

Chapitre E-5 Les machines thermiques

***** *La thermodynamique et ses applications concrètes* *****

A- Généralités

Définition

Premier et second principe appliqués à un cycle, inégalité de Clausius

Machine monotherme

Machine ditherme

B- Moteur thermique ditherme

Description, rendement

Théorème de Carnot, cycle réversible de Carnot

Moteur réel

C- Récepteur ditherme

Description

Réfrigérateur, efficacité frigorifique

Pompe à chaleur, performance



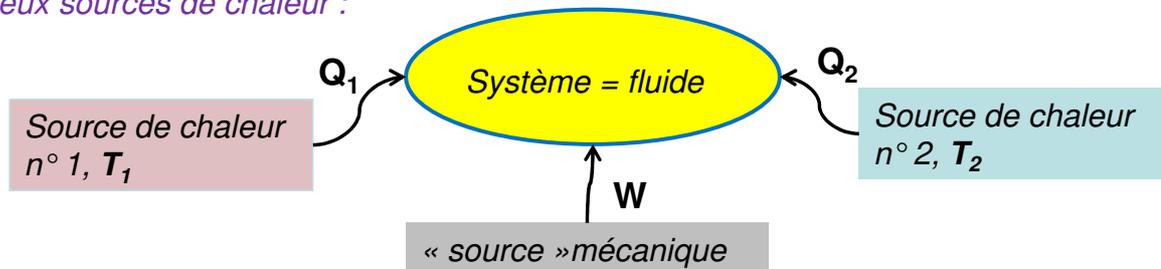
A- Généralités

1-Définition

Une machine thermique est un dispositif dans lequel un fluide subit des **transformations cycliques** en **échangeant de l'énergie thermique** (chaleur) et **mécanique** (travail) **avec l'extérieur**. Les échanges thermiques ont uniquement lieu entre le fluide et une ou plusieurs sources de chaleur.

1

Schéma avec deux sources de chaleur :



On appelle T_i la température de la source n° i. Cette source fournit au système le transfert thermique Q_i pendant le cycle.

Le système étudié est le fluide, le cycle se décompose en plusieurs étapes.

Si au cours du cycle le fluide est en contact avec :

- une seule source de chaleur c'est une **machine monotherme**
- deux sources de chaleur c'est une **machine ditherme**

La machine est un :

- **moteur thermique** si elle fournit du travail à l'extérieur. Sur un cycle, $W < 0$.
- **récepteur thermique** si elle reçoit du travail de l'extérieur. Sur un cycle, $W > 0$.

2- Application du premier principe

Premier principe : $\Delta U = W + Q_1 + Q_2 + \dots$

Or, au cours d'un cycle, $\Delta U = 0$ donc

$$0 = W + Q_1 + Q_2 + \dots$$

3- Application du second principe : inégalité de Clausius

Au cours du cycle, la source n°i reçoit l'énergie – Q_i . Elle est à la température constante T_i et subit une transformation réversible.

Le second principe de la thermodynamique, qui traduit l'irréversibilité des transformations se traduit pour le cycle par l'**inégalité de Clausius** (admise) :

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \dots \leq 0 \Leftrightarrow \sum_{\text{sources}} \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

Plus précisément : $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \dots < 0$ si le cycle est irréversible

$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \dots = 0$ si le cycle est réversible

4- Machine monotherme

Il n'y a qu'une source de chaleur, qui fournit toute l'énergie thermique Q .

Inégalité de Clausius : $Q/T_{\text{source}} \leq 0 \Leftrightarrow Q \leq 0$

Alors, avec le premier principe $W + Q = 0$ on a donc $W \geq 0$

Conclusion : une machine monotherme est forcément un récepteur thermique. Elle reçoit du travail de l'extérieur et fournit de la chaleur en échange.

Intérêt : c'est donc un système de chauffage

3

5- Machine ditherme

Ce cas est beaucoup plus intéressant que le précédent, c'est l'objet de toute la suite du chapitre.

Les deux sources ont des températures différentes. On choisira par exemple $T_1 > T_2$

➤ La source n°1 est la source chaude

➤ La source n°2 est la source froide

$$\begin{matrix} T_1 = T_{\text{chaud}} \\ T_2 = T_{\text{froid}} \end{matrix}$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$$

Deux outils :

premier principe $W + Q_1 + Q_2 = 0$

Clausius :

Selon les signes et les valeurs relatives de Q_1 et Q_2 , on aura différents types de machine.

- Soit un moteur ditherme (ou moteur thermique) : le principe est de fournir à l'extérieur de l'énergie mécanique, par conversion (partielle) d'énergie thermique.
- Soit un récepteur ditherme : le principe est alors de prélever de l'énergie à la source froide et d'en fournir à la source chaude. Un récepteur reçoit du travail, il est donc lui-même alimenté par un moteur extérieur.

Est-il intéressant de prélever de l'énergie à la source froide pour en fournir à la source chaude?

B- Moteur thermique ditherme

1-Description

Principe de Carnot énoncé par Sadi Carnot, 1824 (le physicien et pas le président assassiné en 1894) : un moteur thermique prélève de l'énergie à la source chaude, en convertit une partie en travail (=utile) et restitue l'autre partie à la source froide (= inutile)

Attention, avec les conventions utilisées, W , Q_1 et Q_2 vont de l'extérieur vers le système. On a donc les signes suivants :

⚠ Pour un moteur, $W < 0$, le moteur fournit de l'énergie mécanique à l'extérieur.

on a $Q_1 > 0$, le moteur reçoit de l'énergie thermique de la source chaude. *C'est l'énergie qu'on doit dépenser pour faire fonctionner le moteur*

et $Q_2 < 0$, le moteur fournit de l'énergie thermique à la source froide. *Ceci n'est évidemment pas le but recherché mais c'est inévitable*

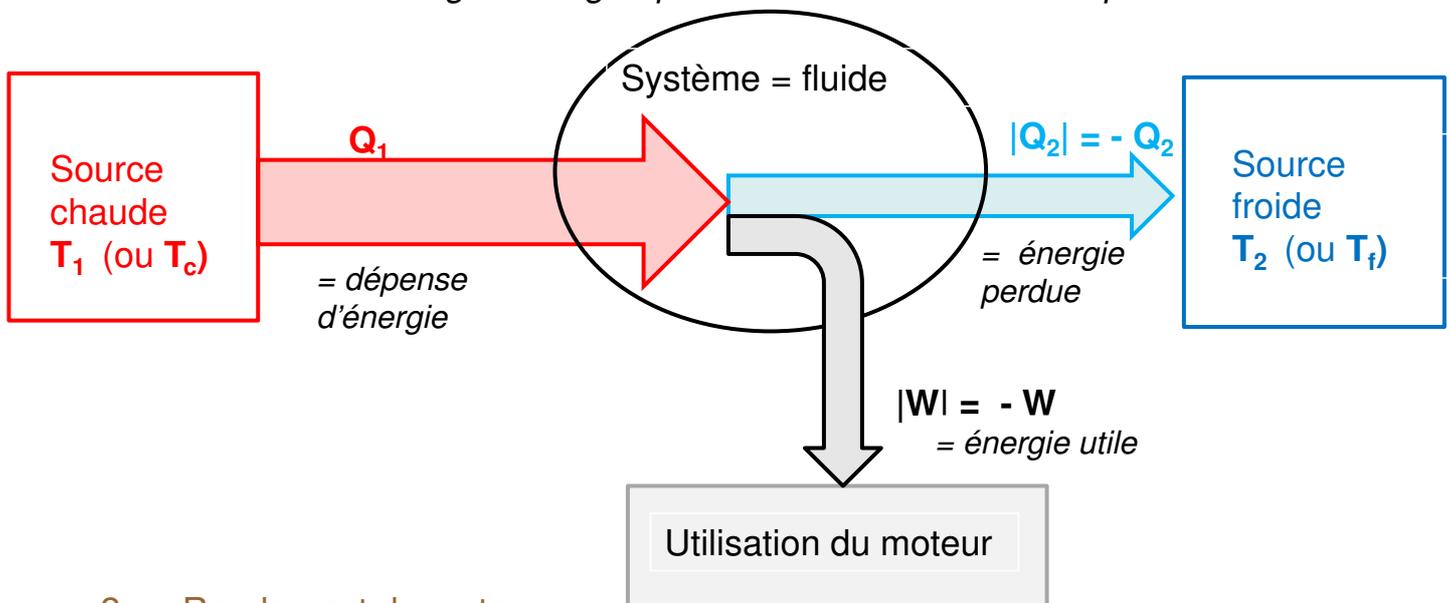
Par le premier principe : $W + Q_1 + Q_2 = 0 \Leftrightarrow Q_1 = -W - Q_2$

Si on fait apparaître les termes positifs, on a donc $Q_1 = |W| + |Q_2|$

Analyser la conservation de l'énergie, à formuler en français :

5

Sens réel des échanges énergétiques dans un moteur thermique



2- Rendement du moteur

On définit le **rendement** r comme le rapport entre l'énergie utile et l'énergie dépensée.

$$r = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée}} = \frac{-W}{+Q_1}$$

On peut remplacer $-W$ par $Q_1 + Q_2$ par 1^{er} principe : $r = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$

Ce rendement est bien compris entre 0 et 1 car $Q_2 < 0$ et $|Q_2| < Q_1$

6

3- Rendement maximal, théorème de Carnot

On va chercher une relation entre le **rendement** r et les températures des sources T_1 et T_2 .

On exprime d'abord r en fonction des transferts thermiques : $r = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$

Inégalité de Clausius : $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \Leftrightarrow$

d'où

Le rendement maximal est

$$r \leq$$

$$r_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$



Vérifier le sens
des inégalités
T en K

Le rendement maximal est appelé rendement de Carnot et n'est obtenu que pour un cycle réversible. **A savoir retrouver**

Comment augmenter le rendement ?

- Il faut rendre le cycle le plus réversible possible (*éviter les frottements par ex*)...
- Il faut augmenter l'écart entre T_1 et T_2 . en pratique, on ne maîtrise pas la température de la source froide. Le rendement est donc meilleur si on augmente la température de la source chaude.

A.N. si $T_2 = 20^\circ\text{C}$, calculer le rendement maximal si la source chaude est à 100°C ou à 400°C

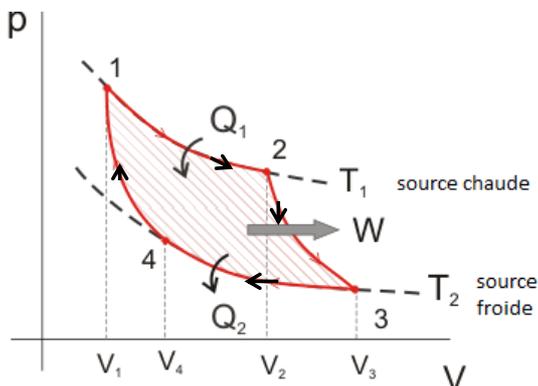
7

4- Moteur réversible et cycle de Carnot

Le **cycle de Carnot sert de modèle** aux machines dithermes. Il est constitué de 4 étapes successives et réversibles, pour un système fluide GP :

- Une isotherme à T_1 : le fluide reçoit alors Q_1 de la source chaude
- Une adiabatique qui amène le fluide à T_2
- Une isotherme à T_2 : le fluide reçoit alors Q_2 de la source froide (il fournit $-Q_2$)
- Une adiabatique qui ramène le fluide à T_1

Comme c'est un cycle, n'importe quelle étape peut être le point de départ. Le cycle est décrit dans le sens moteur sur les diagrammes thermodynamiques ci-dessous.



Commenter l'allure des courbes

Sur une adiabatique réversible, un gaz parfait suit la loi de Laplace : $PV^\gamma = \text{constante}$

Le rendement de ce cycle « idéal » est r_{\max} qui **ne dépend que des températures**.
Ce cycle ne correspond pas à un moteur réel (*dommage, c'est le plus rentable...*)

8

5- Un peu de culture sur les moteurs thermiques réels

Le moteur d'une voiture (essence ou diesel) est un moteur thermique, de même que celui d'une tronçonneuse (ou d'une tondeuse à gazon équipée d'un réservoir de carburant), d'un avion, d'un bateau, etc... A plus grande échelle, dans une centrale électrique au gaz, au charbon ou nucléaire, on convertit aussi de l'énergie thermique en travail pour faire tourner une turbine et produire de l'électricité.

Décrivons brièvement un moteur de voiture :

- Le système est un gaz, mélange d'air et de carburant, contenu dans un cylindre avec piston mobile. (l'essence à la pompe est liquide mais une fois dans le cylindre, à température élevée, c'est bien un gaz)
- La source froide est l'air extérieur. T_2 est donc la température atmosphérique
- La température T_1 de la source chaude est assurée par la combustion du carburant. Elle devient constante après quelques minutes de fonctionnement, quand « le moteur est chaud »

Problème n°1 : le système est ouvert car à chaque « cycle » il faut injecter du carburant « neuf » et évacuer les produits de combustion = gaz d'échappement. Toutefois, comme la quantité de carburant injectée est toujours la même, on peut considérer que c'est cyclique.

Problème n°2 : la combustion est une réaction chimique, qui modifie la composition du système. Toutefois, le carburant est injecté en large défaut par rapport à l'oxygène qui est lui-même très minoritaire devant l'azote. On peut donc supposer que la quantité de gaz est quasiment constante.

9

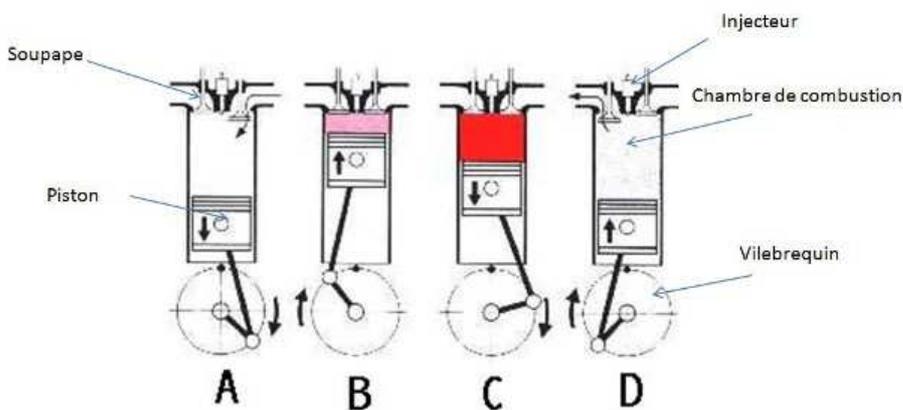


Schéma du principe de fonctionnement.

- 1^{er} temps : admission du mélange gazeux
- 2^e temps : compression du mélange, le volume diminue jusqu'à V_{min}
- 3^e temps : combustion + détente. Le volume augmente jusqu'à V_{max} . C'est le temps effectivement moteur
- 4^e temps : échappement des gaz brûlés via la soupape

Le mouvement de va et vient du piston est converti en mouvement de rotation, pour faire tourner un arbre moteur. Un moteur a en pratique plusieurs cylindres. La « cylindrée », indiquée en L, est le volume total parcouru par les pistons soit : (nombre de pistons \times ($V_{max} - V_{min}$))

Rendement d'un moteur essence : jusqu'à 36% (moyenne vers 23%)

Rendement d'un moteur diesel : jusqu'à 42% (moyenne vers 28%) un peu meilleur, conception différente

Pour un petit trajet en ville avec une voiture froide, c'est plus proche de 20%...

On atteint des rendements plus importants pour des installations industrielles, avec notamment une température T_1 plus élevée.

Rien à retenir dans ce paragraphe, il faut juste faire le lien avec l'aspect théorique précédent. Un exercice sur les moteurs décrit au besoin le cycle

10

C- Récepteur thermique ditherme

1-Description d'un récepteur

Pour un récepteur, $W > 0$

on a $Q_2 > 0$, le système reçoit de l'énergie thermique de la source froide.

et $Q_1 < 0$, le système fournit de l'énergie thermique à la source chaude.

Par le premier principe : $W + Q_1 + Q_2 = 0 \Leftrightarrow -Q_1 = W + Q_2$

Si on fait apparaître les termes positifs, on a $|Q_1| = W + Q_2$

Les échanges d'énergie dans un récepteur vont exactement en sens inverse du moteur.

Le travail est apporté au système par un moteur externe. En général, c'est un moteur électrique. Mais W peut aussi être fourni par un moteur thermique. W est la **dépense énergétique de la machine**.

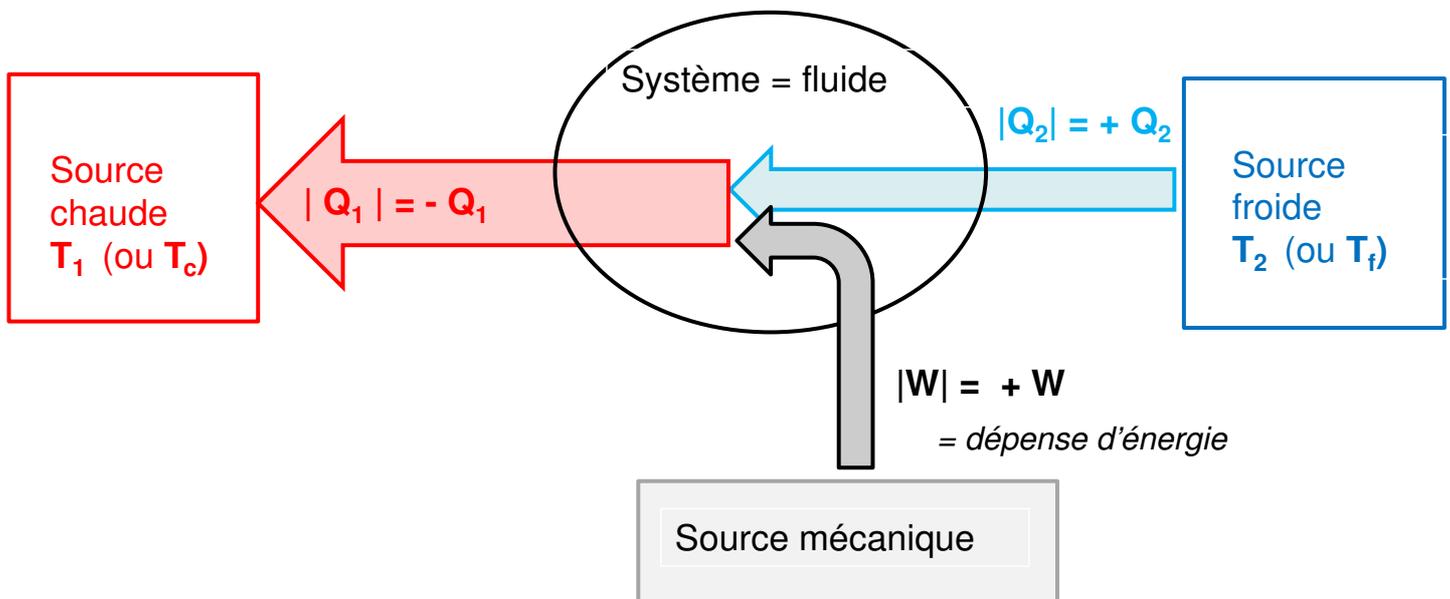
Selon les cas, l'intérêt de la machine sera Q_2 (*si la machine a pour rôle de refroidir*) ou $|Q_1|$ (*si la machine a pour rôle de chauffer*).

Les diagrammes thermodynamiques sont des cycles décrits dans le sens antihoraire.

Le cycle modèle, cycle « idéal » reste le cycle de Carnot, mais décrit dans le sens inverse du moteur (*à l'époque de Carnot, ces machines n'existaient pas*)

11

Sens réel des échanges énergétiques dans un récepteur ditherme



2- Machine frigorifique et efficacité frigorifique

Exemples :

- **Réfrigérateur, congélateur** : dans ce cas, la source froide est l'intérieur de l'appareil ($T_2 = 5^\circ\text{C}$ ou -18°C) et la source chaude est la cuisine ($T_1 = 20^\circ\text{C}$)
- **Climatiseur** : la source froide est l'intérieur de la pièce climatisée ($T_2 = 25^\circ\text{C}$) et la source chaude est l'extérieur ($T_1 = 35^\circ\text{C}$)

12

L'objectif de cette machine est de **refroidir la source froide**, la grandeur énergétique utile est Q_2 . Attention, on ne parle pas de rendement mais d'efficacité pour les récepteurs. On définit l'**efficacité frigorifique** e comme le rapport entre l'énergie utile et l'énergie dépensée.

$$e = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée}} = \frac{+ Q_2}{W}$$



signes

On peut remplacer W par $-Q_1 - Q_2$ par 1^{er} principe : $e =$

Cette efficacité est bien positive car $Q_1 < 0$ et $-Q_1 > Q_2$

On va là aussi chercher à exprimer e en fonction des températures. Pour ça, on fait apparaître le rapport des transferts thermiques pour utiliser l'inégalité de Clausius

$e =$

Inégalité de Clausius : $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \Leftrightarrow$

On obtient e :

$$e \leq \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

L'efficacité maximale est :

$$e_{\max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

L'efficacité maximale est obtenue pour un cycle réversible. **A savoir retrouver !**

13

A.N. pour un frigo, avec $T_2 = 5^\circ\text{C}$, et $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $e_{\max} =$

L'efficacité réelle est inférieure mais reste supérieure à 1. Si on dépense 1 J en électricité pour faire marcher le frigo, on enlève plus que 1 J d'énergie dans le frigo. On ne parle donc pas de rendement

Comment varie l'efficacité? La dépense d'énergie W ?

- Il faut rendre le cycle le plus réversible possible pour augmenter l'efficacité.
- En pratique, la température de la source froide est imposée (ex 5°C pour un frigo). e augmente si l'écart entre T_1 et T_2 diminue. Si $T_1 \rightarrow T_2$, $e \rightarrow +\infty \dots$ *mais on n'a pas besoin de la machine dans ce cas!* L'efficacité est meilleure quand T_1 diminue (*un frigo consomme plus en été, quand il fait chaud dans la cuisine*).
- Pour un climatiseur, on règle la température T_2 souhaitée dans la pièce. La dépense d'énergie augmente évidemment si T_2 diminue.
- A noter, si l'écart entre T_1 et T_2 augmente, les fuites thermiques (= *pertes par conduction*) entre les deux sources augmentent aussi. Or, la machine sert juste à compenser ces pertes pour maintenir T_2 , donc il faut plus d'énergie aussi.
- La dépense d'énergie W est proportionnelle à Q_2 . Or Q_2 sert juste à compenser les fuites. Elle augmente donc avec les dimensions du système et s'il est mal isolé thermiquement (*et quand on laisse ouverte la porte du frigo*)

En pratique, le moteur qui fournit au système W ne fonctionne pas en continu. Un capteur de température analyse la température T_2 et le moteur se déclenche quand T_2 monte au dessus d'un certain seuil. La température T_2 n'est pas rigoureusement constante, elle monte quand le moteur est arrêté (à cause des fuites) et diminue quand le moteur fonctionne. Elle oscille donc légèrement.

3- Pompe à chaleur

Une **pompe à chaleur (P.A.C.)** est un système de chauffage d'une habitation particulièrement économique. Dans ce cas,

- la source froide est à l'extérieur de l'habitation : soit directement l'air extérieur (*le plus fréquent*), soit une source de température plus stable (*eau d'un lac, sous-sol*)
- la source chaude est l'air intérieur ou l'eau d'une chaudière (*si circuit de radiateurs*)

L'objectif de cette machine est de **réchauffer la source chaude**, la grandeur énergétique utile est donc $-Q_1$. On définit l'**efficacité thermique** ou **coefficient de performance c** comme le rapport entre l'énergie utile et l'énergie dépensée.

$$c = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée}} = \frac{-Q_1}{W} = \quad \text{en remplaçant } W \text{ par } -Q_1 - Q_2$$

Comme précédemment :

$$c =$$

$$\text{Clausius : } \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \Leftrightarrow$$



Signes et sens des inégalités

On obtient c :

$$c \leq \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

L'efficacité maximale est : $c_{\max} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$ pour un cycle réversible.

15

A.N. pour des températures analogues avec l'ex. du frigo, soit une température extérieure $T_2 = 5^\circ\text{C}$ et une température intérieure $T_1 = 20^\circ\text{C}$ on a :

$$c_{\max} =$$

*L'efficacité réelle est inférieure mais **reste supérieure à 1**. Avec les P.A.C. usuelles et les températures moyennes en hiver, l'efficacité moyenne peut être de l'ordre de 4. **C'est ce qui fait l'intérêt majeur de ce système par rapport à un chauffage classique** : on dépense 4 fois moins d'énergie pour chauffer à la même température !*

Rem : le terme « pompe » à chaleur illustre le fait qu'on récupère de l'énergie à l'extérieur (dans l'atmosphère) pour l'amener à l'intérieur de la maison.

Comparaison du fonctionnement en PAC et en machine frigorifique, pour les mêmes températures

On a vu que $|Q_1| > Q_2$. Cela signifie qu'une machine fournit plus d'énergie à la source chaude qu'elle n'en prélève à la source froide. Pour des températures identiques, l'efficacité thermique est supérieure à l'efficacité frigorifique

S'il fait très chaud chez moi, puis-je refroidir ma cuisine en laissant tout simplement la porte du frigo ouverte?

Rem : il existe des pompes à chaleurs « réversibles ». Ce sont des appareils qui fonctionnent en PAC l'hiver et en climatiseur l'été.

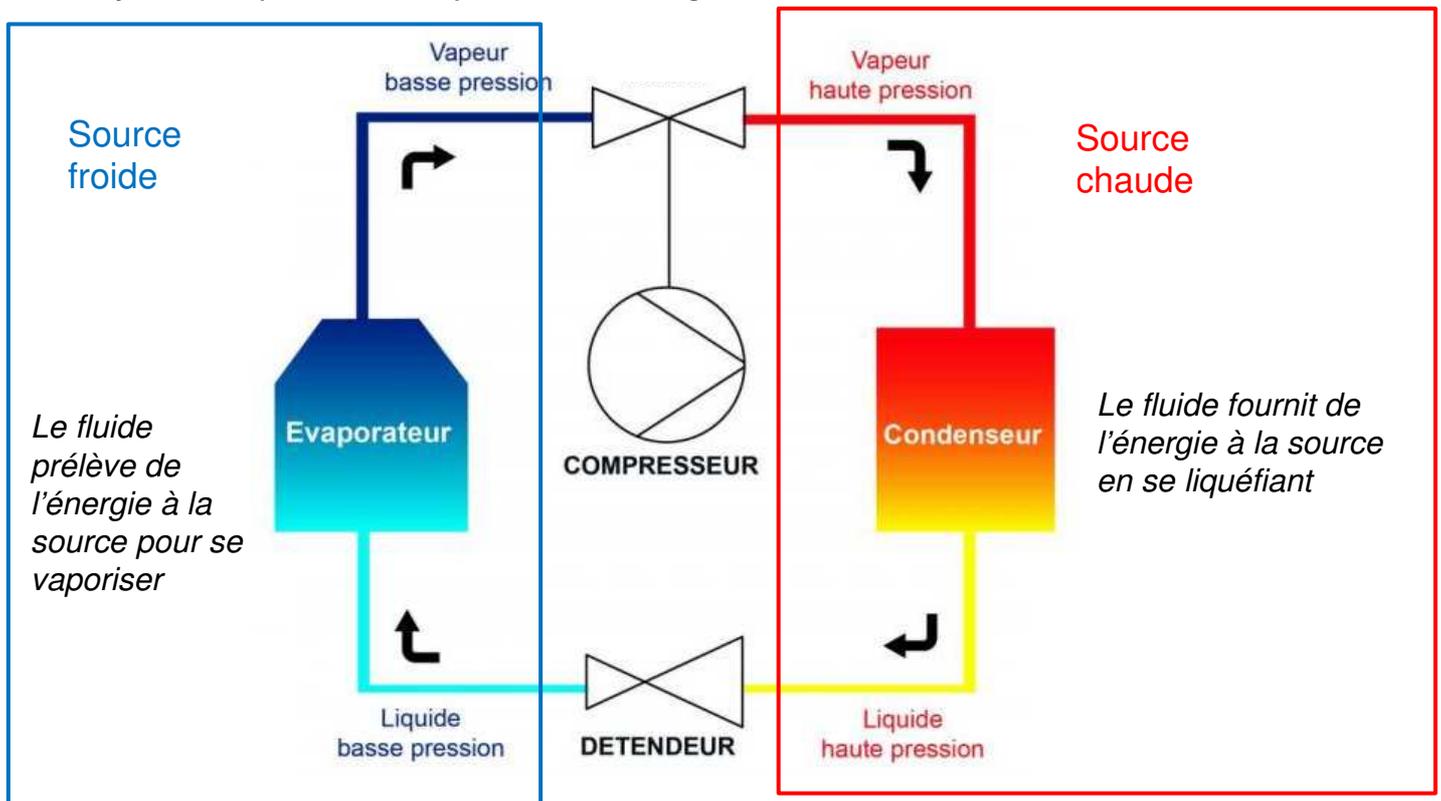
16

4- Cycle thermodynamique pour un récepteur

- Le système est bien fermé, avec un fluide qui circule entre les deux sources de chaleur, propulsé par un moteur. Dans la très grande majorité des cas, ce fluide change d'état au cours du cycle, ce qui s'accompagne d'important transferts thermiques (*ce qui est le but recherché*)
- Le fluide doit échanger de l'énergie thermique avec les sources. Pour cela, il circule dans deux **échangeurs thermiques** successivement. Un échangeur est simplement un long tuyau métallique avec une grande surface d'échange (*transfert par conduction*).
- Pour optimiser les échanges, on a parfois des ventilateurs qui brassent l'air au niveau des échangeurs (*transfert par convection*). Si on passe à côté de l'échangeur extérieur d'une clim en été, on sent un fort courant d'air chaud.
- Pour des installations de petite taille (climatisation de voiture) on peut avoir des cycles sans changement d'état, avec un fluide gazeux.
- A noter, les fluides utilisés sont des hydrocarbures halogénés très polluants. Ils doivent donc être recyclés quand l'appareil est en fin de vie.
- L'eau atmosphérique peut se condenser sur l'échangeur de la source froide, qui est plus froid que l'air ambiant. Ainsi, de la rosée se forme sur l'échangeur intérieur d'une climatisation (*quand la température est inférieure au point de rosée*), il faut un système pour l'évacuer. De même, si l'échangeur extérieur d'une PAC est à moins de 0°C, il se couvre de givre qui est un isolant thermique et gêne les transferts. Il faut alors un système de dégivrage. Idem pour l'échangeur intérieur du frigo ou congélateur, il faut dégivrer régulièrement.

17

Cycle récepteur classique, avec changement d'état du fluide



Réfrigérateur : source froide =

Climatiseur : source froide =

Pompe à chaleur (P.A.C.) : source froide =

, source chaude =

, source chaude =

, source chaude =

18