LYCÉE D'EXCELLENCE
MOHAMMED VI
LEM6 - CASABLANCA

Classes préparatoires aux grandes écoles
MPSI — Physique-chimie
Année 2026-2027

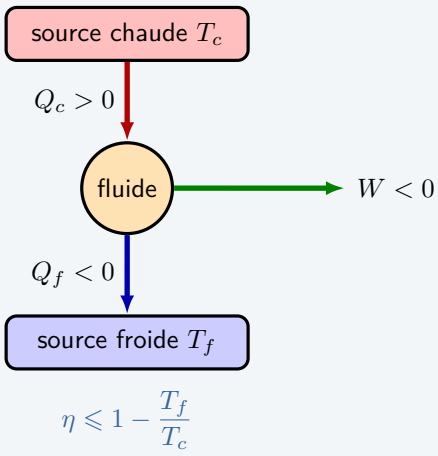
FICHE RÉSUMÉ

T6

THERMODYNAMIQUE

Étude des machines thermiques

Machines dithermes — Rendement et efficacité — Théorème de Carnot — Cycles moteurs et frigorifiques — Systèmes ouverts en écoulement permanent



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

> *C'est à la chaleur que doivent être attribués les grands mouvements qui frappent nos regards sur la terre.*
>
> — Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824)

physionova
physionova.academy

Pr. CHARIFI
professeurcharifi@gmail.com

Simulation associée sur **PhysioNova**
« Cycles thermodynamiques »

T6 — Fiche résumé

L'essentiel en trois phrases

Dans une machine thermique, un fluide décrit des cycles en échangeant du travail W et des transferts thermiques Q_i avec des sources ; sur un cycle, $\Delta U = 0$ et $\Delta S = 0$ donnent $W + \sum Q_i = 0$ et l'inégalité de Clausius $\sum Q_i/T_i \leqslant 0$. Il faut au moins **deux sources** pour faire un moteur, et les performances d'une machine ditherme sont bornées par celles du cycle réversible de **Carnot**, qui ne dépendent que de T_c et T_f. Pour les machines à écoulement, on raisonne par unité de masse avec le premier principe industriel $\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = w_u + q$.

I Les deux principes appliqués à un cycle

Définition — Machine thermique R

Dispositif dans lequel un **fluide** (agent thermique) décrit des **cycles** en échangeant du travail W (pièces mobiles) et des transferts thermiques Q_i avec des **sources** (thermostats) de températures T_i. Convention : W et Q_i sont **reçus par le fluide**. Machines **motrices** (fournissent du travail) ou **réceptrices** (réfrigérateur, pompe à chaleur).

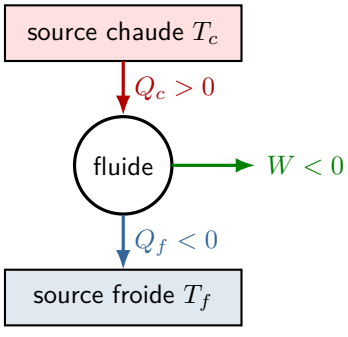
Bilans sur un cycle, énoncé de Kelvin R D

Sur un cycle, $\Delta U = 0$ et $\Delta S = 0$:

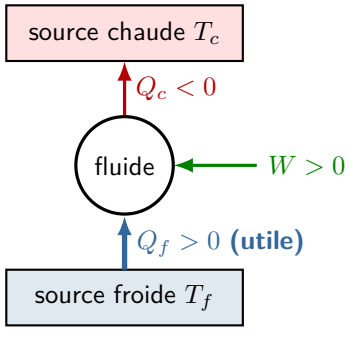
$$W + \sum_i Q_i = 0 \qquad \sum_i \frac{Q_i}{T_i} = -S_{\text{créée}} \leqslant 0 \quad \text{(inégalité de Clausius ; } = 0 \text{ si réversible)}$$

Kelvin : il n'existe pas de moteur cyclique **monotherme**. Avec une seule source : $Q = -T_0 S_{\text{créée}} \leqslant 0$ et $W = -Q \geqslant 0$.
Diagramme de Watt (V, P) : $|W|$ = aire du cycle, sens horaire = moteur. Diagramme (S, T) : $Q = \int T\,\mathrm{d}S$, $|Q_{\text{cycle}}| = |W|$ = aire du cycle, même règle de sens.

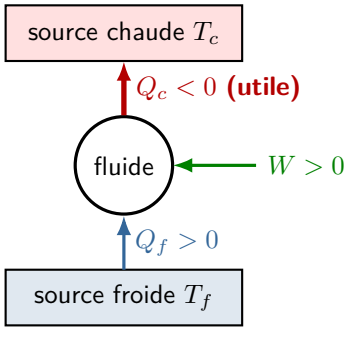
II Machines dithermes



Moteur



Réfrigérateur



Pompe à chaleur

★ À retenir

Machine	Signes	Performance	Maximum (Carnot, réversible)
Moteur	$W<0,\ Q_c>0,\ Q_f<0$	$\eta=\dfrac{-W}{Q_c}=1+\dfrac{Q_f}{Q_c}$	$\eta_C=1-\dfrac{T_f}{T_c}<1$
Réfrigérateur	$W>0,\ Q_f>0,\ Q_c<0$	$e_F=\dfrac{Q_f}{W}$	$e_{F,C}=\dfrac{T_f}{T_c-T_f}$
Pompe à chaleur	$W>0,\ Q_f>0,\ Q_c<0$	$e_P=\dfrac{-Q_c}{W}$	$e_{P,C}=\dfrac{T_c}{T_c-T_f}>1$

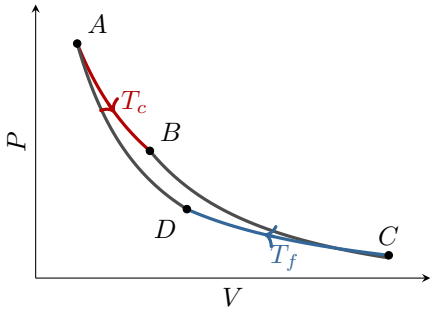
Performance $=\dfrac{\text{énergie utile}}{\text{énergie coûteuse}}$; les efficacités peuvent dépasser 1 ; $e_P=1+e_F$ pour les mêmes échanges.

Théorème de Carnot R D

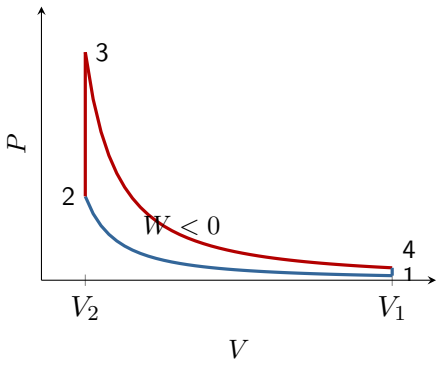
$W+Q_c+Q_f=0$ et $\dfrac{Q_c}{T_c}+\dfrac{Q_f}{T_f}\leqslant 0$. Moteur $(Q_c>0)$: $\dfrac{Q_f}{Q_c}\leqslant -\dfrac{T_f}{T_c}$, d'où $\eta=1+\dfrac{Q_f}{Q_c}\leqslant 1-\dfrac{T_f}{T_c}$. Même démarche pour e_F et e_P. Le maximum, atteint pour un cycle **réversible**, ne dépend que des températures des sources. **Diagramme de Raveau** (Q_f,Q_c) : la droite $W=0$ et la droite de Clausius (pente $-T_c/T_f$) délimitent les zones permises (moteur, récepteurs) ; le moteur monotherme est hors zone.

III Cycles : Carnot et moteurs réels

Carnot (gaz parfait)



Beau de Rochas (moteur à essence)



Cycle de Carnot R D

Deux isothermes (contact avec les sources) et deux adiabatiques réversibles : $A\to B$ détente isotherme à T_c, $Q_c=nRT_c\ln\frac{V_B}{V_A}>0$; $B\to C$ détente adiabatique ; $C\to D$ compression isotherme à T_f, $Q_f=nRT_f\ln\frac{V_D}{V_C}<0$; $D\to A$ compression adiabatique. Laplace donne $\frac{V_B}{V_A}=\frac{V_C}{V_D}$, d'où $\frac{Q_c}{T_c}+\frac{Q_f}{T_f}=0$ et $\eta=\eta_C$. Rectangle dans le diagramme (S,T) ; cycle infiniment lent : **puissance nulle**.

Cycle de Beau de Rochas (Otto) R D

Air = gaz parfait. $1\to 2$: compression adiabatique réversible, rapport volumétrique $a=V_1/V_2$; $2\to 3$: combustion modélisée par un chauffage isochore $(Q_c=C_V(T_3-T_2))$; $3\to 4$: détente adiabatique

réversible ; $4 \to 1$: refroidissement isochore ($Q_f = C_V(T_1 - T_4)$). Avec $T_2 = T_1 a^{\gamma-1}$ et $T_3 = T_4 a^{\gamma-1}$:

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}}$$

Diesel : air seul comprimé ($a \approx 15$ à 20), combustion modélisée par une isobare ; meilleur rendement. **Stirling** : 2 isothermes + 2 isochores (avec régénérateur : $\eta = \eta_C$). **Joule–Brayton** (turbines à gaz) : 2 isobares + 2 adiabatiques, $\eta = 1 - (P_1/P_2)^{(\gamma-1)/\gamma}$.

IV Systèmes ouverts en écoulement permanent

Premier et second principes industriels R D

Fluide traversant une machine en régime permanent, de l'entrée (1) à la sortie (2) ; on applique les principes au système **fermé** (fluide dans la machine + masse $\mathrm{d}m$ qui va entrer), le travail de transvasement $P_1 v_1 - P_2 v_2$ faisant apparaître $h = u + Pv$. Par unité de masse :

$$\Delta h + \Delta\left(\frac{c^2}{2}\right) + g\,\Delta z = w_u + q \qquad\qquad \Delta s = s_2 - s_1 = s_e + s_c,\ s_c \geqslant 0$$

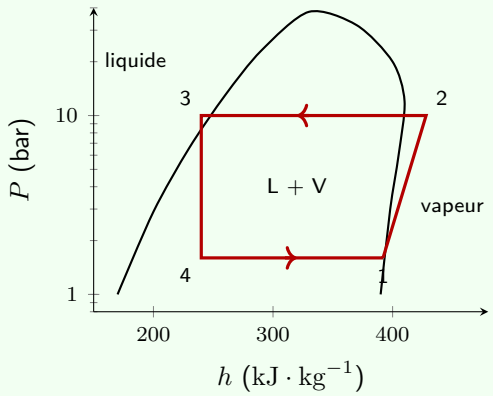
w_u : travail **utile** massique (parties mobiles), q : transfert thermique massique. En puissance, avec le débit massique $D_m = \rho S c$ (conservé) : $D_m\left[\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p\right] = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{\text{th}}$.

Organe (Δe_c, Δe_p négligés)	Hypothèses	Bilan
Compresseur, turbine	adiabatiques	$w_u = \Delta h$
Détendeur (vanne, capillaire)	adiabatique, sans pièce mobile	$\Delta h = 0$ (isenthalpique)
Échangeur (condenseur, évaporateur)	sans pièce mobile	$q = \Delta h$
Tuyère	adiabatique, sans pièce mobile	$\Delta h + \Delta\frac{c^2}{2} = 0$

Réfrigérateur à compression de vapeur, diagramme (h, P) R

- $1 \to 2$: compression adiabatique de la vapeur, $w_u = h_2 - h_1$;
- $2 \to 3$: refroidissement et liquéfaction isobares (**condenseur**, dans la pièce) : $q_c = h_3 - h_2 < 0$;
- $3 \to 4$: détente isenthalpique (**détendeur**) : $h_4 = h_3$;
- $4 \to 1$: vaporisation isobare (**évaporateur**, dans l'enceinte) : $q_f = h_1 - h_4 > 0$.

$$e_F = \frac{q_f}{w_u} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$



Remarque

Cogénération : produire simultanément électricité et chaleur utile en valorisant la chaleur $|Q_f|$ habituellement perdue à la source froide (chauffage urbain, procédés industriels) ; rendement global $80\,\%$ à $90\,\%$.

Ordres de grandeur

Moteur à essence : $\eta \approx 35\,\%$ (théorique $56\,\%$ pour $a = 8$, $\gamma = 1{,}4$) ; Diesel $\approx 45\,\%$; centrales thermiques $35\,\%$ à $60\,\%$ (cycle combiné). Réfrigérateur ($T_f = 255\,\mathrm{K}$, $T_c = 300\,\mathrm{K}$) : $e_{F,C} = 5{,}7$, réel ≈ 2 à 3. Pompe à chaleur ($0\,^\circ\mathrm{C} \to 35\,^\circ\mathrm{C}$) : $e_{P,C} = 8{,}8$, réel 3 à 4.

V Méthodes et pièges

☞ Méthode — Étudier une machine thermique M

1. Identifier le fluide, les sources, les pièces mobiles ; faire le schéma des échanges avec les **signes réels**.
2. Exprimer l'énergie **utile** et l'énergie **coûteuse** pour définir η ou e.
3. Calculer chaque Q_i et W_i étape par étape (premier principe, Laplace, tableau des transformations du GP) ; vérifier $\sum W_i + \sum Q_i = 0$.
4. Comparer à la valeur de Carnot ; pour une machine à écoulement, travailler en grandeurs massiques (h lues sur le diagramme (h, P)).

✗ Attention, erreurs fréquentes

- T_c et T_f en **kelvins** dans les formules de Carnot.
- Réfrigérateur : l'énergie utile est Q_f ; pompe à chaleur : $-Q_c$. Ne pas inverser.
- Dans un moteur réel, Q_c est la somme des seuls transferts **reçus** (> 0), pas la somme algébrique.
- Un rendement supérieur à η_C (ou un $S_{\text{créée}} < 0$) signale une erreur.
- Système ouvert : w_u n'inclut pas le travail de transvasement, déjà contenu dans Δh.

Savoir-faire : je coche quand je sais

- ☐ Je sais écrire les deux principes sur un cycle et démontrer l'énoncé de Kelvin.
- ☐ Je sais faire le schéma des échanges et donner les signes pour les trois machines dithermes.
- ☐ Je sais définir rendement et efficacités et établir le théorème de Carnot.
- ☐ Je sais décrire le cycle de Carnot dans les diagrammes (V, P) et (S, T).
- ☐ Je sais calculer le rendement du cycle de Beau de Rochas.
- ☐ J'applique le premier principe industriel aux organes usuels.
- ☐ Je sais lire un cycle frigorifique sur le diagramme (h, P) et calculer son efficacité.