

Chapitre 26 : Machines thermiques

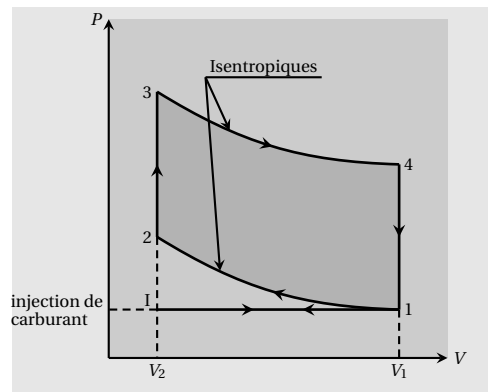
1 Introduction : qu'est-ce qu'une machine thermique ?

1.1 Définition

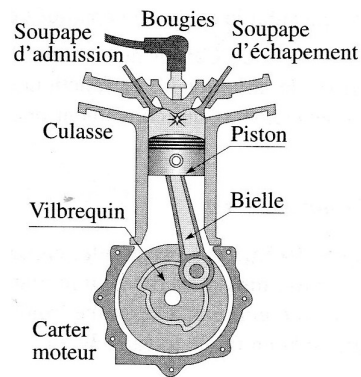
Def : Une machine thermique est un dispositif qui fait subir à un fluide des transformations cycliques dans le but de provoquer des transferts d'énergie, sous forme de travail et/ou de chaleur, entre différentes parties d'un système thermodynamique complexe. Une machine thermique peut servir :

- À produire un travail moteur (moteur à explosion, centrale électrique,...) : on parle de **moteur thermique** (ou machine motrice),
- À produire du froid (réfrigérateur, climatisation,...) : on parle de **récepteur thermique** de type **machine frigorifique**,
- À produire de la chaleur à bas coût énergétique : on parle de récepteur thermique de type **pompe à chaleur**.

1.2 Produire du travail : le moteur à explosion



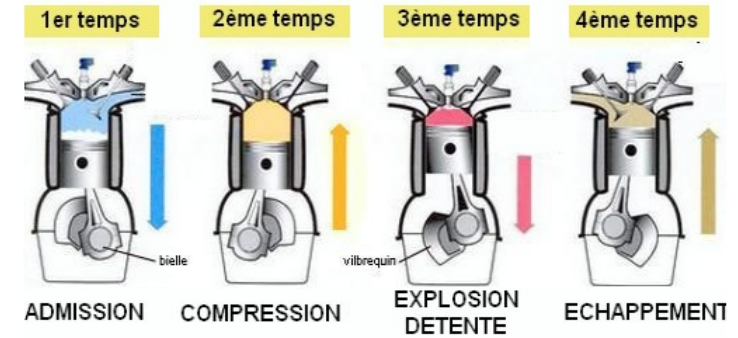
Cycle de Beau de Rochas



Cylindre de moteur à combustion

Le principe d'un moteur à explosion est d'utiliser l'énergie produite par la combustion d'un mélange d'air et de carburant pour mettre en mouvement le piston d'un cylindre. Le mouvement de translation vertical du piston est ensuite converti en mouvement de rotation par l'intermédiaire de l'arbre de transmission. *Ce dispositif convertit de l'énergie chimique en énergie mécanique.*

Il existe une multitude de types de moteur à explosion. On présente un modèle de fonctionnement d'un moteur à quatre temps et plus particulièrement celui d'un cylindre, dans lequel se trouve emprisonné un mélange d'air et de carburant. Les transformations subies par le mélange combustible sont représentées par le cycle de **Beau de Rochas** (voir figure ci-dessus).



1.3 Produire du froid : machine à fluide condensable

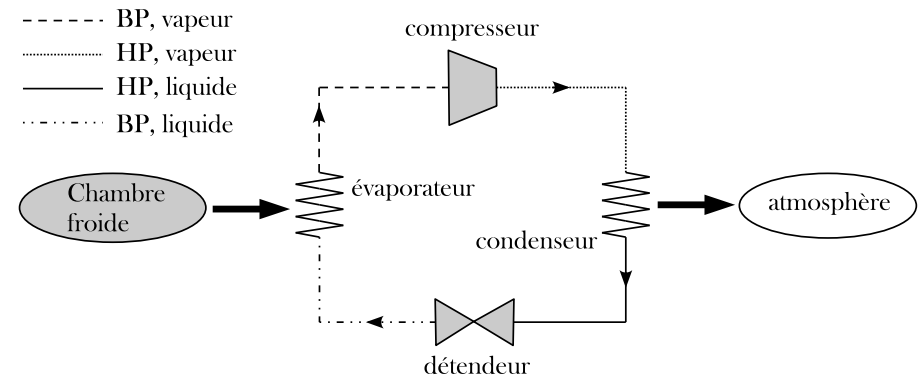
1.3.1 Principe de fonctionnement

Une machine frigorifique est destinée généralement à maintenir une enceinte à une température plus basse que la température de l'atmosphère. Sans machine, une enceinte "froide" se réchauffe spontanément car il est impossible de calorifuger parfaitement les parois qui séparent l'intérieur de l'enceinte de l'atmosphère. Le rôle d'une machine frigorifique est donc de prélever de la chaleur en continu à l'enceinte pour compenser les fuites thermiques et maintenir une température constante.

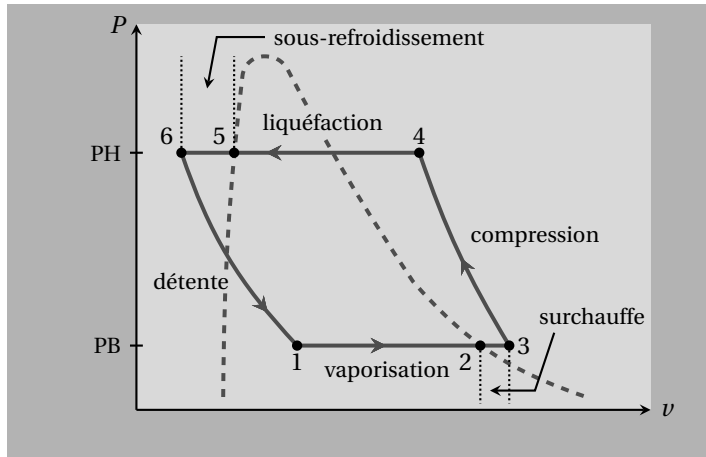
Dans une telle machine, un fluide frigorigène prélève de la chaleur à l'enceinte par évaporation (transformation endothermique) et la libère en se condensant au contact de l'atmosphère (transformation exothermique). En somme, le fluide prélève la chaleur du corps le plus froid et la restitue au corps le plus chaud! Comme nous le verrons plus tard, ceci n'est pas en contradiction avec le second principe.

1.3.2 Architecture de la machine

Pour pouvoir fonctionner, le fluide frigorigène doit pouvoir s'évaporer à basse température et se condenser à plus haute température. Cela est possible en modifiant la pression du fluide à l'aide d'un compresseur et d'un détendeur. Le cycle suivi par le fluide frigorigène est le suivant :



1.3.3 Allure du cycle parcouru par le fluide frigorigène sur un diagramme (P, v)



- 1 → 2 : Le fluide s'évapore au contact de la source froide, à laquelle il prélève de la chaleur,
- 2 → 3 : on surchauffe légèrement la vapeur pour s'assurer qu'il ne reste plus de liquide (mesure de protection pour éviter d'endommager le compresseur),
- 3 → 4 : le fluide subit une compression isentropique qui l'amène à une pression haute (PH),
- 4 → 5 : le fluide se condense au contact de la source chaude et lui cède de la chaleur,
- 5 → 6 : on sous-refroidit légèrement la phase liquide,
- 6 → 1 : le fluide subit une détente de Joule-Kelvin (isenthalpique), ce qui le ramène à une pression basse (PB), dans l'état 1.

1.3.4 Choix du fluide frigorigène

On donne ci-dessous les propriétés thermodynamiques de plusieurs fluides frigorigènes qu'on trouve couramment dans le commerce :

Code	Vaporisation (°C)	Liquéfaction (°C)	Température critique (°C)
R12	-30	48	112
R134a	-26	46	101
R404a	-47	22	72

Les températures de vaporisation et de liquéfaction ne sont qu'indicatives. Elles correspondent aux températures d'équilibre L/V respectivement à $P = 1$ bar et $P = 12$ bar.

Les critères de choix d'un fluide frigorigène sont les suivants :

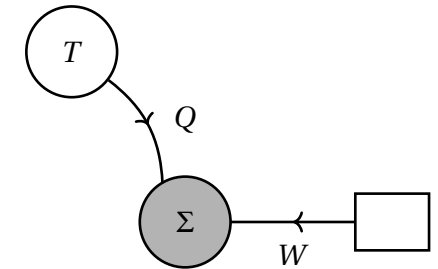
- bonne stabilité chimique et thermique,
- fort pouvoir réfrigérant (c'est-à-dire enthalpies de changement d'état importantes),
- température d'ébullition basse à pression ambiante,
- température critique élevée, pour que la liquéfaction puisse s'effectuer dans le condenseur,
- inflammable et explosible en cas de mélange avec l'air,
- non toxique, non corrosif et de faible impact environnemental.

2 Étude théorique des machines thermiques

2.1 Machine monotherme : second principe selon Kelvin

Le modèle le plus simple de machine thermique serait un fluide (qui constitue le système d'étude Σ) en contact avec une unique source de chaleur (c'est-à-dire un thermostat), de température T .

Peut-on réaliser avec un tel système une machine motrice, c'est-à-dire recevant un travail algébrique $W < 0$ sur un cycle ? La réponse donnée par Kelvin constitue l'une des formulations du second principe de la thermodynamique :

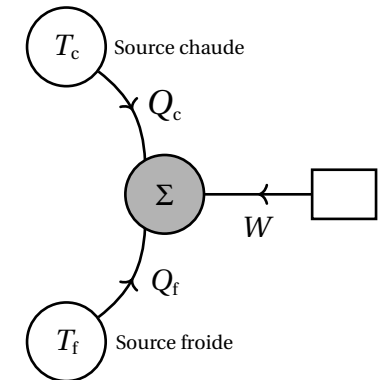


Un système en contact avec une seule source ne peut, au cours d'un cycle, que recevoir du travail et fournir de la chaleur.

2.2 Classification des machines dithermes

2.2.1 Schéma de principe

Une machine ditherme est en contact avec deux sources de températures différentes. Une source "chaude", de température T_c et une source "froide" de température $T_f < T_c$. Sur un cycle, le système reçoit une chaleur Q_c de la source chaude, une chaleur Q_f de la source froide et un travail W du milieu extérieur.



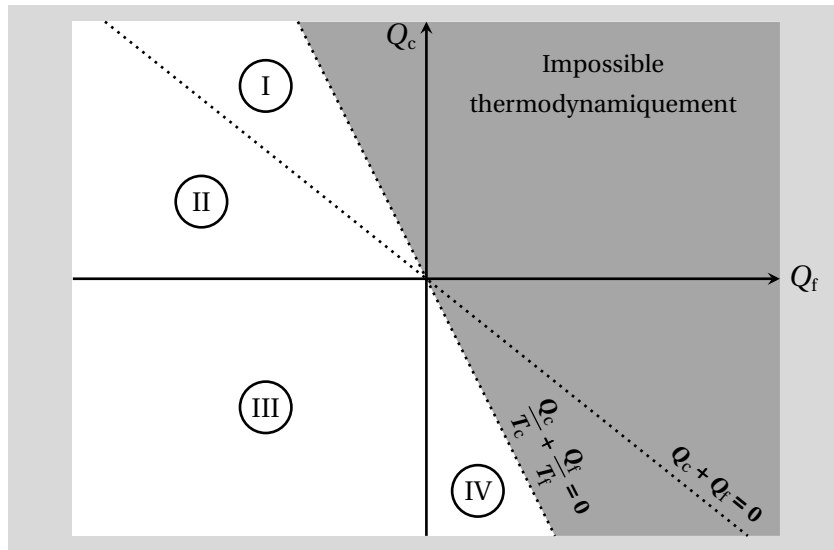
2.2.2 Diagramme de Raveau

Les deux premiers principes de la thermodynamique permettent d'écrire deux relations vérifiées par Q_c , Q_f et W .

$$\begin{cases} W = -Q_c - Q_f & (1) \\ \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 & (2) \end{cases}$$

L'inégalité (2) est une conséquence du deuxième principe, selon lequel le terme de création d'entropie ne peut qu'être positif. Elle est appelée **inégalité de Clausius**.

On peut faire une étude graphique qualitative du comportement des machines thermiques à l'aide d'un diagramme de Raveau (Q_c , Q_f).



	W	Q_c	Q_f
I			
II			
III			
IV			

La zone I correspond à celle des machines motrices, la zone IV à celle des machines frigorifiques et pompes à chaleur. Les deux dernières zones présentent un intérêt limité. Il est possible, avec une machine ditherme, de fournir du travail sur un cycle.

2.3 Machine motrice ditherme

2.3.1 Rendement

Def : On définit le rendement d'un moteur thermique par :

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

On remarque que la grandeur définit le rapport de l'énergie utile sur l'énergie dépensée. Le rendement d'un moteur thermique est nécessairement inférieur à 1.

2.3.2 Théorème de Carnot

Contrairement à un moteur électrique, pour lequel il est possible d'avoir un rendement qui s'approche de 1, le rendement d'un moteur ditherme est limité thermodynamiquement. Le théorème de Carnot permet de donner une borne supérieure au rendement d'un moteur thermique.

Tous les moteurs dithermes réversibles ont un rendement maximal qui ne dépend que des températures des sources.

Le rendement d'un moteur ditherme vérifie l'inégalité :

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

Le rendement vaut $\eta_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$ si le cycle est parcouru de manière **réversible**. Toute source d'irréversibilité fait chuter le rendement.

2.4 Application : machine frigorifique et pompe à chaleur dithermes

Comme pour un moteur thermique, on définit l'efficacité d'une machine frigorifique et d'une pompe à chaleur par le rapport $e = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée}}$.

Dans chacun des deux cas, donner l'expression de l'efficacité, en supposant la machine ditherme, en fonction de Q_c et/ou Q_f et/ou W puis déduire du deuxième principe l'expression de l'efficacité maximale e_{\max} :

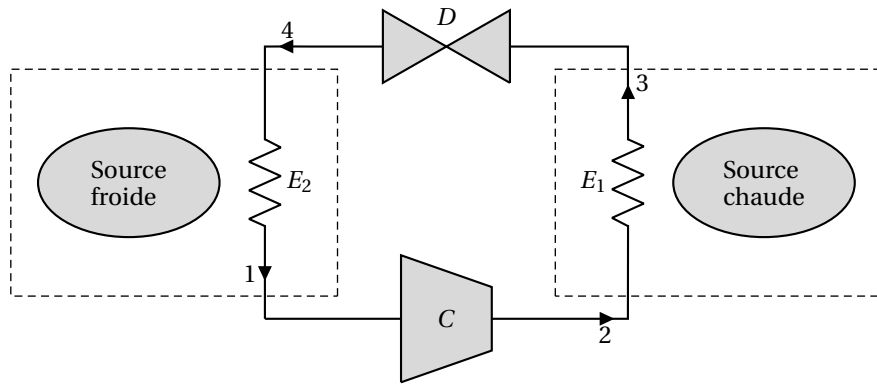
$$\text{Machine frigorifique : } e_{\max} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

$$\text{Pompe à chaleur : } e_{\max} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

3 Applications à l'étude de machines particulières

3.1 Fonctionnement d'un climatiseur de voiture

Un climatiseur de voiture fonctionne avec le réfrigérant R134a auquel on fait suivre le cycle suivant:



- Dans l'état 1, il est sous la forme d'une vapeur sèche, à la température $T_1 = 253 \text{ K}$, à la pression de vapeur saturante $P_1 = P_{\text{sat}}(247) = 1 \text{ bar}$.
- Il passe dans un compresseur C qui le porte à une pression $P_2 = 11 \text{ bar}$. On suppose la compression adiabatique et réversible.
- Il circule ensuite un échangeur thermique E_1 (appelé condenseur) dans lequel il est mis en contact thermique avec la source chaude (air extérieur, à la température $T_c = 298 \text{ K}$). Il est refroidi jusqu'à saturation, totalement liquéfié, puis encore refroidi jusqu'à la température $T_3 = 308 \text{ K}$. Ces transformations sont réalisées à pression constante.
- Le fluide traverse une vanne de détente D qui le ramène à la pression $P_4 = P_1 = 1 \text{ bar}$. La détente est supposée isenthalpique. Dans l'état 4, le fluide se trouve sous la forme d'un mélange diphasique liquide/vapeur.
- Il passe enfin dans un échangeur thermique E_2 (appelé évaporateur) dans lequel il est mis en contact thermique avec la source froide (air intérieur, à la température $T_f = 288 \text{ K}$). Il est vaporisé totalement puis réchauffé jusqu'à la température $T_1 = 253 \text{ K}$. Ces transformations sont isobares. En sortie de cet échangeur, le fluide est revenu dans l'état 1.

Les données numériques utiles à propos du fluide R134a sont fournies dans les tableaux ci-dessous :

$T \text{ (K)}$	$P_{\text{sat}} \text{ (bar)}$	$h \text{ (kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$		$s \text{ (kJ} \cdot \text{K}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{)}$	
		liquide saturant h_L	vapeur saturante h_V	liquide saturant s_L	vapeur saturante s_V
247	1	165,9	382,8	0,8694	1,7471
316	11	260,9	420,7	1,2046	1,71

Point	$P \text{ (bar)}$	$T \text{ (K)}$	État du fluide	$h \text{ (kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$	$s \text{ (kJ} \cdot \text{K}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{)}$
1			Vapeur surchauffée	384,8	1,7623
2		328	Vapeur surchauffée	441,3	
3			Liquide sous-saturé	248,1	1,1689
4			Mélange diphasique		

1. Quel est le titre massique en phase vapeur dans l'état 4 ?
2. Remplir le tableau ci-dessus.
3. Quel est le travail fourni au fluide et la quantité de chaleur prélevée à la source froide sur un cycle, par unité de masse de fluide réfrigérant ? En déduire l'efficacité du climatiseur.
4. Calculer l'efficacité maximale. Est-elle atteinte ? Pourquoi ?
5. Calculer l'entropie créée sur un cycle.

3.2 Rendement d'un moteur à explosion

On prend comme modèle le cycle de Beau de Rochas vu au début du chapitre. En supposant que l'on peut modéliser le système comme une machine ditherme utilisant la chaleur libérée au cours de la transformation $2 \rightarrow 3$ (combustion du mélange) pour produire un travail moteur, montrer que le rendement du moteur à explosion est donné par :

$$\eta = 1 - \alpha^{1-\gamma}$$

Où $\alpha = V_1/V_2$ est le taux de compression du moteur et γ est le coefficient isentropique du mélange combustible, assimilé à un gaz parfait.

AN : $V_1 = 1,8 \text{ L}$, $V_2 = 0,2 \text{ L}$, $\gamma = 1,4$.

3.3 Annexe : tables thermodynamiques

Les tables thermodynamiques (sous forme de tableaux ou de diagrammes d'état) donnent des valeurs de u , h , s pour différentes conditions de température et de pression. Ces valeurs ne sont pas absolues mais relatives à des valeurs de référence qui peuvent être choisies arbitrairement. Comme on l'a vu avec l'énergie potentielle, choisir des valeurs de référence pour certaines fonctions d'état revient à les exprimer à une constante près. Lorsque l'on étudie des transformations thermodynamiques entre deux états d'équilibre, on est amené à calculer des variations des différentes fonctions d'état (ΔU , ΔS , ΔH). Dans ce cas, la constante disparaît par différence et n'intervient pas dans les calculs. Cela justifie que le choix arbitraire de la référence n'a pas d'influence sur l'analyse physique des phénomènes.

Par exemple, pour l'eau, u et s sont conventionnellement choisies nulles **à l'état liquide, au point triple**. L'enthalpie massique h se déduit de u par la relation $h = u + pv$. Il est possible de définir d'autres références (à $T = 0\text{ K}$ par exemple).

Abaque n°2 : Propriétés de l'eau pure aux points de saturation, triées par température.

°C	MPa	kJ kg ⁻¹			kJ kg ⁻¹			kJ K ⁻¹ kg ⁻¹			m ³ kg ⁻¹	
		u_L	u_V	u_{LV}	h_L	h_V	h_{LV}	s_L	s_V	s_{LV}	v_L	v_V
0,01	0,000612	[0]	2 374,9	2 374,9		2 500,9		[0]	9,1555	9,1555	0,001	205,991
5	0,000873	21	2 381,8	2 360,8	21	2 510,1	2 489	0,0763	9,0248	8,9486	0,001	147,011
10	0,001228	42	2 388,6	2 346,6	42	2 519,2	2 477,2	0,1511	8,8998	8,7487	0,001	106,303
15	0,001706	63	2 395,5	2 332,5	63	2 528,3	2 465,4	0,2245	8,7803	8,5558	0,001001	77,875
20	0,002339	83,9	2 402,3	2 318,4	83,9	2 537,4	2 453,5	0,2965	8,666	8,3695	0,001002	57,757
25	0,00317	104,8	2 409,1	2 304,3	104,8	2 546,5	2 441,7	0,3672	8,5566	8,1894	0,001003	43,337
30	0,004247	125,7	2 415,9	2 290,1	125,7	2 555,5	2 429,8	0,4368	8,452	8,0152	0,001004	32,878
35	0,005629	146,6	2 422,6	2 276	146,6	2 564,5	2 417,9	0,5051	8,3517	7,8466	0,001006	25,205
40	0,007385	167,5	2 429,4	2 261,9	167,5	2 573,5	2 406	0,5724	8,2555	7,6831	0,001008	19,515

Table thermodynamique de l'eau pure, la première ligne correspond au point triple. Extrait de "Thermodynamique de l'ingénieur", par Olivier Cleynen

