

# Chapitre 22 – Machines thermiques

## Plan du cours

### I Machine thermique

I.1 Machine thermique ditherme

I.2 Diagramme de Clapeyron

### II Moteur ditherme

II.1 Impossibilité d'un moteur thermique monotherme

II.2 Sens réel des échanges d'énergie

II.3 Rendement

### III Récepteur ditherme

III.1 Sens réel des échanges d'énergie

III.2 Efficacité

III.3 Pompe à chaleur

## Ce qu'il faut savoir et savoir faire

- 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.

## Questions de cours

- Donner le sens réel des échanges d'énergie dans un moteur, une pompe à chaleur, un réfrigérateur.
- Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.
- Définir le rendement ou l'efficacité de chaque type de machine en fonction des énergies échangées au cours du cycle et établir la formulation associée au théorème de Carnot.

## Documents

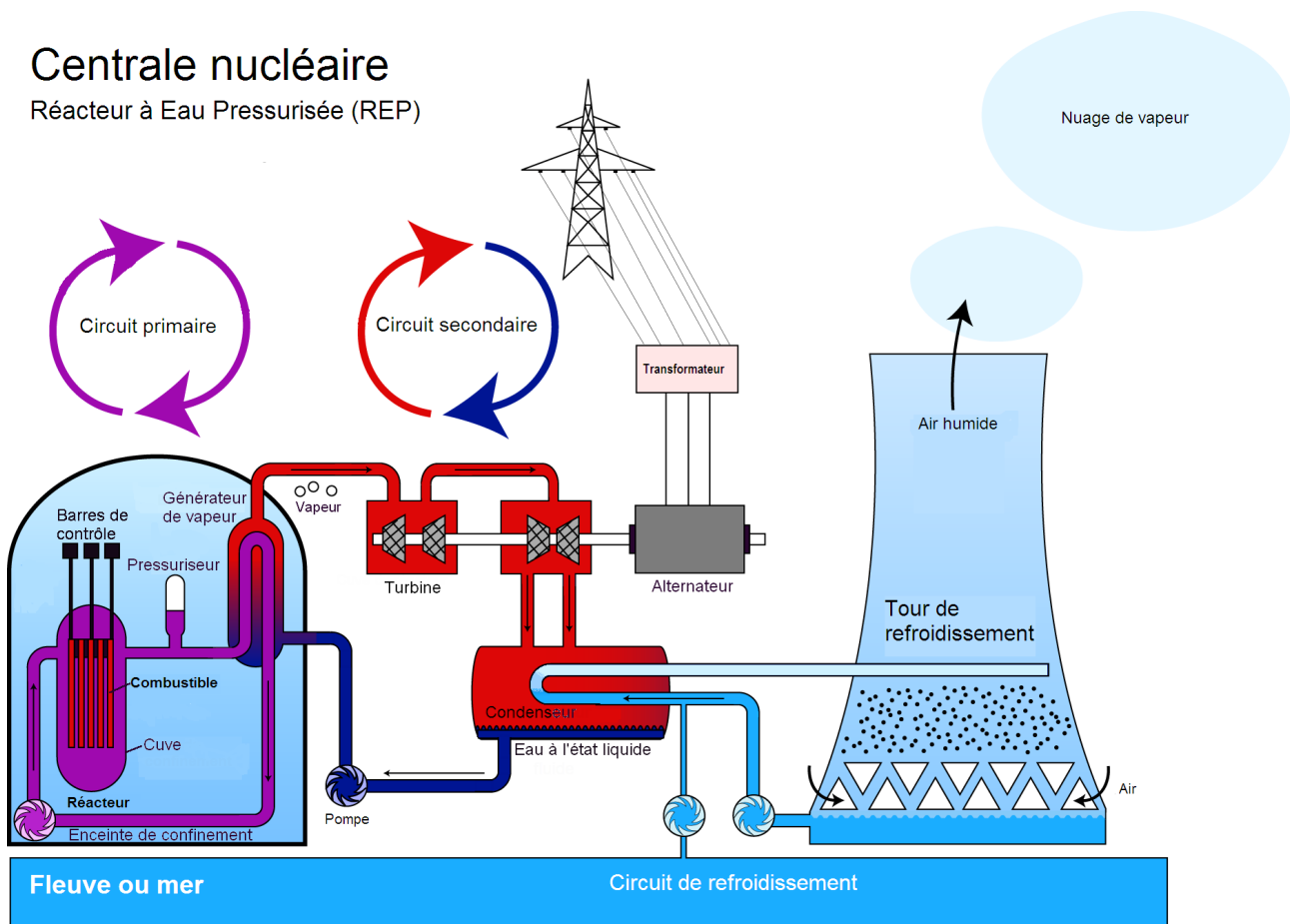
### Document 1 – Réflexions sur la puissance motrice du feu

La thermodynamique est née durant la révolution industrielle, avec la volonté d'exploiter l'énergie libérée par la combustion du charbon pour produire un mouvement. Désirant améliorer l'efficacité des machines à vapeur, Sadi Carnot (1796 – 1832) publia en 1824 un mémoire intitulé [Réflexions sur la puissance motrice du feu](#). Il est l'un des fondateurs de la thermodynamique.

### Document 2 – Schéma de principe d'un réacteur à eau pressurisée

#### Centrale nucléaire

Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



### Document 3 – Moteurs réels

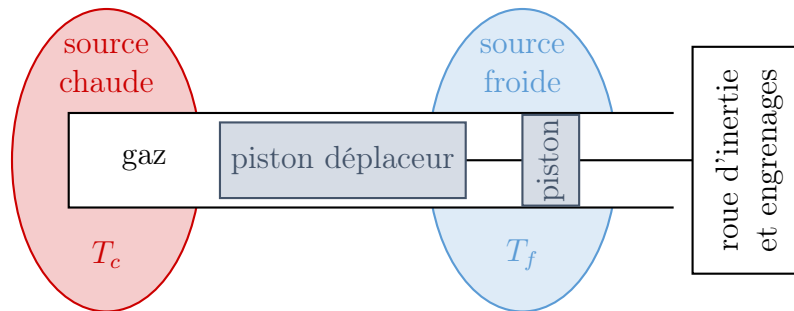
Les moteurs réels fonctionnent sur des cycles **irréversibles** : leur rendement est toujours inférieur au rendement de Carnot :

- pour une centrale nucléaire avec  $T_c \sim 600 \text{ K}$  (le réacteur) et  $T_f \sim 300 \text{ K}$  (une rivière), on a  $\eta_C = 0,5$  mais le rendement réel n'est que de 30 à 40 % ;
- pour un moteur de voiture, avec  $T_c \sim 3000 \text{ K}$  (les gaz en combustion) et  $T_f \sim 300 \text{ K}$  (l'atmosphère), on a  $\eta_C = 0,9$  alors qu'en pratique, leur rendement est de l'ordre de 0,4 dans des conditions optimales. Le rendement des moteurs Diesel (42 %) est légèrement plus élevé que celui des moteurs à essence (36 %). En ville, le régime de fonctionnement de ces moteurs n'est pas optimal et le rendement n'atteint que 15 %.

En comparaison, le rendement des moteurs électriques peut atteindre 98 % !

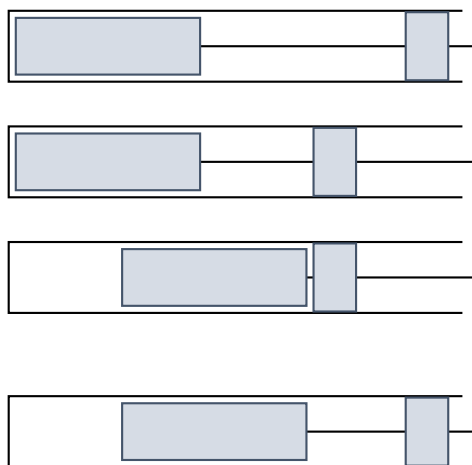
## Document 4 – Moteur de Stirling

À une époque où les fortes pressions nécessaires au fonctionnement des machines à vapeur entraînent régulièrement des accidents, le moteur de Stirling, breveté en 1816, présente l'avantage d'utiliser une source de chaleur extérieure. Cela en fait un moteur polyvalent, qui peut être facilement adapté en fonction des ressources disponibles : il est par exemple utilisé dans certaines centrales solaires pour produire de l'électricité, dans des sous-marins comme propulseur pour son fonctionnement silencieux, ou en cogénération. Utilisé comme récepteur, il peut aussi être exploité comme réfrigérateur afin de liquéfier des gaz.



Son principe général consiste à comprimer un gaz quand il est froid (peu coûteux car sa pression est faible), puis à le chauffer et récupérer le travail en le détendant (sa pression est alors plus importante). On peut décomposer le cycle en quatre étapes, représentées ci-dessous. Son fonctionnement sera détaillé en TD.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_Stirling](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling)



Le gaz, majoritairement dans la zone en contact avec la source froide, est froid ( $\sim T_f$ ) au terme des échanges thermiques. Son volume  $V_{\max}$  est maximal.

Le gaz, toujours en contact avec la source froide, est comprimé jusqu'au volume  $V_{\min} < V_{\max}$  minimal.

Le gaz est déplacé par le piston intérieur vers la source chaude. À la fin des échanges thermiques, le gaz est chaud ( $\sim T_c$ ), mais son volume est toujours minimal.

Le gaz est détendu jusqu'au volume  $V_{\max}$ . La majorité du gaz est toujours en contact avec la source chaude. Il est finalement déplacé à nouveau par le piston intérieur vers la zone froide et le cycle recommence.

## Document 5 – Cogénération

Un moteur thermique rejette une partie de l'énergie reçue de la source chaude sous la forme d'un transfert thermique vers la source froide. Cette énergie est souvent perdue. La **cogénération** consiste à coupler la production d'énergie électrique à partir d'une machine thermique à la production d'eau chaude ou à un procédé industriel nécessitant un apport d'énergie par transfert thermique.

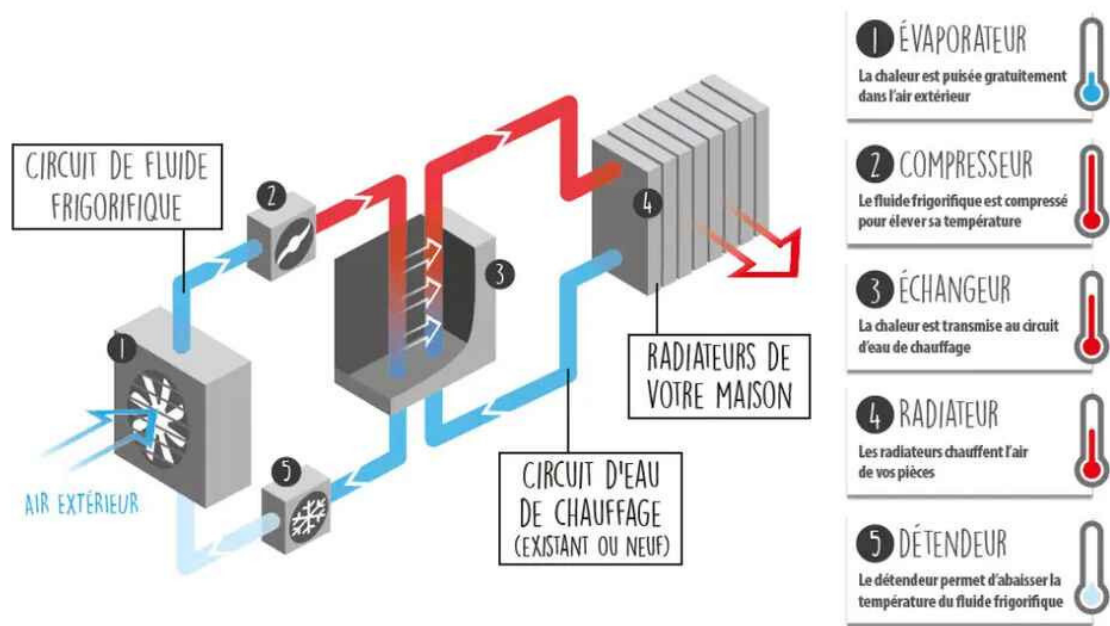
En notant  $Q_c$  le transfert thermique reçu par la machine de la source chaude,  $W_u = -W$  le travail électrique (ou mécanique) exploitable et  $Q_u$  le transfert thermique utile récupéré pour la

production d'eau chaude ou pour un procédé industriel ( $0 < Q_u \leq -Q_f$ ), le rendement global  $\eta_g$  de l'installation devient

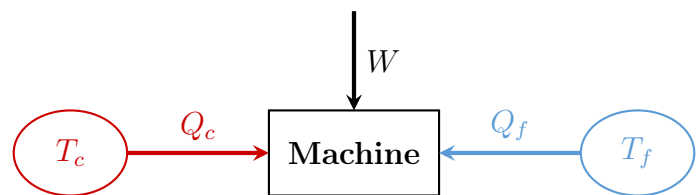
$$\eta_g = \frac{W_u + Q_u}{Q_c} > \frac{W_u}{Q_c}.$$

La cogénération permet donc une meilleure exploitation des ressources primaires, ce qui est un des enjeux actuels majeurs.

Document 6 – Pompe à chaleur



Document 7 – Machines thermiques dithermes



Machine	$W$	$Q_c$	$Q_f$	$\eta$ ou $e$	$\eta_{\text{réel}}$ ou $e_{\text{réel}}$
Moteur					
Réfrigérateur					
Pompe à chaleur					

## Applications

### Application 1 – Machine monotherme

On considère une machine thermique monotherme en contact avec un thermostat à la température  $T_c$ . La machine a un comportement cyclique.

1. Déterminer le signe du transfert thermique  $Q_c$ , puis celui du travail  $W$  reçus par la machine.
2. Conclure : de quel type de machine s'agit-il ?
3. Sur un schéma, représenter le sens réel des échanges d'énergie.

### Application 2 – Moteur 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  $500\text{ J}$  par cycle, pour  $1\,500\text{ J}$  de transfert thermique fourni.

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  $S_c$ .
3. Montrer que la différence entre le travail fourni par la machine de Carnot et la machine réelle est égale à  $T_f S_c$ , pour une dépense identique.

### Application 3 – Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot est l'unique cycle réversible ditherme. Il est composé de quatre transformations réversibles :

- isotherme à la température de la source froide  $T_f$  ;
- compression adiabatique ;
- isotherme à la température de la source chaude  $T_c$  ;
- détente adiabatique.

On considère un moteur ditherme suivant le cycle de Carnot, fonctionnant avec  $n$  moles d'un fluide assimilé à un gaz parfait diatomique.

1. Rappeler les expressions de  $C_v$ ,  $C_p$  et  $\gamma = C_p/C_v$ .
2. Montrer que, pour chaque étape du cycle, la pression suit une loi de la forme  $P(v) = \text{cte} \times v^\alpha$ , en précisant les valeurs de  $\alpha$ .
3. Représenter ce cycle dans le diagramme de Clapeyron.
4. Indiquer le rendement d'un tel moteur.

### Application 4 – Machine frigorifique : sens réel des échanges d'énergie

On considère une machine frigorifique ditherme en contact avec deux sources aux températures  $T_f$  et  $T_c > T_f$ .

1. On utilise les notations habituelles. Justifier que  $Q_f > 0$ , puis montrer que  $Q_c < 0$  et  $W > 0$ .
2. Sur un schéma, représenter le sens réel des échanges d'énergie.

### Application 5 – Machine frigorifique : efficacité

Estimer l'efficacité d'un réfrigérateur, puis celle d'un congélateur.

### Application 6 – Pompe à chaleur

1. Montrer que l'efficacité d'une pompe à chaleur qui fonctionne entre deux sources aux températures  $T_c$  et  $T_f < T_c$  est inférieure à une valeur maximale que l'on exprimera en fonction de  $T_c$  et  $T_f$ . À quelle condition cette valeur est-elle atteinte ?
2. Faire l'application numérique pour  $T_c = 20^\circ\text{C}$  et  $T_f = 5^\circ\text{C}$ .
3. Quel sens physique donner à l'efficacité ?