

# Machines thermiques

Élément imposé : Réfrigérateur, moteur de stirling, radiateur, diagramme de Raveau, moteur de Carnot, moteur Diesel

Animation moteur de stirling

Niveau : L1

Pré-requis :

- 1er et 2nd principe pour les systèmes fermés (L1)
- Notion de réversibilité (L1)
- Changements d'état et diagrammes (P,V) et (T,S) (L1)
- Notion de thermostat (L1)
- Fonctions d'état (L1)
- Diagramme de Clapeyron (L1)
- Transformation isochore, isobare, isotherme (L1)

Objectifs :

- Comprendre le fonctionnement des machines thermiques
- Identifier les échanges entre machine thermique et l'extérieur
- Calculer une efficacité

Biblio :

- Dictionnaire de la physique expérimentale, Tome II, J-M Donnini
- BUP n°864, Mai 2004
- Tec&Doc, BCPST-Véto, physique 1ere année, Grécias
- Dictionnaire physique, R. Taillet

Intro péda :

- Dernier cours du chapitre de thermo permettant de faire applications concrètes
- Choix péda : on s'intéresse plus aux machines receptrices ce qui permet de faire une expérience quantitative sur la pompe à chaleur. Choix de pas parler des moteurs ici
- en TD : plus voir moteur et d'autres cycles en lien avec des digrammes entropique
- TP : pompe à chaleur, moteur de Stirling
- Difficultés : savoir dans quel sens se font les transferts, il faut donc bien définir système et utilisation des schémas de principe permet de mieux les comprendre

## **Introduction :**

Utilisation de la thermo sur choses concrètes = machines thermiques = choses de la vie quotidienne

Historique : Machines thermiques utilisées avant d'être comprises

1769 : 1ere machine à vapeur de James Watt (en vrai il a juste ajouté un compresseur à des pompes utilisés dans des mines)

Compréhension au XIXeme siècle (avec Sadi Carnot) afin de comprendre le fonctionnement et ainsi faire d'autres machines.

*Machine thermique* : dispositif permettant de réaliser une conversion de travail en énergie thermique ou inversement

## **I. L'importance du second principe**

Enoncé historique : S. Carnot (1824) Pour qu'un système décrivant un cycle fournisse du travail il doit nécessairement échanger du transfert thermique avec au moins 2 sources à des T différentes

On va expliquer cela à partir des principes de la thermodynamique.

## A. Pour les machins monothermes

S'il existe une source idéale de chaleur de température  $T_0$  en contact thermique avec le système, le cycle de transfo effectué par la machine est dit « monotherme ».

*Monotherme* : une seule source de chaleur (thermostat)

Slide : Schéma de principe

Rappel : Si  $W > 0$  travail reçu,  $W < 0$  travail fournit

On va appliquer les deux principes de la thermodynamique à la machine sur le cycle. Comme l'état final est égal à l'état initial, les variations de fonction d'état sont nulles. On a donc  $\Delta U = U_f - U_i = 0$  et  $\Delta S = S_f - S_i = 0$

Sur un cycle  $W + Q = \Delta U = 0 \rightarrow W = -Q$

De plus,  $\Delta S = 0 = Q/T + S_c$  avec  $S_c \geq 0$

$\rightarrow W > 0$

On ne peut que recevoir du travail en contact avec une source, ex : radiateur

Un cycle monotherme moteur étant impossible d'après le second principe.

Ne peut pas être moteur : **exp** montrer avec le moteur de Stirling, ne fonctionne pas si on ne chauffe pas.

*Transition* : **exp** : on allume la flamme du moteur de Stirling, on voit qu'il fonctionne. Avec deux sources de chaleur, on peut avoir un moteur ?

## B. Pour les machines dithermes

*Ditherme* : en contact avec 2 thermostats

Schéma de principe sur diapo. Une machine ditherme effectue des transferts thermiques avec deux sources, l'une chaude de température  $T_c$  et l'autre froide de température  $T_f$ .

**exp** : machine motrice (montrer moteur de Stirling fonctionne si on chauffe) ou réceptrice (ex : climatiseur)

Pourquoi ? On applique encore une fois les deux principes de la thermo à la machine. On a de même sur un cycle :  $W = -Q_f - Q_c$

Donc  $W < 0$  si  $-Q_f - Q_c < 0 \rightarrow -Q_f < Q_c$

Slide Diagramme de Raveau

$\Delta S = 0 = S_{crée} + Q_f/T_f + Q_c/T_c \rightarrow Q_c/T_c + Q_f/T_f \leq 0 \rightarrow 4 \text{ zones} :$

1.  $W < 0 ; Q_c > 0 ; Q_f < 0 \rightarrow$  travail fourni avec échange de transfert thermique du chaud vers le froid (transfert thermique naturel)  $\rightarrow$  moteur
2.  $W > 0 ; Q_c > 0 ; Q_f < 0 \rightarrow$  machine reçoit du travail pour réaliser le même transfert thermique que ci-dessus, qui se fait naturellement ! ça a quand même une utilité : on peut accélérer ce transfert thermique naturel.  $\rightarrow$  ventilateur
3.  $W > 0 ; Q_c < 0 ; Q_f < 0 \rightarrow$  radiateur réparti sur deux
4.  $W > 0 ; Q_c < 0 ; Q_f > 0 \rightarrow$  la machine reçoit du travail pour effectuer un transfert thermique « non naturel »

Retour sur l'explication avec animation du moteur de Stirling :

<https://www.econologie.com/forums/nouveaux-transport/animations-du-fonctionnement-d-un-moteur-stirling-t2628.html>

*Transition* : Maintenant que nous avons vu cela nous allons pouvoir nous focaliser sur une machine qui permet de chauffer l'intérieur d'une pièce : la pompe à chaleur.

## II. Récepteur thermique : Etude de la pompe à chaleur

La pompe à chaleur est un dispositif qui prélève de l'énergie thermique à une source naturelle (gratuite) pour augmenter le transfert d'énergie utile vers un bâtiment.

On se trouve dans la partie où  $Q_c < 0$ ,  $Q_f > 0$  et  $W > 0$  du diagramme de Raveau, on chauffe la source chaude et on refroidit la source froide. Dans le cas d'une PAC la source chaude est la maison et la source froide est la source naturelle. On peut utiliser : l'air extérieur, les eaux souterraines ou eau de

lac, rivière etc..

### A. Cycle théorique

Schéma slide ou schéma <https://www.concours-centrale-supelec.fr/CentraleSupélec/2016/TSI/sujets/2014-012.pdf>

1 → 2 : compression adiabatique/réversible

2 → 3 : condensation isobare et isotherme

3 → 4 : détente adiabatique/réversible

4 → 1 : évaporateur isobare et isotherme

Toutes les étapes réversibles :  $S_c = 0$

efficacité :  $e = \text{énergie d'intérêt} / \text{énergie coûteuse} = -Q_c / W$

→  $e = T_c / (T_c - T_f)$  Efficacité de Carnot

### B. Machine réelle

Réaction pas réversible  $S_c > 0$  donc  $e < e_{\text{carnot}}$

Fluide caloporteur : fluide qui subit le cycle thermo avec changement d'état → transfert thermique important

Présentation machine (mettre les points correspondant au schéma en post-it sur la machine)

Expliquer avec courbes PV au tableau

exp : on mesure avec un thermocouple les températures de la source chaude et de la source froide.

On mesure avec le wattmètre la puissance de la pompe. Penser à faire un relevé de point en fonction du temps en préparation.

$T_c$  est linéaire dans le temps, attention si temps trop long, la source froide gel

Calcul de réel

$e_{\text{réel}} = m c_p \Delta T / P_{\text{pompe}} \Delta t$

Comparaison avec  $e_{\text{carnot}}$

Comparaison avec constructeur : lecture du graph fourni en notice (slide)

$Q_c = -370 + 215 = -155$

$W = 370 - 335 = 35$

→  $e_{\text{constructeur}} = e = 4,43$

### Conclusion :

récap des différents cas

Il faut bien faire l'étude des signes des transferts et comprendre qui est la grandeur valorisée et qui est la grandeur coûteuse

Ouverture : fluide en écoulement

### Remarques

- Ça serait bien d'estimer les pertes

### Élément imposé :

#### Le réfrigérateur (BUP et La physique par les objets du quotidien)

Diagrammes Clapeyron et entropique et montrer cycle sur pompe à chaleur

$$\text{efficacité} = \frac{\text{grandeur utile}}{\text{grandeur conso}} = \frac{Q_f}{W} \text{ (réfrigérateur)}$$

Si réversible : Inégalité de Clausius devient égalité →  $Q_c = \frac{-Q_f * T_c}{T_f}$

Avec 1er principe :  $e_{\text{rev}} = \frac{T_f}{T_c + T_f}$

Non réversible :  $Q_f = -Q_{\text{eau froide}} = -m_{\text{eau}} c_{\text{eau}} (T_{\text{final}} - T_{\text{init}})$  et  $W = P * t$  →  $e$

On va regarder grâce à cette formule la différence d'efficacité d'un frigo et d'un congélateur. AN : frigo  $T_f = 5^\circ\text{C}$ , congélateur  $T_f = -18^\circ\text{C}$ ,  $T_c = 20^\circ\text{C}$  ⇒  $e_{\text{ref}} = 18,5$ ,  $e_{\text{cong}} = 6,7$  ⇒ explique pourquoi un

congélateur consomme plus d'électricité qu'un frigo!!! En réalité,  $e = 8$  pour un frigo, 2 pour un congélateur.

### Les moteurs

Principe général :  $W < 0$                        $Q_f < 0$                        $Q_c > 0$

Schéma de principe

Tjs fluide subissant transformations mais pas forcément circuit fermé

Moteur idéal : cycle de Carnot

Transformations réversibles, cycle de Carnot (T,S) : 2 isothermes et 2 adiabatiques réversibles

rendement :  $\eta = \frac{-W}{Q_c}$  avec 1er principe et inégalité de Clausius on trouve  $\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$

Moteur réel : rendement < rendement carnot

### Moteur thermique (Physique Hecht et edf)

Moteur thermique historique : machine à vapeur inventée au 18ème siècle (par James Watt), grande avancée. Mais à partir du 20ème siècle, remplacée par le moteur à explosion notamment, c'est lui qu'on va étudier maintenant : le moteur de nos voitures, c'est une machine thermique!

Schéma avec signes modifiés + diapo diagramme de Raveau. Le moteur fonctionne donc grâce au fluide qui prend de la chaleur à la source chaude pour fournir du travail, et une partie de l'énergie prélevée est cédée à la source froide. C'est pour cette raison que le capot d'une voiture est chaud! Une partie de l'énergie produite par la combustion de l'essence est donc perdue... On va justement regarder quelle proportion est perdue, en évaluant le rendement d'un moteur thermique.

$\eta = -W/Q_c$  compris entre 0 et 1 cette fois. Avec le 1er et 2nd principe, on retrouve le théorème de Carnot :  $\eta_{rev} = 1 - T_f/T_c$ ,  $\eta_{reel} < \eta_{carnot}$

AN pour un moteur à combustion :  $T_c = 2000 \text{ K}$ ,  $T_f = 300 \text{ K} \Rightarrow \eta = 1 - 2000/300 = 85 \%$

En réalité :  $\eta = 40 \%$ , à cause de l'irréversibilité.

Comparaison : Machine à vapeur de Watt : 1% -> c'est pour ça que ce type de moteur a remplacé la machine à vapeur! Mais on a quand même 60 % de l'énergie qui est perdue....

Diapo : explication schéma avec étapes du cycle pour le moteur à explosion

Etape 1 : un mélange de carburant et d'air est aspiré dans le réacteur

Etape 2 : compression avec le piston => la température augmente

Etape 3 : explosion après étincelle créée grâce à la bougie

Etape 4 : l'augmentation de pression due à l'explosion fait baisser le piston

Etape 5 : Echappement des gaz

Donc on peut utiliser les machines thermiques pour les moteurs de voiture entre autre, mais il y a d'autres applications auxquelles on pense moins : ils permettent de produire de l'électricité, dans les centrales thermiques, par différentes méthodes. Les centrales nucléaires sont donc des machines thermiques! Schéma centrale nucléaire, explication fonctionnement. ( $T = 573 \text{ K}$  et  $293 \text{ K}$  et  $P = 80 \text{ bar}$ , et rendement = 40% (Tout en un machines thermiques exercices 25.6)) Centrales thermiques principales sources d'électricité dans le monde, nucléaire en France (80% de l'électricité produite en France), avec thermique pour moduler lors des pics de consommation. La puissance produite par un réacteur nucléaire est très grande, de l'ordre de 1 gigawatt, de quoi alimenter simultanément dix millions d'ampoules de 1 watt. (#la physique des objets du quotidien)