

Machines thermiques

Plan du cours

1. Généralités	1
1.1. Vocabulaire	1
1.2. Application des principes de la thermodynamique	2
1.3. Cas des machines monothermes	2
1.4. Cas des machines dithermes.....	2
2. Moteur thermique	3
2.1. Principe de Carnot et rendement.....	3
2.2. Exemples de machine/cycle	3
2.3. Piste d'amélioration : la cogénération	5
3. Récepteur thermique	5
3.1. Efficacité	5
3.2. Exemple de cycle récepteur : le frigo.....	6

1. Généralités

1.1. Vocabulaire

Définition : Machine thermique

Une **machine** est un système permettant la conversion ou le transfert d'énergie.

Une **machine thermique** permet de **convertir** un travail en transfert thermique ou inversement.

C'est un système dans lequel un **fluide**, appelé agent thermique ou fluide caloporteur, subit une **transformation cyclique**, ce qui permet une conversion d'énergie.

Définition : Cycle thermodynamique

Un **cycle thermodynamique** est une succession de transformations d'un système qui le ramènent dans son état initial.

Le cycle commence et se finit dans le même état d'équilibre. La **variation sur un cycle des grandeurs d'état est donc nulle** : $\Delta U = 0$, $\Delta H = 0$, $\Delta S = 0$.

Définition : Moteur ou récepteur ?

- Un **moteur thermique** est une machine qui **fournit globalement**, c'est-à-dire sur un cycle complet, **du travail** au milieu extérieur.

$$\text{Moteur thermique} \Leftrightarrow W_{\text{cycle}} < 0$$

Exemples : moteur à combustion interne, machine à vapeur, centrale thermique, réacteur d'avion...

- Un **récepteur thermique** est une machine qui **consomme globalement**, c'est-à-dire sur un cycle complet, **du travail** du milieu extérieur. Il fournira, en échange, de la chaleur.

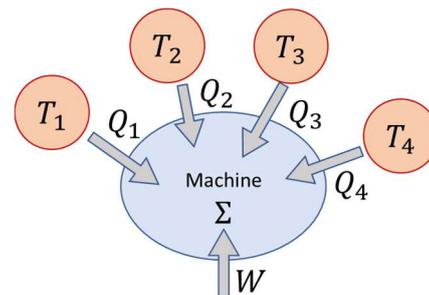
$$\text{Récepteur thermique} \Leftrightarrow W_{\text{cycle}} > 0$$

Exemples : réfrigérateur, climatiseur, pompe à chaleur...

1.2. Application des principes de la thermodynamique

On considère un cycle quelconque, durant lequel un système Σ (la machine) échange avec l'extérieur :

- un travail W ;
- de la chaleur $Q = \sum_i Q_i$ avec diverses sources de chaleur à températures constante (thermostats) T_i .



Propriété : Bilan d'énergie sur un cycle

Sur un cycle thermodynamique : $W + \sum_i Q_i = 0$

Propriété : Bilan d'entropie sur un cycle (inégalité de Clausius)

Sur un cycle thermodynamique, l'ensemble des transferts thermiques reçus par un système vérifie l'**inégalité de Clausius** :

$$\Delta S = 0 \Rightarrow S_{crée} = -S_{reçue} = -\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \Rightarrow \sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

1.3. Cas des machines monothermes

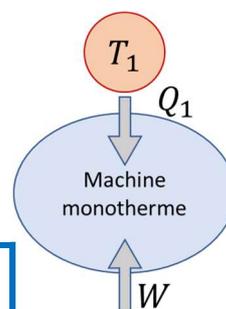
Pour une machine monotherme, c'est-à-dire en contact avec un seul thermostat de température T_1 , l'inégalité de Clausius devient $\frac{Q_1}{T_1} \leq 0 \Rightarrow Q_1 \leq 0$.

En utilisant le premier principe, on obtient $W = -Q_1 \geq 0$: la machine monotherme ne peut pas fournir de travail.

Loi : Énoncé historique du second principe par Kelvin

Un système décrivant un cycle monotherme ne peut que recevoir du travail et fournir du transfert thermique.

Elle ne sert donc pas beaucoup en pratique !



1.4. Cas des machines dithermes

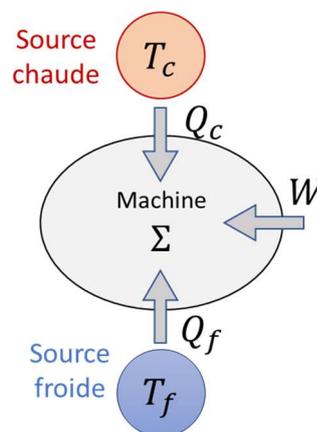
On considère un système fluide subissant une transformation cyclique en contact avec deux sources de chaleur :

- une source froide à température T_f ;
- une source chaude à température $T_c > T_f$.

Propriété : Relations de fonctionnement d'une machine ditherme

Le premier principe donne $W = -Q_c - Q_f$

Le second principe donne l'inégalité de Clausius : $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$



Définition : Diagramme de Raveau

Le diagramme de Raveau représente le transfert thermique Q_c reçu de la source chaude en fonction du transfert thermique Q_f reçu de la source froide.

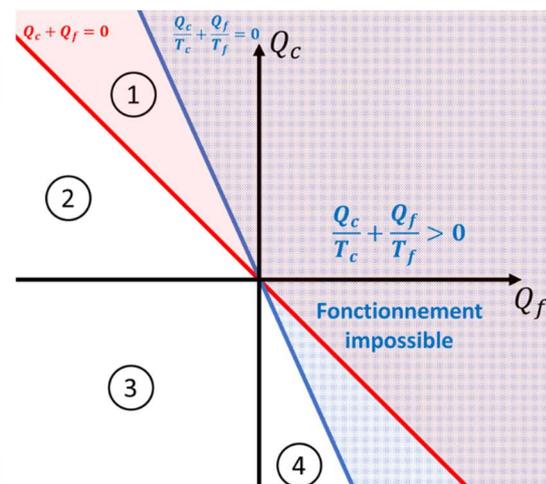
Seules deux zones présentent un véritable intérêt :

Zone 1 : $Q_c > 0, Q_f < 0$ donc $W < 0$.

La machine fonctionne en **moteur thermique**.

Zone 4 : $Q_c < 0, Q_f > 0$ donc $W > 0$.

La machine fonctionne en **récepteur thermique** et permet de transférer de la chaleur de la source froide vers la source chaude.

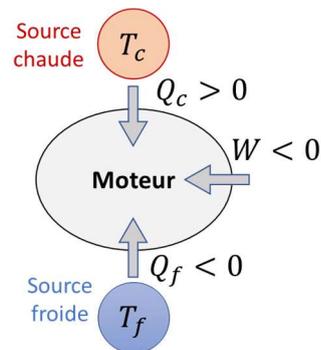


2. Moteur thermique

2.1. Principe de Carnot et rendement

Principe : Principe de Carnot

Pour qu'un système décrive un **cycle moteur**, il doit nécessairement échanger de l'énergie thermique avec au moins 2 sources de température différentes : en **prélevant de l'énergie à la source chaude**, et en **restituant une partie à la source froide**.



Définition : Rendement d'un moteur thermique

On définit un **rendement** (ou une efficacité) comme étant le rapport de la quantité utile sur la quantité qui nous coûte :

$$\eta = \frac{\text{quantité utile}}{\text{quantité coûteuse}}$$

Le rendement d'un moteur thermique est le rapport du travail fourni $-W$, fourni au milieu extérieur, sur le transfert thermique Q_c prélevé à la source chaude :

$$\eta = \frac{-W}{Q_c}$$

Théorème : Théorème de Carnot

Le rendement d'un moteur thermique ditherme est inférieur à une valeur limite, appelée **rendement de Carnot**, fonction de la température des deux sources :

$$\eta \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

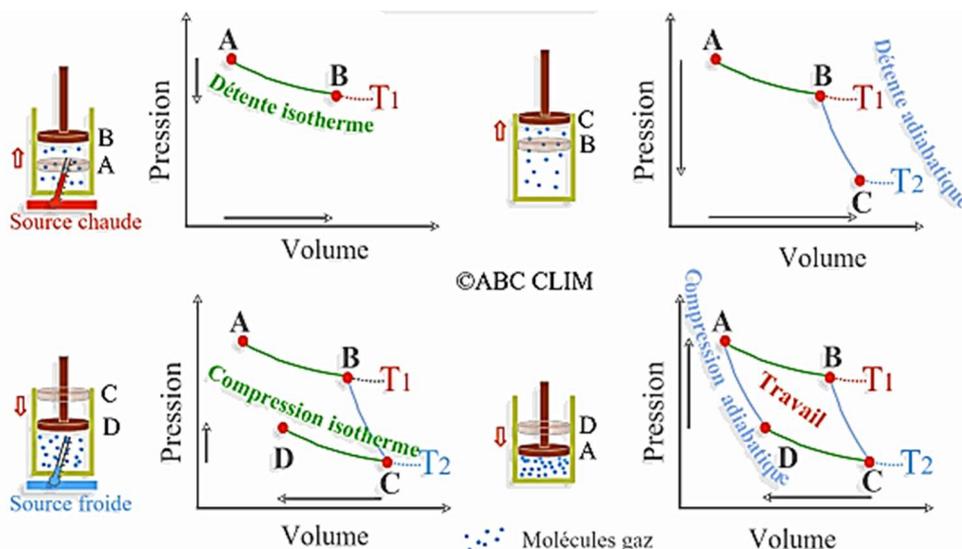
Le **rendement de Carnot** est obtenu pour le cas limite du **cycle moteur réversible**.

2.2. Exemples de machine/cycle

2.2.1. Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot est un **cycle thermodynamique théorique** pour un **moteur ditherme**, constitué de **quatre processus réversibles** (donc quasi-statiques) :

- une détente isotherme réversible $A \rightarrow B$,
- une détente adiabatique réversible (donc isentropique) $B \rightarrow C$,
- une compression isotherme réversible $C \rightarrow D$,
- une compression adiabatique réversible (donc isentropique) $D \rightarrow A$.



Méthode : Analyser un cycle sur le diagramme de Watt/Clapeyron

Rappel : pour une transformation $A \rightarrow B$, le travail sur le chemin

$$s'exprime par : W = \int_{V_A}^{V_B} -P_{ext} \cdot dV$$

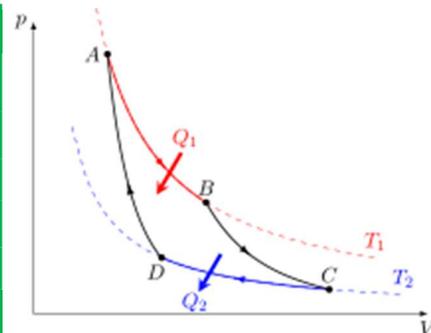
→ $|W_{cycle}| = +\mathcal{A}$ l'aire intérieure au cycle.

- Si le cycle est parcouru dans le sens trigonométrique,

$$W_{cycle} = +\mathcal{A} > 0 : \text{cycle récepteur.}$$

- Si le cycle est parcouru dans le sens horaire,

$$W_{cycle} = -\mathcal{A} < 0 : \text{cycle moteur.}$$



Exemples de diagrammes pour le cycle idéal de Carnot

Méthode : Analyser un cycle sur le diagramme T-S

Pour transformation réversible $A \rightarrow B : Q = \int_{S_A}^{S_B} T \cdot dS$

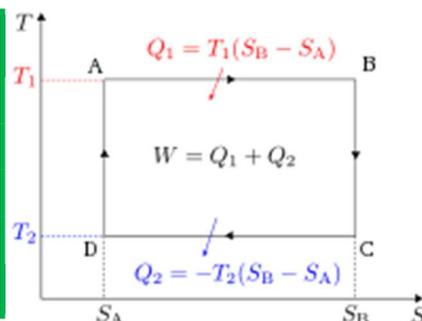
→ $|Q_{cycle}| = +\mathcal{A}$ l'aire intérieure au cycle.

- Si le cycle est parcouru dans le sens trigonométrique, $Q_{cycle} < 0$

$$W_{cycle} = -Q_{cycle} = +\mathcal{A} > 0 : \text{cycle récepteur.}$$

- Si le cycle est parcouru dans le sens horaire, $Q_{cycle} < 0$

$$W_{cycle} = -Q_{cycle} = -\mathcal{A} < 0 : \text{cycle moteur.}$$

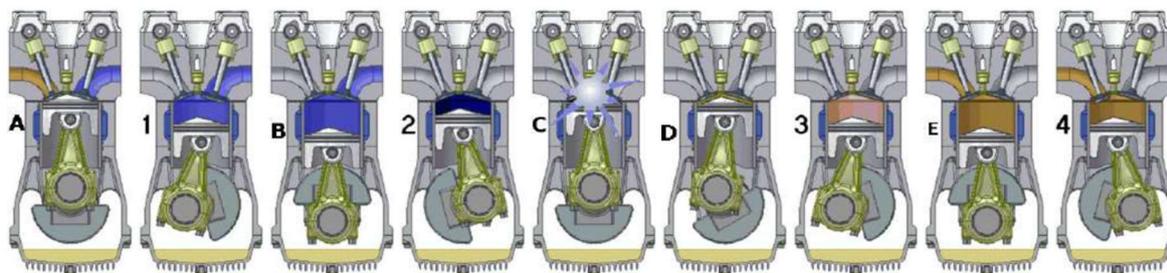


2.2.2. Moteur quatre temps : cycle de Beau de Rochas

L'inconvénient majeur du cycle de Carnot est que le cycle doit être très lent pour se rapprocher de la réversibilité. L'amélioration du rendement se fait au détriment de la puissance. De plus, il est difficile à réaliser techniquement. Une solution, proposée par Beau de Rochas en 1862, est de remplacer les isothermes par 2 isochores :

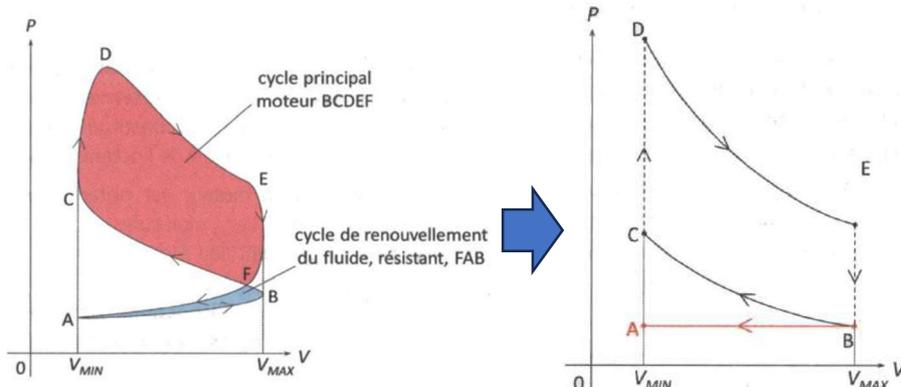
- une combustion interne rapide et isochore ;
- un refroidissement rapide et isochore (par évacuation des gaz).

Une solution technique pour se rapprocher du cycle de Beau de Rochas est le moteur à explosion, dit « 4 temps ».



Hypothèses : On considère que :

- le "cycle" $F \rightarrow A \rightarrow B$ est sans hystérésis : **on ne le comptabilisera pas.**
- le système est le mélange inclus dans le cylindre entre la fermeture de la soupape d'admission et l'ouverture de la soupape d'échappement.
- malgré la combustion (et donc la réaction chimique), la **composition du mélange ne varie pas** : l'essence vaporisée et les gaz résultants de la combustion sont négligeables devant la quantité d'air introduite dans le piston. Bref, la quantité de matière sera considérée comme constante au cours du cycle.
- le mélange est un **gaz parfait**.



Le cycle est alors modélisé par un cycle de Beau de Rochas :

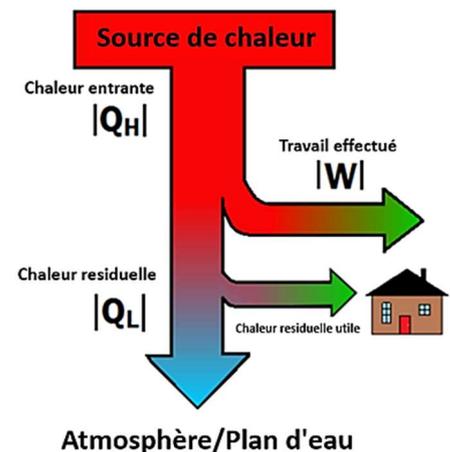
- $B \rightarrow C$: Compression rapide, modélisée par une adiabatique réversible ;
- $C \rightarrow D$: Transformation isochore : l'énergie libérée par la combustion est modélisée par le transfert thermique Q_c reçu de la part d'une source chaude à T_c ;
- $D \rightarrow E$: Détente rapide, modélisée par une adiabatique réversible ;
- $E \rightarrow B$: L'ouverture de la soupape se traduit par une chute brutale, isochore, de la pression.

2.3. Piste d'amélioration : la cogénération

Lors de la production d'électricité à partir de charbon, gaz naturel ou énergie nucléaire, seule une fraction du contenu réel en énergie libéré lors de la combustion est convertie en électricité. Le reste de l'énergie est perdue sous forme de chaleur résiduelle. Dans une **centrale de cogénération**, cette chaleur perdue est récupérée pour d'autres applications telles que le chauffage des locaux ou d'autres processus industriels nécessitant de la chaleur. La **cogénération** est donc un processus efficace pour **récupérer l'énergie qui aurait été perdue autrement**. Le rendement global de l'installation est ainsi augmenté car il devient alors :

$$\eta = \frac{-W - Q_{\text{récupérée}}}{Q_c} > \frac{-W}{Q_c}$$

Où $-Q_{\text{récupérée}}$ est le transfert thermique réutilisé.



<https://energyeducation.ca/fr/Cog%C3%A9n%C3%A9ration>

3. Récepteur thermique

Le récepteur ne réalise pas à proprement parler de conversion d'énergie. Il effectue un **transfert assisté d'énergie**.

3.1. Efficacité

Définition : Efficacité d'un récepteur thermique

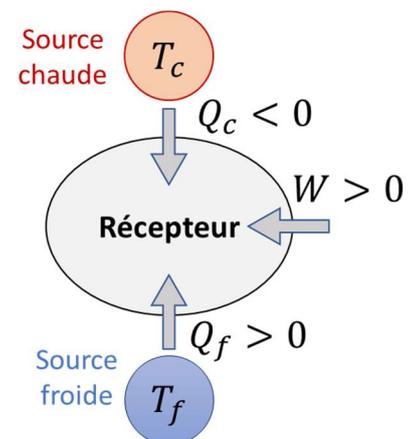
On distingue le fonctionnement en **réfrigérateur** (on veut refroidir la source froide) et le fonctionnement en **pompe à chaleur**.

- L'**efficacité** d'un récepteur thermique fonctionnant en **réfrigérateur** est le rapport du transfert thermique Q_f prélevé à la source froide sur le travail W fourni à la machine :

$$e = \frac{Q_f}{W}$$

- L'**efficacité** d'un récepteur thermique fonctionnant en **pompe à chaleur** est le rapport du transfert thermique $-Q_c$ apporté à la source chaude sur le travail W fourni à la machine :

$$e = \frac{-Q_c}{W}$$



Théorème : Théorème de Carnot

L'efficacité d'un récepteur thermique ditherme est inférieure à une valeur limite, appelée **efficacité de Carnot**, fonction de la température des deux sources :

$$e_{\text{frigo}} \leq \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad \text{et} \quad e_{\text{PAC}} \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

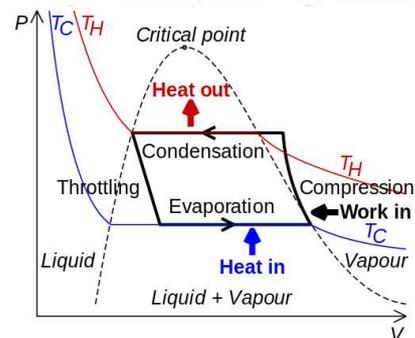
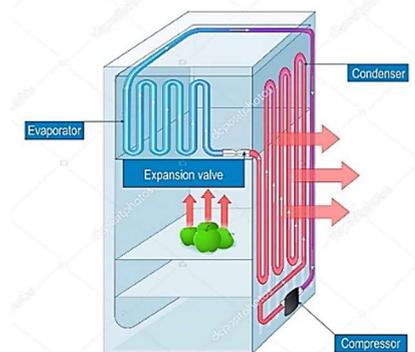
L'efficacité **de Carnot** est obtenue pour le cas limite du **cycle récepteur réversible**.

3.2. Exemple de cycle récepteur : le frigo

Pour maximiser les transferts thermiques dans les machines frigorifiques et les pompes à chaleur, on utilise le fait que les liquides absorbent de la chaleur pour se vaporiser.

Le cycle mis en jeu dans un réfrigérateur est le suivant. Le système considéré est une portion du fluide frigorigène qui circule dans le circuit.

- Le « fluide frigorigène », initialement à l'état gazeux, est comprimé grâce à un compresseur.
- Il circule alors dans le serpentin à l'arrière du frigo où il se liquéfie. Le phénomène de liquéfaction dégage de la chaleur.
- Le liquide passe ensuite dans un détendeur (également appelé valve d'expansion) qui fait diminuer la pression du liquide.
- Dans l'évaporateur, partie du circuit en contact avec la source froide, le liquide se vaporise complètement en absorbant de la chaleur.
- La vapeur ainsi produite retourne au compresseur, et le cycle peut recommencer.



AU PROGRAMME

Notions et contenus	Capacités exigibles	Dans les exercices
Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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. ▪ Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme. 	