

Les machines thermiques

Lien avec le référentiel :

Module	Notions et contenus	Capacités exigibles
1 – L'énergie	1.3 Energie thermique Machines thermiques	Déterminer le type de machine (moteur thermique, machine frigorifique, pompe à chaleur) en fonction des transferts d'énergie recherchés.

TABLE DES MATIERES

A. DEFINITION D'UNE MACHINE THERMIQUE	1
B. ECHANGES D'ENERGIE EN THERMODYNAMIQUE	1
C. LE PREMIER PRINCIPE DE LE THERMODYNAMIQUE	2
D. CLASSIFICATION DES MACHINES THERMIQUES	2
E. EXPRESSION DU PREMIER PRINCIPE DANS LE CADRE DU CHAPITRE	3
F. CAS D'UNE MACHINE MONOTHERME : LE RADIATEUR	3
G. CAS DES MACHINES DITHERMES	3
H. ETUDE D'UNE MACHINE DITHERME : LA POMPE A CHALEUR.....	3
I. ETUDE D'UNE MACHINE DITHERME : LE REFRIGERATEUR ou CLIMATISEUR	5
J. ETUDE DES MOTEURS DITHERMES	5
EXERCICES	6
CORRECTION	7

A. DEFINITION D'UNE MACHINE THERMIQUE

Définition : une machine thermique est un dispositif permettant la conversion d'un ou plusieurs transferts thermiques en travail, ou inversement. Dans une machine thermique, un fluide subit des transformations qui composent un cycle au cours duquel il échange de l'énergie.

Le champ d'étude est très vaste (moteurs, systèmes de chauffage, climatiseurs, réfrigérateurs...).

B. ECHANGES D'ENERGIE EN THERMODYNAMIQUE

Un système (constitué d'un ou plusieurs corps) peut échanger de l'énergie de deux façons : par **travail** d'une force ou **transfert thermique**.

Un exemple pour comprendre : on enferme de l'air dans une seringue munie d'un piston mobile. On veut communiquer de l'énergie à l'air enfermé : on pousse le piston. Le système (air) a échangé de l'énergie avec le milieu extérieur sous forme de

travail : on a déplacé macroscopiquement la paroi du piston qui, par des chocs, a augmenté l'agitation des molécules de l'air enfermé (la pression augmente).

Définitions: Le **travail** d'une force est l'énergie de cette force lorsque son point d'application (appartenant au système considéré) se déplace. C'est une action ordonnée et macroscopique. Les forces sont définies à l'échelle macroscopique sur la surface délimitant le système. On note l'énergie échangée par travail : **W**.

Le **transfert thermique** est une action désordonnée d'origine microscopique. On note l'énergie échangée par transfert thermique : **Q**.

Exemple : dans l'exemple précédent, on bloque le piston et on met l'ensemble (air + piston) dans l'eau chaude. Les molécules d'eau frappent la paroi du cylindre dont les atomes vibrent. Ces atomes choquent ensuite les molécules d'air enfermé dont l'agitation augmente. On a fourni de l'énergie à l'air mais sans échange de travail (le piston n'a pas bougé). Le transfert d'énergie est dit thermique. On la note Q.

C. LE PREMIER PRINCIPE DE LE THERMODYNAMIQUE

Énoncé par le médecin allemand Von Mayer en 1845.

Le premier principe de la thermodynamique énonce que la variation d'énergie totale ΔE d'un système **fermé** (qui n'échange pas de matière) entre un état initial et un état final est égale à la somme des énergies échangées, c'est-à-dire la somme des énergies échangées par travail W et des énergies échangées par transfert thermique Q, entre l'état initial et l'état final. Il n'y a pas d'énergie produite. L'énergie se transforme. On dit que l'énergie totale E est **conservative**.

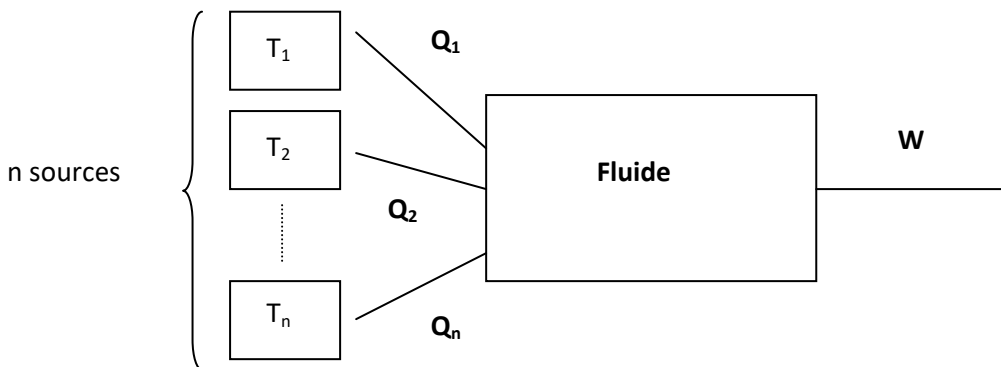
$$\Delta E = E_{\text{final}} - E_{\text{initial}} = W + Q$$

Pour une transformation sur un **cycle** (comme pour les machines thermiques), l'énergie initiale est à égale à l'énergie finale : $\Delta E = W + Q = 0$

D. CLASSIFICATION DES MACHINES THERMIQUES

Point de départ : On considère le fluide contenu dans une machine thermique. Ce fluide échange de l'énergie de deux façons, par travail (W) et par transfert thermique (Q). Sachant qu'une machine thermique doit fonctionner en permanence : le fluide parcourt un cycle.

Schématisons les échanges thermiques entre le fluide en contact avec n sources de température T_n :



- D.1) Exprimer le premier principe de la thermodynamique en l'appliquant au fluide.
- D.2) Quelle relation simple trouve-t-on entre l'énergie échangée par travail et la somme des énergies échangées par transfert thermique ?
- D.3) A partir de cette relation, on peut classifier les machines thermiques en deux types. Les identifier et les caractériser.

E. EXPRESSION DU PREMIER PRINCIPE DANS LE CADRE DU CHAPITRE

En règle générale, W et Q sont des grandeurs algébriques, comptées positivement si le système reçoit de l'énergie, et négativement s'il cède de l'énergie.

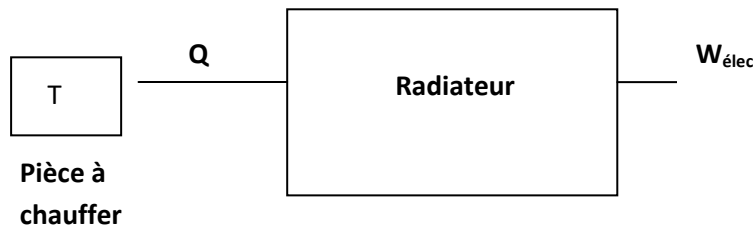
Pour s'affranchir des signes, dans la suite de ce chapitre, nous compterons toutes les énergies positivement. Il faut alors exprimer le premier principe de la façon suivante :

$$\Delta E = W_{\text{reçu}} - W_{\text{cédé}} + Q_{\text{reçu}} - Q_{\text{cédé}} = 0$$

F. CAS D'UNE MACHINE MONOTHERME : LE RADIATEUR

Un radiateur est une machine thermique monotherme, c'est-à-dire qu'il n'y a qu'une seule source (source froide : l'atmosphère de la pièce à chauffer) en contact avec le système.

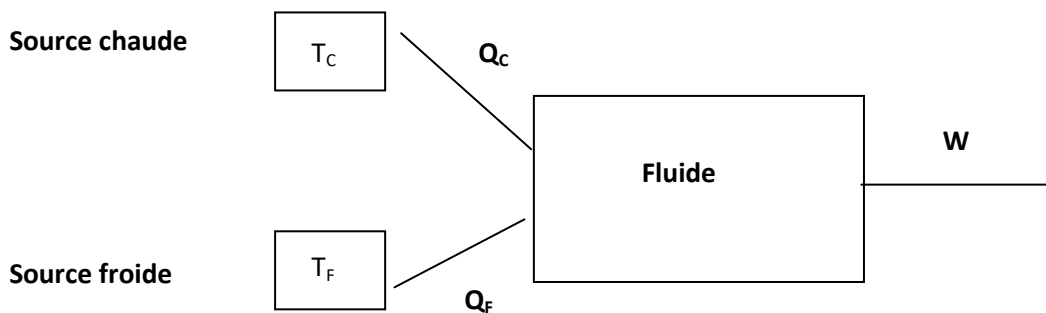
Le radiateur reçoit une énergie sous forme de travail électrique $W_{\text{élec}}$ et transmet Q dans la pièce.



- F.1) Représenter le sens des transferts d'énergie sur la chaîne énergétique précédente.
- F.2) Utiliser le premier principe de la thermodynamique pour déterminer une relation simple entre $W_{\text{élec}}$ et Q .
- F.3) Déterminer alors le rendement η d'un radiateur. Commenter.

G. CAS DES MACHINES DITHERMES

Le fluide est en contact avec **deux sources**. On aura une source dite chaude à la température T_C et une source dite froide à la température T_F . Le fluide échange de l'énergie par transfert thermique avec les deux sources et par travail avec le milieu extérieur.



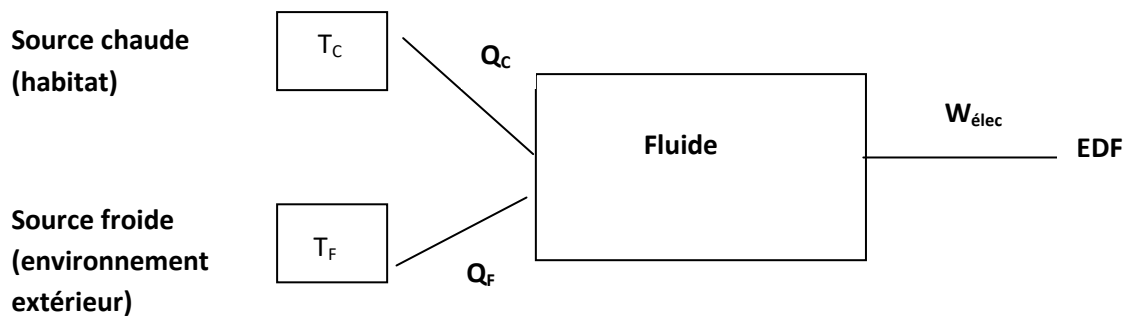
H. ETUDE D'UNE MACHINE DITHERME : LA POMPE A CHALEUR

Une pompe à chaleur (ou PAC) utilise l'énergie thermique de l'air, de l'eau ou du sol pour le chauffage. Certaines fonctionnent en mode réversible pour produire du chaud l'hiver et du froid l'été. En moyenne, pour couvrir 100 % des besoins en chauffage d'une habitation, une PAC consomme environ 30 % d'énergie électrique, les 70 % restants étant puisés dans la nature.

D'après www.pompeachaleur.org

- H.1) Quel est l'intérêt d'une pompe à chaleur du point de vue de la consommation électrique nécessaire au chauffage d'une habitation, par rapport à un chauffage direct ?

H.2) Compléter la chaîne énergétique d'une pompe à chaleur en indiquant le sens des transferts d'énergie :



Définition : l'efficacité ϵ (ou coefficient de performance **CoP**) d'une pompe à chaleur est égale au rapport entre l'énergie utile et l'énergie absorbée **et payée par l'utilisateur**. C'est une valeur qui peut être supérieure à 1.

H.3) Exprimer le premier principe de la thermodynamique appliquée à la pompe à chaleur.

H.4) Exprimer $\epsilon_{\text{pompe à chaleur}}$ en fonction des énergies échangées et montrer que cette efficacité est supérieure à 1.

Point technique : comment fonctionne une pompe à chaleur ?

<https://www.youtube.com/watch?v=n-1RCwkiUvo>

La pompe à chaleur contient un compresseur, un évaporateur, un condenseur et un détendeur de pression dans lesquels circule un fluide frigorigène. Ce fluide chemine dans le circuit thermodynamique grâce à l'électricité qui va activer le compresseur. La température du fluide dépend des changements de pression provoqués soit par le compresseur (compression) soit par le détendeur (dépression). Le rôle de l'évaporateur est de capter l'énergie thermique du fluide qui sera ensuite diffusée par le condenseur.

L'évaporateur :

Lorsqu'il est dans l'évaporateur, le fluide frigorigène est liquide. Il est encore à basse pression et sa température avoisine les -10°C . Quand la température du milieu (l'air, l'eau, le sol) est plus élevée que celle du fluide frigorigère (-10°C), l'évaporateur capte l'énergie thermique correspondante.

Cet apport d'énergie va permettre l'évaporation du fluide frigorigène. Entre son entrée et sa sortie de l'évaporateur, il sera donc passé de l'état liquide à l'état de vapeur.

Le compresseur :

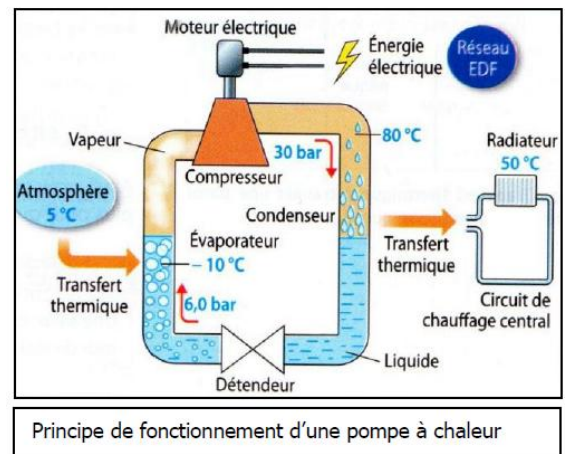
C'est au moment où le fluide frigorigène passe à l'état de vapeur qu'il est aspiré par le compresseur. Cette étape de compression permet d'augmenter considérablement la température du fluide : elle atteint alors environ $+75^{\circ}\text{C}$.

Le condenseur :

Le fluide frigorigène est ensuite envoyé dans le condenseur, où la température est largement inférieure à celle du fluide. Il se produit alors un transfert thermique vers le milieu environnant (la maison). A cours de ce processus, le fluide frigorigène se condense et repasse à l'état liquide.

Le détendeur :

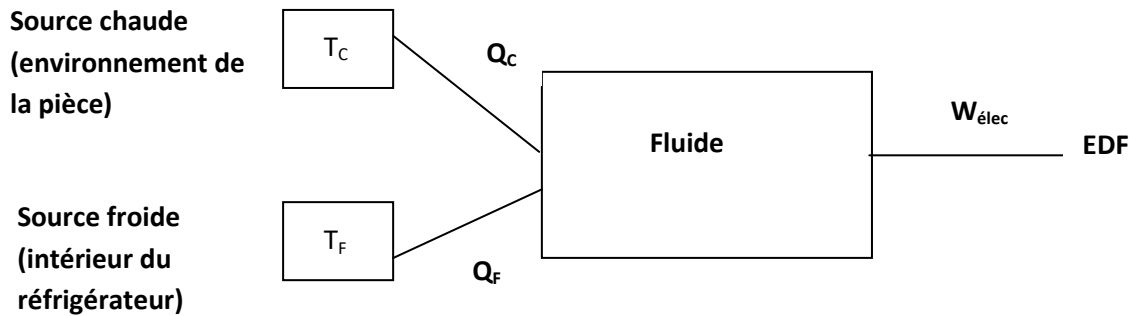
C'est grâce au détendeur que le fluide fait le chemin inverse, passant de "haute température - haute pression" (condenseur) à "basse température - basse pression" (évaporateur). Revenu à son état initial, le fluide peut en effet commencer un nouveau cycle dans la pompe à chaleur. Le détendeur permet aussi de régler le débit du fluide dans le circuit.



Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

I. ETUDE D'UNE MACHINE DITHERME : LE REFRIGERATEUR ou CLIMATISEUR

Un réfrigérateur ou un climatiseur fonctionne de manière identique à une pompe à chaleur mais son utilisation est différente.



I.1) Flécher le sens des transferts d'énergie.

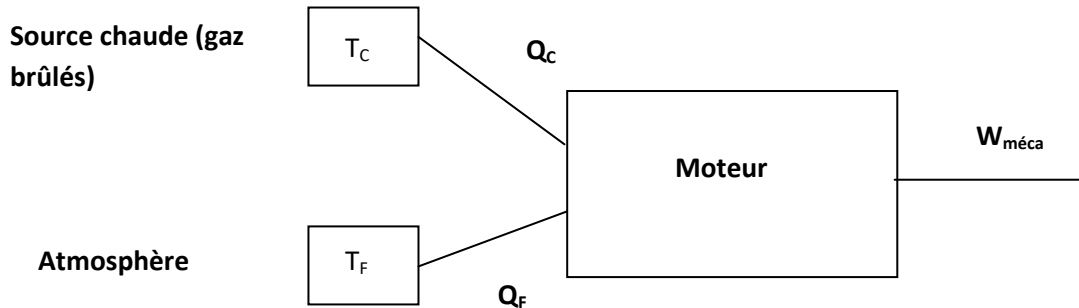
I.2) Exprimer $e_{\text{réfrigérateur}}$ en fonction de Q_F et $W_{\text{élec}}$.

J. ETUDE DES MOTEURS DITHERMES

Définition : Un moteur ditherme est une machine thermique permettant de produire un travail mécanique. Il est relié à deux sources : la source chaude (produits de la combustion air + carburant à haute température) et la source froide (atmosphère).

Dans le cas des moteur à combustion interne, le combustible mélangé à de l'air est allumé au moyen d'une étincelle (bougies) à l'intérieur d'un cylindre. Il existe des moteurs à combustion externe (source chaude à l'extérieur du cylindre).

L'énergie thermique récupérée par la source froide (atmosphère) est considérée comme une perte.



J.1) Fléchez le sens des transferts d'énergie.

J.2) Exprimer l'expression du rendement du moteur η_{moteur} en fonction de $W_{\text{méca}}$ et de Q_C .

J.3) Utiliser le premier principe de la thermodynamique pour exprimer η_{moteur} en fonction de Q_F et Q_C . Dans quelle situation idéale le rendement serait-il maximal ?

EXERCICES

Exercice 1 : Rendement d'un moteur thermique

Au cours d'un cycle, le fluide thermique d'un moteur ditherme reçoit 420 J d'une source chaude à 200°C. La source froide est à 17°C. Le travail fourni par le moteur est de 120 J. Calculer le rendement de ce moteur thermique.

Exercice 2 : Machine frigorifique

Une machine frigorifique fonctionne avec une source froide de température $\theta_f = -30^\circ\text{C}$ et une source chaude de température $\theta_c = 25^\circ\text{C}$. L'énergie thermique échangée par le fluide moteur avec la source chaude est $Q_c = -1000 \text{ J}$ et celle échangée avec la source froide est $Q_f = +700 \text{ J}$.

- 1) Représenter par un schéma les échanges réalisés au sein de cette machine frigorifique. Vous flécherez les sens des transferts d'énergie.
- 2) Calculer le travail échangé entre le fluide et le milieu extérieur. Est-ce un travail fourni ou reçu ?

Exercice 3 : Chauffage et refroidissement d'une maison

Un récepteur thermique est utilisé pour assurer le chauffage (l'hiver) et le refroidissement (l'été) d'une maison. Donc, ce récepteur thermique joue le rôle d'une pompe à chaleur l'hiver et celui d'un climatiseur l'été. Le fluide moteur est du fréon. Il parcourt un circuit dans lequel, étant sous forme de vapeur, il est comprimé par un compresseur C et se condense dans un liquéfacteur L (aussi appelé condenseur). Puis, il subit une détente au niveau d'une valve V et finit de se vaporiser dans l'évaporateur E avant de retourner dans le compresseur.

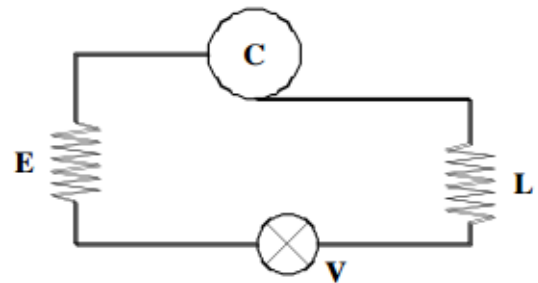


Schéma de principe de l'installation

- 1) Dans un récepteur thermique, lequel des deux organes L ou E faut-il mettre en contact avec la source chaude et la source froide respectivement ?
- 2) En hiver, la température extérieure moyenne est de 0°C et la température intérieure est maintenue à 20°C.
 - a. Calculer l'efficacité maximale du récepteur thermique.
 - b. Calculer alors l'énergie thermique maximale qui peut être fournie à la maison au bout d'une heure si la puissance du compresseur électrique est de 4000W.
- 3) En été, la température extérieure moyenne est de 35°C et la température intérieure est maintenue à 20°C.
 - a. Calculer l'efficacité maximale du récepteur thermique.
 - b. Calculer alors l'énergie thermique maximale qui peut être rejetée de la maison.

Données :

L'efficacité maximale d'une pompe à chaleur vaut : $e_{\max} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$

L'efficacité maximale d'un climatiseur ou d'un réfrigérateur vaut : $e_{\max} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$

Températures en K !

CORRECTION

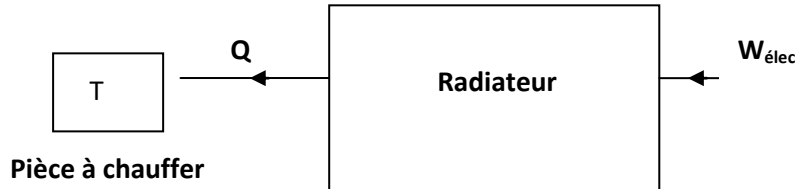
D.1) $\sum_{i=1}^n Q_i + W = 0$ avec $\sum_{i=1}^n Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$

D.2) $\sum_{i=1}^n Q_i = -W$

D.3) Premier type de machine : $W > 0$ et $\sum_{i=1}^n Q_i < 0$: le fluide reçoit un travail et cède globalement de l'énergie thermique : cas des réfrigérateurs, des climatiseurs, pompes à chaleur...

Second type de machine : $W < 0$ et $\sum_{i=1}^n Q_i > 0$: le fluide reçoit globalement de l'énergie thermique et fournit un travail : cas des moteurs thermiques.

F.1)



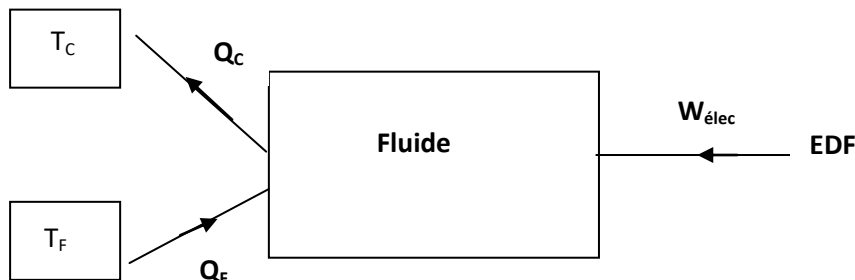
F.2) $\Delta E = W_{reçu} - W_{cédé} + Q_{reçu} - Q_{cédé} = 0 \Leftrightarrow W_{elec} - Q = 0 \Leftrightarrow W_{elec} = Q$

F.3) Le rendement η du radiateur est défini par : $\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie absorbée}} = \frac{Q}{W_{elec}} = 1$: le rendement d'un radiateur monotherme est de 100%. Toute l'énergie électrique est convertie en énergie thermique. Une partie de cette énergie servira effectivement à chauffer la pièce, mais une partie sera perdue à l'extérieur (si l'isolation thermique est mauvaise).

H.1) Utiliser une pompe à chaleur permet de réduire la consommation d'électricité par rapport à un chauffage direct.

H.2)

Source chaude
(habitat)



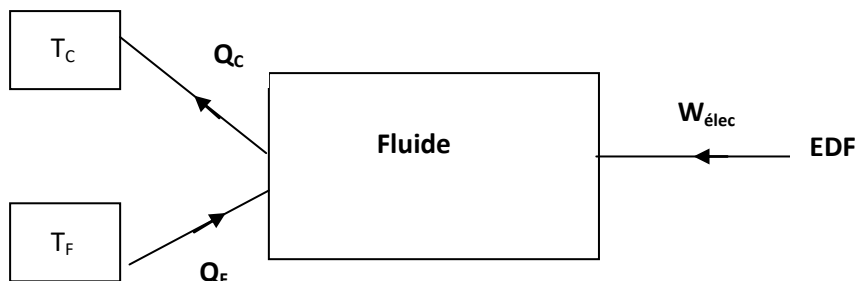
Source froide
(environnement extérieur)

H.3) $\Delta E = W_{reçu} - W_{cédé} + Q_{reçu} - Q_{cédé} = 0 \Leftrightarrow W_{elec} + Q_F - Q_C = 0$

H.4) $e_{pompe \text{ à chaleur}} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie absorbée et payée}} = \frac{Q_C}{W_{elec}} = \frac{W_{elec} + Q_F}{W_{elec}} = \frac{W_{elec}}{W_{elec}} + \frac{Q_F}{W_{elec}} = 1 + \frac{Q_F}{W_{elec}} > 1$

I.1)

Source chaude
(environnement de la pièce)

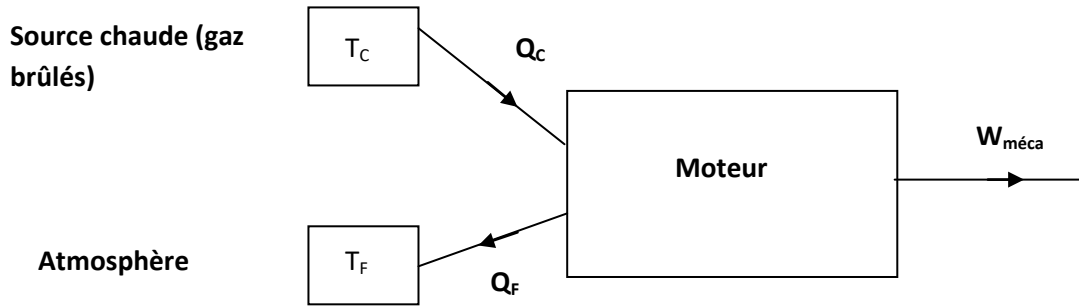


Source froide
(intérieur du réfrigérateur)

I.2) $\Delta E = W_{reçu} - W_{cédé} + Q_{reçu} - Q_{cédé} = 0 \Leftrightarrow W_{elec} + Q_F - Q_C = 0$

$e_{réfrigérateur} = \frac{Q_F}{W_{elec}}$ (l'énergie « utile », ici, est l'énergie thermique perdue par l'intérieur du réfrigérateur (on veut faire du « froid »)).

J.1)



$$J.2) \eta_{\text{moteur}} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie absorbée}} = \frac{W_{\text{méca}}}{Q_C}$$

J.3) Le premier principe permet de dire que : $Q_C - Q_F - W_{\text{méca}} = 0 \Leftrightarrow W_{\text{méca}} = Q_C - Q_F$

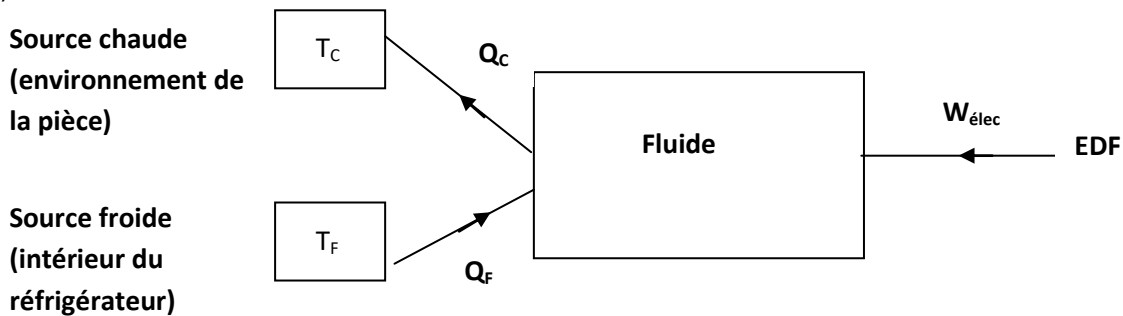
Ainsi : $\eta_{\text{moteur}} = \frac{Q_C - Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{Q_F}{Q_C}$. Le rendement serait maximal dans la situation idéale où $Q_F = 0$, ce qui n'est jamais observée car il y a toujours des pertes thermiques vers l'extérieur (les gaz brûlés sortent du pot d'échappement avec une énergie thermique).

Exercice 1 : Rendement d'un moteur thermique

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie absorbée}} = \frac{120}{420} = 0,29 = 29\%$$

Exercice 2 : Machine frigorifique

1)



2) On utilise le premier principe en faisant intervenir les grandeurs algébriques des énergies échangées : $W_{\text{élec}} + Q_F + Q_C = 0$ avec $Q_F = +700 \text{ J}$ et $Q_C = -1000 \text{ J}$ soit : $W_{\text{élec}} + 700 + (-1000) = 0 \Leftrightarrow W_{\text{élec}} = +300 \text{ J}$: grandeur positive car le fluide reçoit un travail (indirectement : ce travail électrique permet, en fait, à la pompe de mettre en mouvement le fluide).

Exercice 3 :

1) Le liquéfacteur (L) est en contact avec la source chaude et l'évaporateur (E) est en contact avec la source froide.

a. $e_{\text{max}} = \frac{T_C}{T_C - T_F} = \frac{20+273}{(20+273)-(0+273)} = 15$

b. Par définition de l'efficacité d'une pompe à chaleur :

$$e = \frac{Q_C}{W_{\text{élec}}} \Leftrightarrow Q_{C,\text{max}} = e_{\text{max}} \times W_{\text{élec}} = e_{\text{max}} \times P_{\text{élec}} \times \Delta t = 15 \times 4000 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 6,0 \cdot 10^4 \text{ W} = 60 \text{ kW}.$$

2)

a. $e_{\text{max}} = \frac{T_F}{T_C - T_F} = \frac{20+273}{(35+273)-(20+273)} = 20$

b. Par définition de l'efficacité d'un climatiseur :

$$e = \frac{Q_F}{W_{\text{élec}}} \Leftrightarrow Q_{F,\text{max}} = e_{\text{max}} \times W_{\text{élec}} = e_{\text{max}} \times P_{\text{élec}} \times \Delta t = 20 \times 4000 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 80 \text{ kW}$$