,4$, on obtient un rendement de : $\rho = 0,60$

Le rendement du cycle réel est évidemment inférieur à ce rendement obtenu par le cycle théorique, en général, il atteint une valeur tournant autour de 35%.

3. Etude de la machine frigorifique et de la pompe à chaleur.

3.1. La machine frigorifique ou pompe à chaleur de Carnot.

La machine réceptrice de Carnot correspond au cas d'une évolution réversible de la machine thermique étudiée. Le diagramme (P,V), dit de Clapeyron, et le diagramme (T,S) correspondant sont les suivants :



En partant de l'état d'équilibre 1, le fluide subit donc successivement :

- 1→2 détente adiabatique réversible.
- 2→3 détente isotherme à la température T_F .
- 3→4 compression adiabatique réversible.
- 4→1 compression isotherme à la température T_C .
- On constate que le cycle est parcouru dans le sens trigonométrique pour les machines de type réceptrice.

Le travail fourni par le système au milieu extérieur lors des détentes est visualisé sur le diagramme (P,V) par l'aire sous la courbe reliant 1→2→3.

Le travail reçu par le système de la part du milieu extérieur lors des compressions est visualisé sur le diagramme (P,V) par l'aire sous la courbe reliant 3→4→1.

Le travail total reçu par le système est donc bien positif ($W>0$) et peut être visualisé sur le diagramme de Clapeyron par l'aire de la zone délimitée par le cycle.

La chaleur fournie à la source chaude est visualisée sur le diagramme (T,S) par l'aire sous la droite 4→1.

La chaleur reçue de la source froide est visualisée sur le diagramme (T,S) par l'aire sous la droite 2→3

La chaleur totale reçue par le système est bien négative ($Q_C+Q_F<0$) et peut être visualisée par l'aire de la zone délimitée par le cycle.

3.2. Efficacité d'une machine frigorifique.

La grandeur d'échange à fournir pour faire fonctionner la machine réceptrice est le travail W . La grandeur utile pour une machine frigorifique est la chaleur récupérée depuis la source froide Q_F .

Définition : Pour une machine frigorifique, on définit l'efficacité e comme le rapport de la grandeur d'échange utile Q_F par la grandeur d'échange fournie W : $e = \frac{\text{Grandeur utile à l'utilisateur}}{\text{grandeur à fournir à la machine}} = \frac{Q_F}{W}$

Pour la machine frigorifique fonctionnant selon un cycle :

- Le 1^{er} principe s'écrit $\Delta_{\text{Cycle}} U = 0 = W + Q_C + Q_F$
- Le 2nd principe s'écrit $\Delta_{\text{Cycle}} S = 0 = S^e + S^c = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} + S^c$ d'où l'inégalité de Clausius-Carnot $\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$

Pour l'efficacité de la machine frigorifique, on obtient $e = \frac{Q_F}{W} = -\frac{Q_F}{Q_C + Q_F}$ puis $e \leq e_{\text{Carnot}} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$

Le cas d'égalité correspond à une machine ditherme réversible c'est-à-dire la machine frigorifique de Carnot.

3.3. Efficacité d'une pompe à chaleur.

La grandeur d'échange à fournir pour faire fonctionner la machine réceptrice est le travail W . La grandeur utile pour une pompe à chaleur est la chaleur fournie à la source chaude $-Q_C$.

Définition : Pour une pompe à chaleur, on définit l'efficacité e comme le rapport de la grandeur d'échange utile Q_C par la grandeur d'échange fournie W : $e = \frac{\text{Grandeur utile à l'utilisateur}}{\text{grandeur à fournir à la machine}} = \frac{-Q_C}{W}$

L'efficacité de la pompe à chaleur de Carnot correspond à l'efficacité maximale puisqu'elle est constituée de transformations réversibles uniquement. On montre que $e \leq e_{\text{Carnot}} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$.

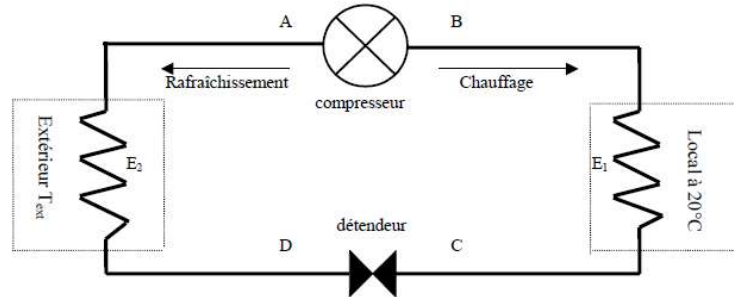
4. Méthode d'étude des systèmes ouverts.

4.1. Présentation de l'exemple support de l'étude.

On s'intéresse au fonctionnement d'un appareil de climatisation, dont le but est de maintenir une température constante ($T_0=20^\circ\text{C}$) dans un local été comme hiver. Le climatiseur fonctionne donc en pompe à chaleur l'hiver, en machine frigorifique l'été. Les transferts thermiques du climatiseur se font avec 2 sources :

- L'intérieur de la pièce de température maintenue à $T_0=20^\circ\text{C}$ été comme hiver.
- L'atmosphère extérieure qu'on prendra de température $T_1=0^\circ\text{C}$ en hiver, $T_2=40^\circ\text{C}$ en été afin de prévoir des conditions extrêmes.

On supposera que le climatiseur fonctionne en **régime stationnaire**. Par un jeu de vannes adéquat, le fluide peut circuler dans le sens ABCDA pour chauffer la pièce (mode pompe à chaleur) ou dans le sens BADCB pour la refroidir (mode climatiseur).

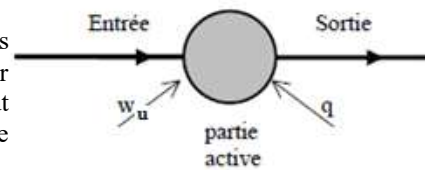


On caractérise de la manière suivante les transformations subies par le fluide dans les éléments du climatiseur :

- Dans le compresseur, le fluide subit une compression supposée adiabatique et réversible. Dans le compresseur, le fluide reçoit un travail utile massique noté w .
- Dans le détendeur, on laisse le fluide se détendre de manière adiabatique et sans lui apporter de travail utile.
- Le fluide subit des échanges de chaleur isobares sans recevoir de travail utile dans les échangeurs E_1 et E_2 avec les deux sources de chaleur. On note q_F la chaleur massique reçue par le fluide dans l'évaporateur et q_C la chaleur massique reçue par le fluide dans le condenseur. On supposera qu'en sortie des échangeurs, le fluide a atteint un état d'équilibre thermique avec la source qui est à son contact.

4.2. Bilan d'enthalpie dans un élément du circuit.

Dans le système décrit ici, le fluide circule entre les différents éléments qui le constituent. Ces éléments (compresseur, détendeur, évaporateur et condenseur) sont donc des systèmes ouverts pour lesquels il faut réécrire le premier principe de la thermodynamique sous une forme adaptée, on parle de premier principe industriel.



On considère un des éléments dans lequel circule le fluide au cours du fonctionnement du système. En passant dans cet élément, il reçoit un travail massique utile w_u et une chaleur massique q pour chaque kilogramme traversant l'élément actif.

Le composant actif est un système ouvert Σ , étudié en régime stationnaire. On se ramène donc à l'étude d'un système fermé en définissant Σ^* par :

- ➔ $\Sigma^*(t)$ composé de $\Sigma(t)$ et de la masse δm de fluide qui entre dans ce composant entre les instants t et $t+\delta t$.
- ➔ $\Sigma^*(t+\delta t)$ composé de $\Sigma(t+\delta t)$ et de la masse δm de fluide qui est sortie de ce composant entre les instants t et $t+\delta t$.

Σ^* est alors un système fermé, on peut lui appliquer le premier principe de la thermodynamique entre les instants t et $t+\delta t$: $(U(t+\delta t)+E_C(t+\delta t)) - (U(t)+E_C(t)) = W_u + Q + W_{P_e, \text{entrée}} + W_{P_s, \text{sortie}}$

On a déjà vu lorsqu'on a étudié la détente de Joule-Thomson que $W_{P_e, \text{entrée}} = P_e V_e$ et $W_{P_s, \text{sortie}} = -P_s V_s$

Par la définition des grandeurs d'échange par unité de masse $W_u = m w_u$ et $Q = m q$

On a aussi vu que :

$$(U(t)+E_C(t))^* = (U(t)+E_C(t)) + m e_e + E_{C,e} \quad \text{et} \quad (U(t+\delta t)+E_C(t+\delta t))^* = (U(t+\delta t)+E_C(t+\delta t)) + m u_s + E_{C,s}$$

Le composant fonctionne en régime stationnaire et on suppose que la variation d'énergie cinétique est négligeable entre l'entrée et la sortie du composant, on obtient : $m(u_s - u_e) = m(w_u + q) + m(P_e V_e - P_s V_s)$

On obtient finalement comme traduction du premier principe, un bilan d'enthalpie pour chaque composant actif du système sous la forme : $h_s - h_e = w_u + q$ qu'on appelle premier principe industriel

4.3. Représentation du cycle dans un diagramme (P,h).

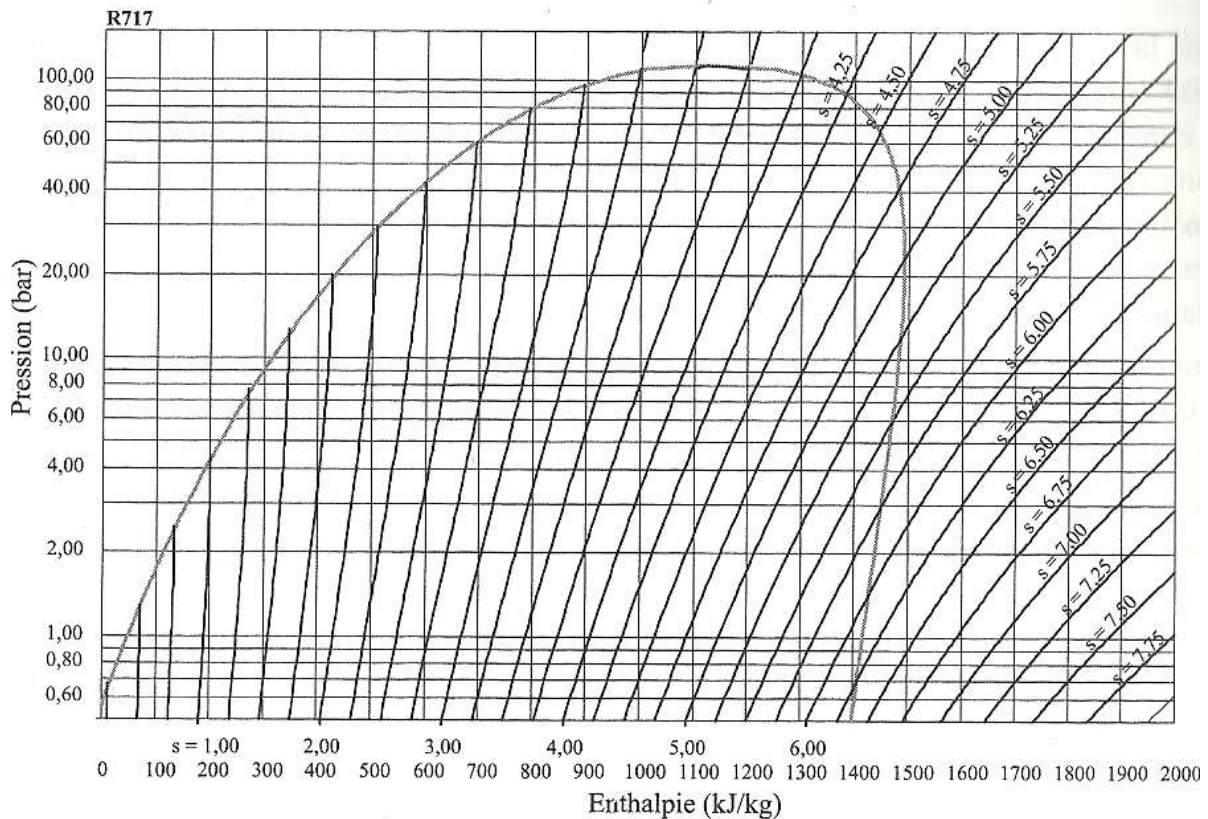
Le fluide caloporteur qui effectue des cycles dans l'appareil est l'ammoniac dont les pressions de vapeur saturante $P_s(T)$ aux trois températures d'étude sont : $P_s(0^\circ\text{C}) = 4 \text{ bars}$; $P_s(20^\circ\text{C}) = 8 \text{ bars}$; $P_s(40^\circ\text{C}) = 15 \text{ bars}$.

Dans le cas du fonctionnement en pompe à chaleur :

- l'échangeur E1 est un condenseur : l'ammoniac y entre dans l'état B sous forme de vapeur sèche ; il en ressort sous forme de liquide saturant dans l'état C, à la température T_0 du local.
- l'échangeur E2 est un évaporateur : le mélange liquide-vapeur qui entre dans l'état D se vaporise totalement pour ressortir sous forme de vapeur saturante dans l'état A à la température T_1 de l'atmosphère extérieure.

Dans le cas du fonctionnement en climatiseur, les rôles des deux échangeurs sont inversés :

- E₁ est un évaporateur à la sortie duquel le fluide est une vapeur saturante de température T_0 .
- E₂ un condenseur à la sortie duquel le fluide est un liquide saturant à la température T_2 .



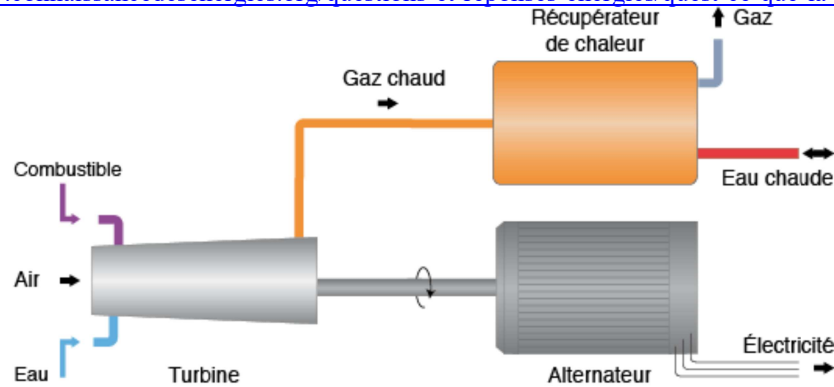
- Représenter sur le diagramme fourni le cycle de fonctionnement du climatiseur.
- Représenter sur le diagramme fourni le cycle de fonctionnement de la pompe à chaleur.

4.4. Exploitation du diagramme pour le mode pompe à chaleur.

- Faire les lectures graphiques des enthalpies massiques pour les quatre états A, B, C et D lorsque le système fonctionne en pompe à chaleur.
- Faire le bilan d'enthalpie massique dans les différents composants à l'aide du 1^{er} principe industriel.
- Exprimer alors l'efficacité de la pompe à chaleur en fonction des enthalpies massiques lues. Faire l'application numérique. Evaluer alors l'efficacité de la machine de Carnot correspondante. Commenter.
- A l'aide d'un raisonnement de type théorème des moments, déterminer la composition massique du fluide au point D.

5. Quelques explications sur la cogénération.

<https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-que-la-cogeneration>



La cogénération consiste à produire et à utiliser simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une même énergie primaire et au sein de la même installation. Elle se base sur le fait que la production d'électricité (à partir d'un moteur thermique ou d'une turbine) dégage une grande quantité de chaleur habituellement inutilisée. La cogénération valorise cette chaleur afin d'atteindre un rendement énergétique global pouvant atteindre 85%.

Une installation classique obtient un rendement électrique d'environ 35%, tandis que le reste de l'énergie (65%) est perdu sous forme de chaleur. Dans un système en cogénération, 30 à 35% de l'énergie primaire est transformée en électricité grâce à un alternateur, tandis que 65% se retrouve sous forme de chaleur, dont 50 à 55% est récupérée pour chauffer un circuit d'eau au travers d'un échangeur. Cette eau peut être utilisée pour le chauffage des bâtiments, de l'eau chaude sanitaire, ou pour des procédés industriels. L'électricité produite sera quant à elle consommée sur place ou revendue sur le réseau électrique public.

La cogénération permet ainsi d'optimiser la consommation du combustible initial et de réduire les rejets de gaz à effet de serre. Toutefois, les installations de cogénération doivent produire au plus près des lieux de consommation car la chaleur se transporte mal.

La cogénération peut être utilisée à grande échelle (installations industrielles, centrales électrothermiques...), ainsi qu'à petite échelle : dans le résidentiel, la micro-cogénération peut produire une base de chaleur et d'électricité.

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 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

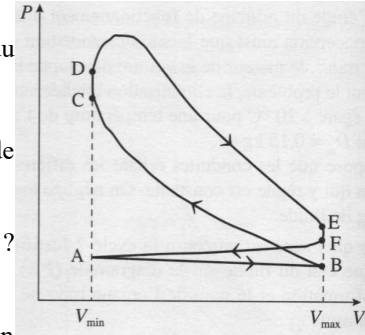
Exercice 1 : rendement d'un moteur ditherme réel.

Un moteur réel fonctionnant entre deux sources de chaleur, l'une à $T_f = 400\text{ K}$, l'autre à $T_c = 650\text{ K}$, produit un travail 500 J par cycle, pour 1500 J de transfert thermique reçu.

1. Comparer son rendement à celui d'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources.
2. Calculer l'entropie créée par cycle, notée S_{cr} .
3. Montrer que la différence entre le travail fourni par la machine de Carnot et la machine réelle est égale à $T_f S_{cr}$, pour un coût énergétique identique.

Exercice 2 : Cycle d'Otto (ou de Beau de Rochas).

On cherche à évaluer le rendement d'un moteur à explosion en fonction du rapport de compression $\alpha = \frac{V_{max}}{V_{min}}$ et du coefficient $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$.



1. Dans un diagramme de Watt, représenter l'allure du cycle de Beau de Rochas (voir le cours) qui modélise le cycle réel ci-contre.
2. Justifier le sens de parcours du cycle.
3. Quelles sont les deux étapes négligées pour la suite de l'étude ? Identifier les phases de contact avec les sources chaude et froide.
4. Exprimer le rendement η en fonction de T_B , T_C , T_D et T_E .
5. Énoncer les conditions d'application et énoncer la loi de Laplace. En déduire une expression de η en fonction du rapport de compression α et du coefficient γ .
6. Application numérique : calculer η pour $\alpha = 7$. (en pratique, les frottements mécaniques et les transferts thermiques non négligeables au niveau des parois ramènent ce rendement à environ 0,35).
7. Comment faire évoluer α pour augmenter le rendement ? Quel problème technique se pose alors ?

Exercice 3 : Moteur de Stirling.

Le moteur de Stirling est constitué de deux chambres, une chaude, une froide, reliées par un régénérateur. Le gaz, en circuit fermé, reçoit un transfert thermique d'une source chaude et cède un transfert thermique à la source froide. Le régénérateur, base de l'invention de Stirling, est fondamental pour obtenir un bon rendement.

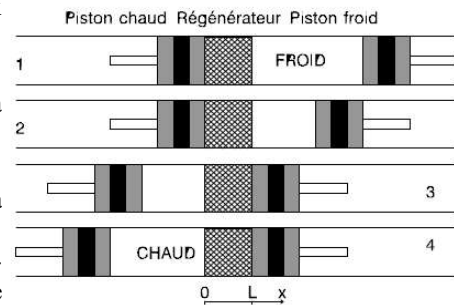
Données : Constante des gaz parfaits : $R = 8,314\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Pour le dihydrogène H_2 : $M(\text{H}_2) = 2,00 \cdot 10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$; Rapport des capacités thermiques : $\gamma = 1,40$.

Description du cycle de Stirling :

Le cycle associé à un moteur de Stirling est constitué de deux isothermes et de deux isochores, il est décrit par :

- 1→2 : compression isotherme à la température $T_f = 313\text{ K}$.
- 2→3 : Transformation isochore de la température T_f à la température T_c .
- 3→4 : Détente isotherme à la température $T_c = 1173\text{ K}$.
- 4→1 : Transformation isochore de la température T_c à la température T_f .



La figure suivante représente les positions dans les états 1, 2, 3 et 4 de l'association de deux pistons qui permet la réalisation de ce cycle pour un système fermé contenant une masse $m = 1,00 \cdot 10^{-2}\text{ kg}$ de dihydrogène qu'on supposera se comporter en gaz parfait. Les deux chambres présentent les mêmes volumes maximum $V_M = 2,0\text{ L}$ et minimum $V_m = 1,0\text{ L}$.

1. Exprimer et évaluer numériquement les pressions atteintes au cours du cycle P_1 , P_2 , P_3 et P_4 .
2. Représenter le cycle de Stirling sur un diagramme de Watt $P=f(V)$. Commenter le sens de parcours.
3. Pour la transformation isotherme 1→2, exprimer la chaleur Q_{12} reçue par le gaz en fonction des données de l'énoncé, indiquer son signe. Faire de même pour la transformation 3→4
4. Pour la transformation isochore 2→3, exprimer la chaleur Q_{23} reçue par le gaz en fonction des données de l'énoncé, indiquer son signe. Faire de même pour la transformation 4→1.
5. En supposant qu'aucun système régénérateur n'intervient, exprimer la chaleur Q_c reçue de la source chaude. Définir le rendement du moteur r_{sf} , l'exprimer en fonction des chaleurs reçues puis faire l'application numérique.

En présence d'un régénérateur parfait, les transferts thermiques Q_{23} et Q_{41} sont internes au système, ils ne sont donc plus échangés avec la source froide et la source chaude.

6. Vérifier que Q_{23} et Q_{41} se compensent, déterminer la nouvelle expression du rendement r_{ar} en fonction de T_f et T_c , puis évaluer le numériquement.
7. Retrouver le rendement du moteur de Carnot. Comparer les deux rendements et commenter.

Le régénérateur d'un moteur de Stirling réel n'est pas idéal, la compensation des échanges thermiques Q_{23} et Q_{41} ne peut pas être parfaitement réalisée. On suppose que lors des transformations isochores, une fraction x du transfert thermique est perdue par fuite thermique dans le régénérateur.

8. Exprimer le rendement r' du moteur dans ce modèle en fonction de x et des transferts thermiques. Faire alors l'application numérique pour $x = 0,1$.

Exercice 4 : Quel mode de chauffage pour 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 utiliser directement la chaudière pour chauffer la serre mais d'adopter le dispositif suivant : la chaudière fournit le transfert thermique Q_3 à un moteur réversible fonctionnant entre la chaudière à T_3 et l'air extérieur à T_2 .

Ce moteur est couplé à une pompe à chaleur réversible : le travail W qu'il fournit est ainsi utilisé pour actionner la pompe à chaleur fonctionnant entre l'air extérieur à T_2 et l'intérieur de la serre à T_1 . On note Q_2 le transfert thermique du moteur vers l'air extérieur et Q_2' le transfert thermique de l'air extérieur vers la pompe.

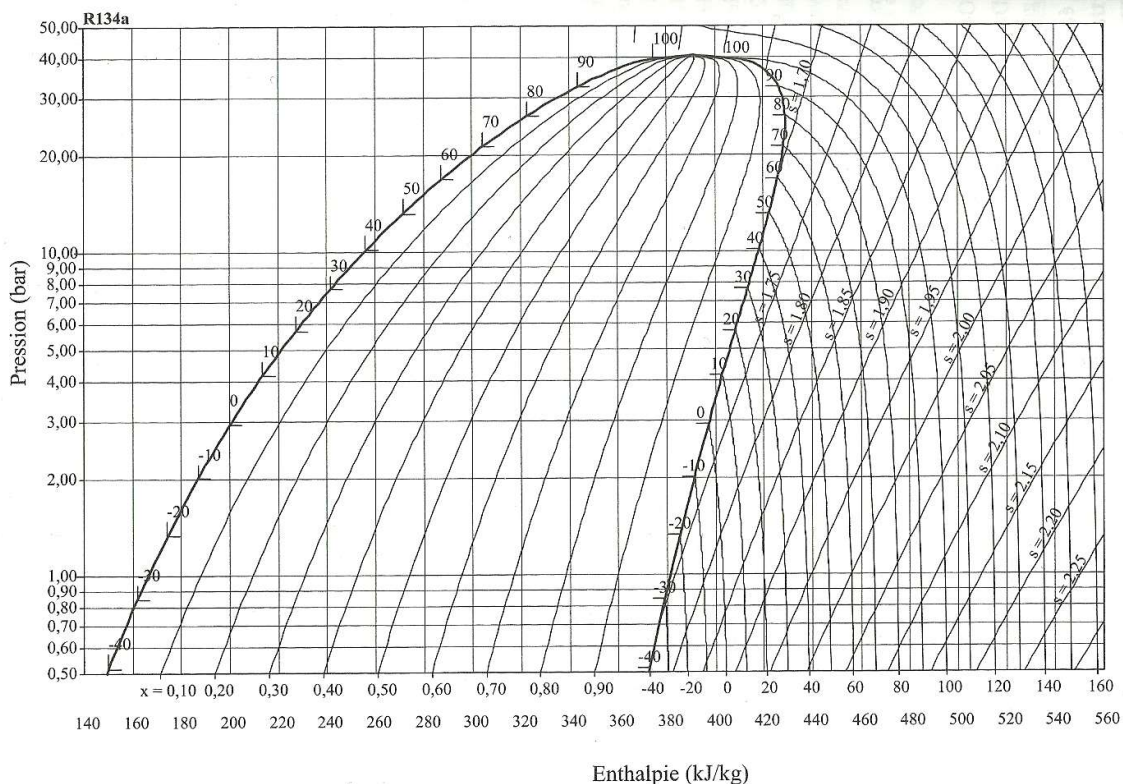
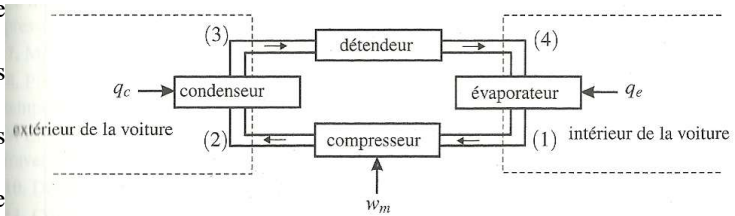
1. Reporter sur un schéma de principe les différents échanges énergétiques mis en jeu lors du chauffage.
2. Exprimer le travail W fourni par le moteur en fonction de Q_3 , T_2 et T_3 .
3. Exprimer le transfert thermique Q_1' fourni par la pompe à l'intérieur de la serre en fonction de W , T_1 et T_2 .
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.
5. Comparer l'efficacité du système de pompe à chaleur avec celle du chauffage direct de la serre.

Exercice 5 : Climatisation d'une voiture.

Pour refroidir l'air intérieur d'un véhicule, un fluide frigorigène connu sous le nom de code R134a, effectuée en continu des transferts énergétiques entre le compresseur, l'intérieur et l'extérieur du véhicule.

Sur le diagramme enthalpique (P,h) du fluide de masse molaire $M = 32$ g.mol⁻¹, sont représentés :

- La courbe de saturation de l'équilibre liq-vap du fluide (en gras).
- Les isothermes pour les températures de -40°C à 160°C .
- Les isentropiques pour des entropies massiques de $1,70$ à $2,25$ kJ.K⁻¹.kg⁻¹.
- Les isotitres en vapeur sous la courbe de saturation.



Au cours du cycle :

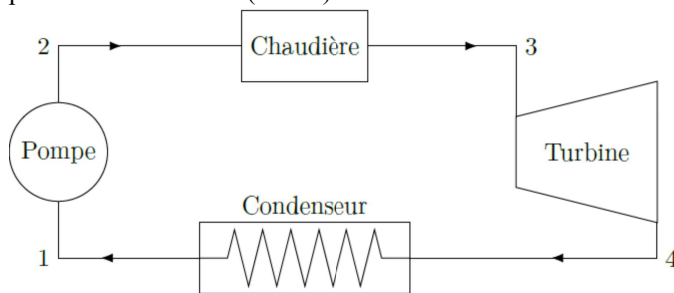
- Le fluide à l'état (1) est du gaz de température $T_1 = 5^\circ\text{C}$ sous la pression $P_1 = 3$ bar.
- Dans le compresseur le gaz subit une compression isentropique avec un taux de compression $r = P_2/P_1 = 6$.
- Le fluide subit ensuite dans le condenseur un refroidissement isobare jusqu'à la température $T_3 = 50^\circ\text{C}$.
- Le fluide subit ensuite une détente adiabatique dans le détendeur jusqu'à la pression P_1 .
- Le fluide passe alors dans l'évaporateur où il est entièrement vaporisé puis sort à l'état (1).

- Placer le point (1) sur le diagramme. Relever les valeurs de h_1 et s_1 .
- Déterminer P_2 puis placer le point (2) sur le diagramme. Relever T_2 et h_2 .
- Exprimer w_m le travail massique reçu par le fluide de la part du compresseur puis évaluer le numériquement. Commenter le signe de ce travail.
- Placer le point (3) sur le diagramme. Relever la valeur de h_3 .
- Montrer que la transformation dans le détendeur est isenthalpique.
- Placer le point (4) sur le diagramme et tracer le cycle complet. Relever T_4 et x_4 la fraction massique en phase vapeur du fluide.
- Exprimer le transfert thermique q_c reçu par le fluide dans l'évaporateur puis l'évaluer numériquement. Commenter le signe de ce transfert thermique.
- Définir puis évaluer numériquement l'efficacité e du climatiseur. Comparer là à celle de la machine de Carnot fonctionnant entre les températures de l'évaporateur et de liquéfaction du fluide sous la pression P_2 . Commenter le résultat obtenu.
- Le débit massique du fluide est $D_m = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Calculer la puissance thermique évacuée de l'intérieur du véhicule et la puissance mécanique consommée par le climatiseur.

Exercice 5 : Cogénération dans une centrale électrique.

Le principe de la cogénération au gaz naturel est de produire à la fois de l'électricité et de l'eau chaude. On utilise pour cela une centrale à vapeur et on récupère de l'énergie mécanique dans sa turbine et de l'énergie thermique au niveau du condenseur. On s'intéresse dans un premier temps au fonctionnement général d'une telle centrale sans prendre en compte la valorisation de l'énergie dissipée dans le condenseur.

Le cycle de base d'une centrale à vapeur parcourue par de l'eau est schématisé sur la figure suivante. Il consiste en une chaudière où le combustible est brûlé générant ainsi de la vapeur d'eau surchauffée ($2 \rightarrow 3$) qui est ensuite détendue dans une turbine à vapeur dont l'arbre fournit le travail moteur ($3 \rightarrow 4$). La vapeur d'eau sortant de la turbine est totalement liquéfiée dans un condenseur ($4 \rightarrow 1$) avant qu'une pompe ne lui redonne la pression de chaudière ($1 \rightarrow 2$). Le refroidissement du condenseur est assuré par une source froide externe.



On supposera les transformations subies par le système dans la turbine et dans la pompe comme étant adiabatique et réversible. On négligera le travail de la pompe devant le travail de la turbine : $|W_p| \ll |W_t|$.

Le fluide est en écoulement stationnaire avec un débit massique $D_{m1} = 2,0 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. On négligera les variations de vitesse et d'altitude du fluide.

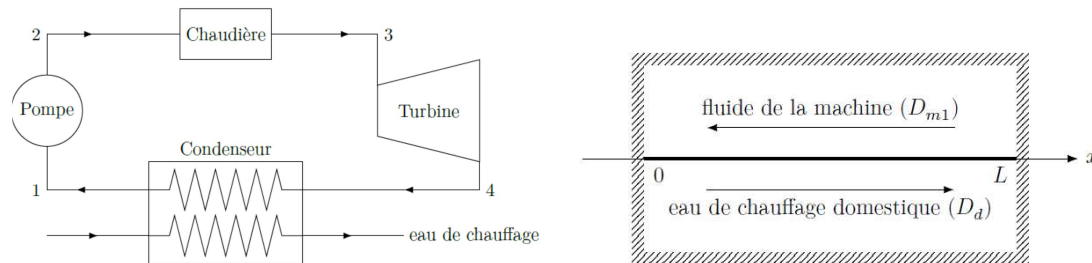
On considère que le fluide circulant au cours d'un cycle reçoit les transferts thermiques Q_c et Q_f respectivement des sources chaude de température T_c et froide de température T_f ainsi que le travail mécanique de la turbine W_t .

- Préciser, en justifiant, les signes de Q_c , Q_f et W_t .
 - Exprimer le rendement r de la machine en fonction Q_c et W_t .
 - En déduire l'expression du rendement r en fonction de T_f , T_c , Q_c et S_c l'entropie créée au cours d'un cycle.
 - En déduire l'expression du rendement de Carnot r_c . Effectuer l'A.N avec $T_f = 343 \text{ K}$ et $T_c = 603 \text{ K}$.
- Au point 1 sortie de condenseur, l'eau est à l'état liquide saturant, sous faible pression à la température T_f .
 - La pompe ($1 \rightarrow 2$) comprime l'eau à environ 128 bar. En première approximation, la température reste constante pendant cette compression.
 - Dans la chaudière ($2 \rightarrow 3$), l'eau sous pression est portée à haute température, l'échauffement comportant deux étapes : chauffage du liquide à pression constante, évaporation de l'eau jusqu'à la dernière goutte de liquide.
 - L'évolution dans la turbine ($3 \rightarrow 4$) est modélisée par une détente adiabatique réversible qui ramène le fluide à la pression P_1 .
- Compléter le diagramme des frigoristes, en représentant le cycle parcouru par le fluide et en indiquant les points d'étapes 1, 2, 3 et 4.
 - Exprimer et évaluer le transfert thermique massique q_c reçu par le fluide dans la chaudière.
 - Exprimer et évaluer le travail massique w_t reçu par le fluide de la part de la turbine. En déduire le rendement r_m de la machine motrice étudiée.
 - Justifier la légitimité de l'hypothèse $|W_p| \ll |W_t|$.
 - Préciser la nature de la transformation $4 \rightarrow 1$. Quel est l'intérêt de cette étape ?
 - Établir l'expression de la fraction massique de vapeur x_{v4} au point 4 en fonction de h_1 , h_4 et $\Delta h_v(T_f)$, enthalpie massique de vaporisation à la température T_f . Faire l'application numérique.

11. Exprimer les variations d'entropie au cours de chaque transformation du système $\Delta S_{1 \rightarrow 2}$, $\Delta S_{2 \rightarrow 3}$, $\Delta S_{3 \rightarrow 4}$ et $\Delta S_{4 \rightarrow 1}$ en fonction de la masse m du système, la capacité thermique massique de l'eau c_{eau} , T_f , T_c , $\Delta h_v(T_f)$, et $\Delta h_v(T_c)$ et x_{v4} .
12. En déduire l'expression de x_{v4} en fonction de c_{eau} , T_f , T_c , $\Delta h_v(T_f)$, et $\Delta h_v(T_c)$.
13. Quelle puissance mécanique P_t reçoit la turbine ? Faire l'application numérique. Commenter le résultat.

On s'intéresse maintenant à l'énergie thermique que l'on peut récupérer au niveau du condenseur afin de produire de l'eau chaude pour alimenter une installation de chauffage domestique.

Le condenseur est un échangeur thermique que l'on suppose parfaitement calorifugé, schématisé figure 11.



On suppose les fluides en écoulement stationnaire. On puise l'eau de chauffage domestique à la température $T_d(x=0)=15,0^\circ\text{C}$, avec un débit $D_d=3\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Elle ressort de l'échangeur à la température $T_d(x=L)=60^\circ\text{C}$.

14. Déterminer alors la puissance thermique reçue dans le condenseur par l'eau domestique.
15. Exprimer puis calculer e_{cogen} , l'efficacité de la machine utilisant le principe de cogénération. Commenter.

