

CHAPITRE 15 : APPLICATION DU PREMIER PRINCIPE AUX MACHINES THERMIQUES

A SAVOIR :

- Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme
- Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.
- Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.

A SAVOIR FAIRE :

- Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme en précisant le sens des échanges énergétiques.
- Déterminer le transfert thermique des différentes étapes du cycle et en déduire le travail par étape et/ou total sur le cycle

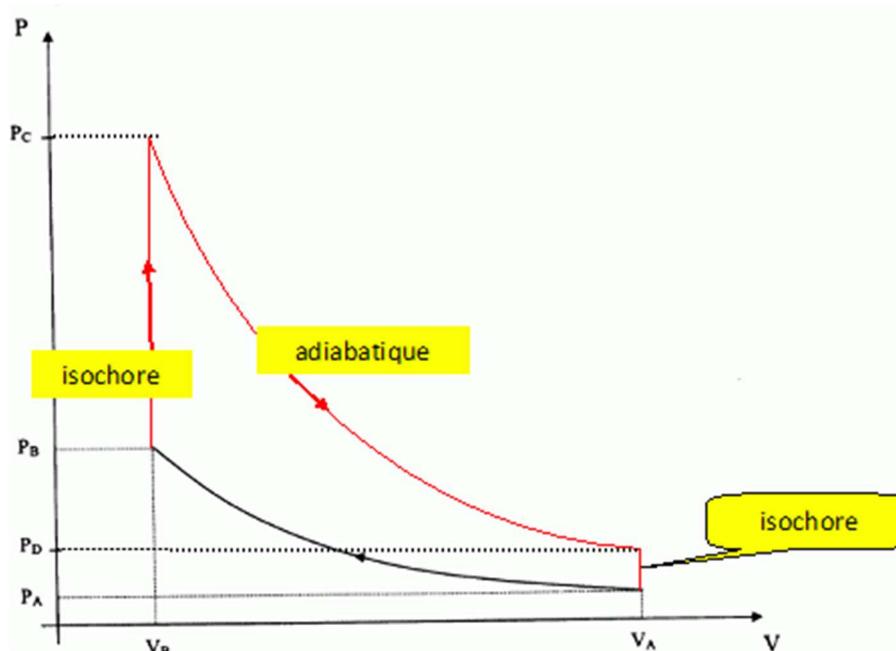
Exemples de cours (à maîtriser parfaitement)

Exemple 15.1 : Utilisation de la loi de Laplace

On donne pour l'air (considéré comme un gaz parfait) la valeur $\gamma = 1,4$.

- a. On réalise une compression adiabatique réversible de $P_A = 1,0$ bar, $V_A = 2,0$ L à $V_B = 0,20$ L. Calculer la pression finale P_B .
- b. On réalise une détente adiabatique réversible de $T_C = 2450$ K, $V_C = 0,66$ L à $V_D = 2,0$ L. Calculer la température finale T_D .
- c. Exemple supplémentaire : On réalise une détente adiabatique réversible à partir de $T_1 = 298$ K, $P_1 = 1$ bar. On arrête lorsque $P_2 = 0,5$ bars : quelle température T_2 a-t-on atteint ?

Exemple 15.2 : Rendement d'un moteur à essence idéal



Pour le modèle, $n = 1$ mol, gaz parfait diatomique avec $\gamma = 1,4$ et $C_P = 29 \text{ J.K}^{-1}$

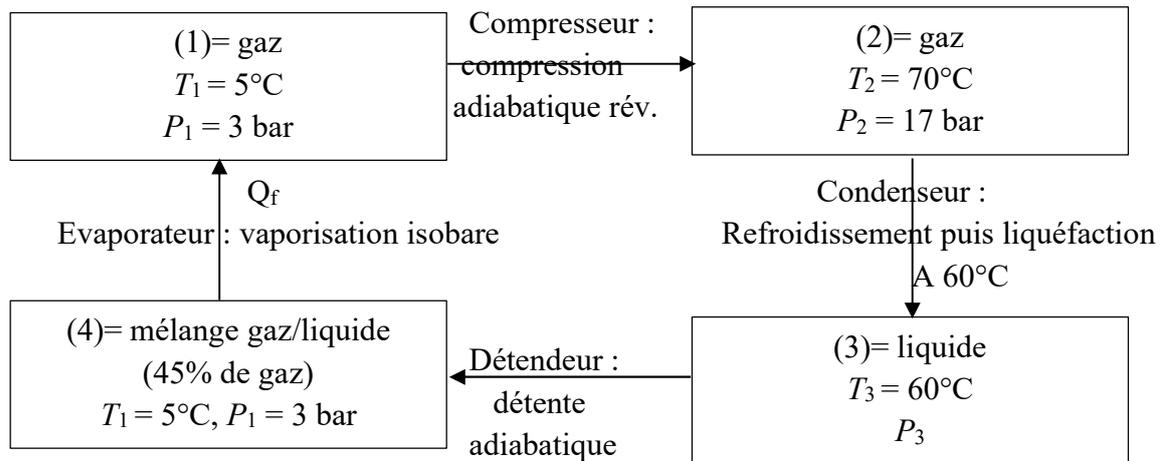
Point A	Point B	Point C	Point D
$P_A = 1,0$ bar	$P_B = 15$ bar	$P_C = 62$ bar	$P_D = 4,1$ bar
$T_A = 300$ K	$T_B = 654$ K	$T_C = 2650$ K	$T_D = 1210$ K
$V_A = 25$ L	$V_B = 3,6$ L	V_C	$V_D = 25$ L

- 1) Calculer la capacité thermique C_v de ce gaz.
- 2) Calculer les transferts thermiques reçus à chaque étape Q_{AB} , Q_{BC} , Q_{CD} et Q_{DA} .
- 3) En déduire le transfert thermique total reçu Q_{cycle}
- 4) En déduire le travail total reçu W_{cycle}
- 5) Calculer le rendement de ce moteur : $\rho = \frac{|W_{cycle}|}{Q_{BC}}$

Exemple 15.3 : Climatisation de l'habitacle d'un véhicule

Pour refroidir l'air intérieur du véhicule, un fluide frigorigène, l'hydrofluorocarbure HFC connu sous le code R134a, effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur du véhicule et le compresseur. Donnée : $\gamma = 1,07$ et $M = 32 \text{ g.mol}^{-1}$ qui donnent pour le gaz $c_p = 4,0 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ et $c_v = 3,7 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

On étudie dans la suite l'évolution de $m = 0,10 \text{ kg}$ fluide au cours d'un cycle en régime permanent.



Données : $\ell_{\text{vap}}(5^\circ\text{C}) = 194,74 \text{ kJ.kg}^{-1}$, $\ell_{\text{vap}}(60^\circ\text{C}) = 139,13 \text{ kJ.kg}^{-1}$

- a) Exprimer et calculer les transferts thermiques associés à chaque étape : Q_{41} , Q_{12} , Q_{23} et Q_{34} . Attention lors de l'étape $2 \rightarrow 3$, il y a 2 transformations donc 2 termes dans l'expression.
- b) Calculer le travail total W fourni par l'extérieur au système.
- c) En déduire la valeur de l'efficacité $e = \frac{Q_f}{W}$ avec $Q_f = Q_{41}$

Exemple 15.4 : Transferts énergétiques dans le cas concret d'une centrale nucléaire

<https://www.dailymotion.com/video/xkgjcl>

Définir :

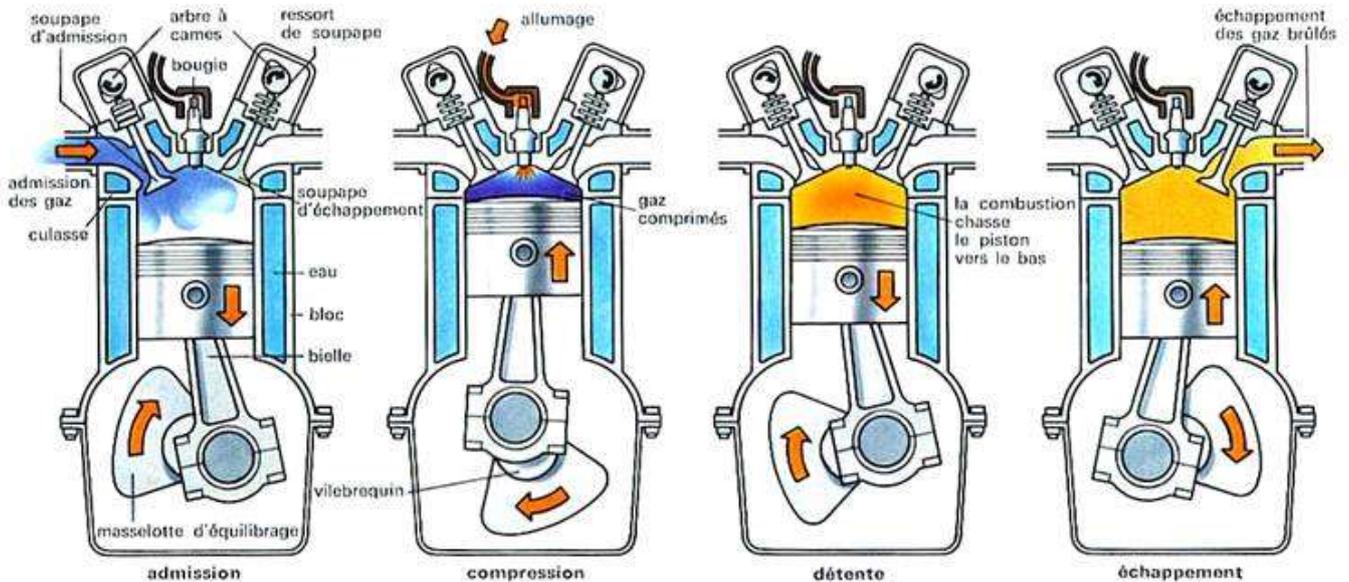
- le système thermodynamique qui fournit le travail W à l'extérieur de la centrale
- la source chaude :
- la source froide :
- les signes de W , Q_C et Q_F :

1. Qu'est-ce qu'une machine thermique ? Exemple de moteur à combustion interne

Machine thermique : Dispositif destiné à réaliser une conversion entre du travail et de la chaleur.

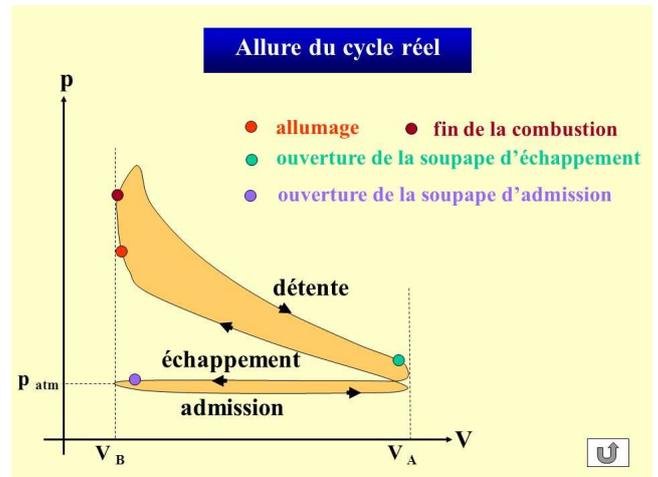
a) Principe de fonctionnement du moteur 4 temps

<http://subaru.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/moteur4t.html>



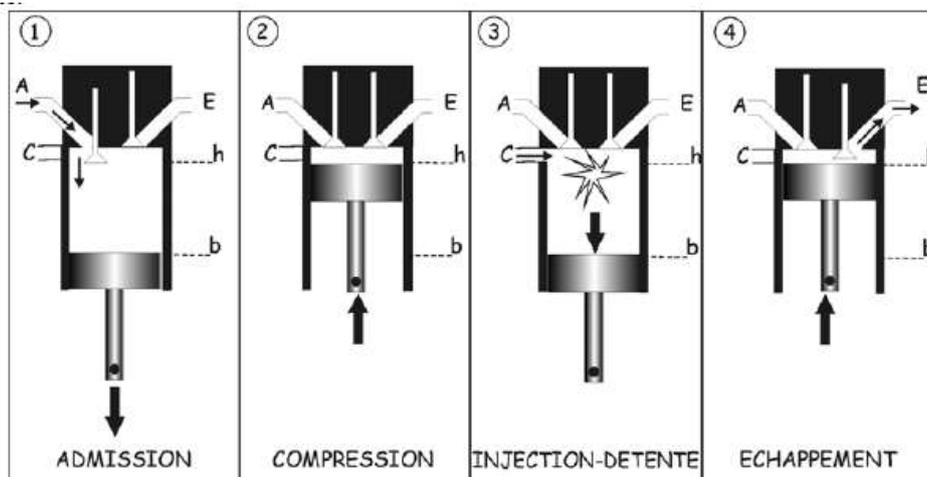
Système thermodynamique étudié mélange air-carburant admis dans la chambre de combustion

L'ensemble des transformations doit être cyclique : on revient à l'état initial à la fin de la transformation \Rightarrow dans le diagramme (P,V) l'ensemble des transformations constitue une courbe fermée.

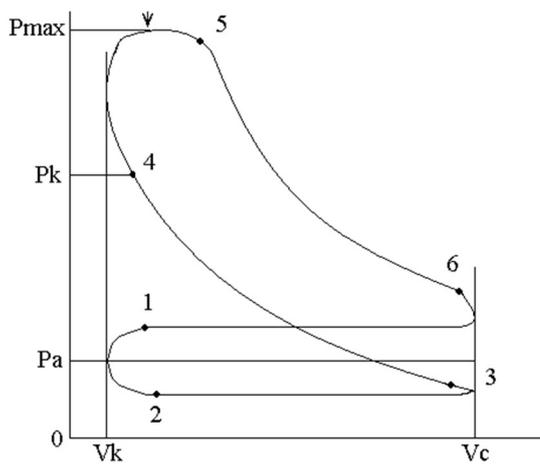


b) Cycle Diesel

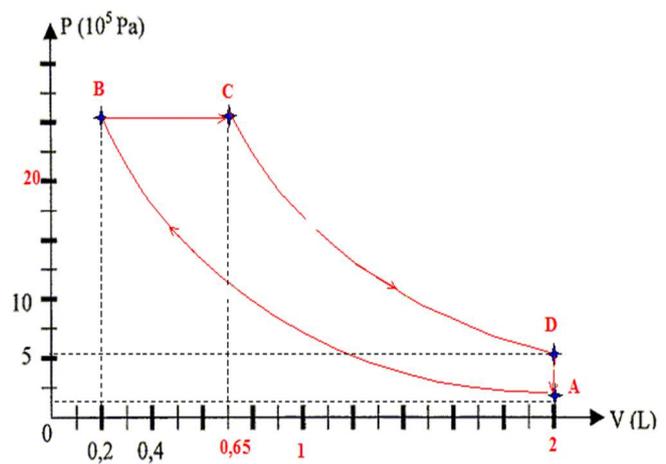
A la différence du moteur précédent, l'injection de carburant se fait plus tard dans le cycle, ce qui est associé à un autoallumage.



Cycle réel pour un moteur Diesel:



Cycle modélisé (hors admission et échappement) :



• Type de cycle :

Grâce à la représentation des transformations dans le diagramme P(V) :

$$W_{AB} > 0 \quad W_{BC} < 0 \quad W_{CD} < 0 \quad W_{DA} = 0$$

Au total (partie BD à pression plus importante que la partie AB), on a $W_{tot} < 0$

Globalement le système fournit du travail à l'extérieur : c'est un cycle moteur

Remarque : Si le système reçoit du travail de l'extérieur, on a un cycle récepteur.

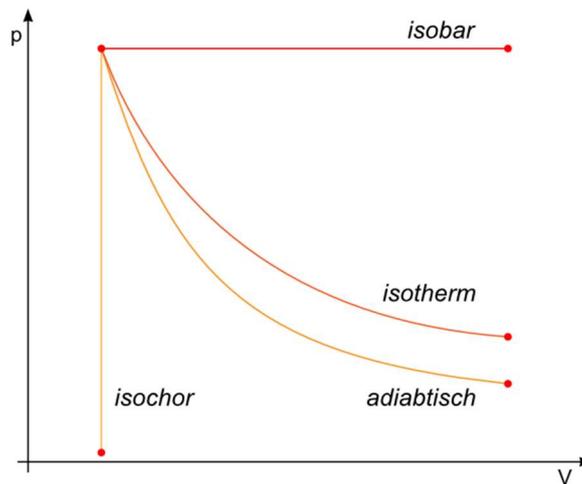
• Descriptions du cycle modèle :

Les transformations $A \rightarrow B$ et $C \rightarrow D$ sont supposés adiabatiques car extrêmement rapides.

Pour l'étape $B \rightarrow C$, la pression reste constante : c'est une détente isobare

Pour l'étape $D \rightarrow A$, le volume reste constant : c'est un refroidissement isochore.

• Rappel et complément : Allure des transformations dans un diagramme P(V) pour un gaz parfait:



- Isobare : $P = \text{cste}$
- Isochore : $V = \text{cste}$
- Isotherme : $T = \text{cste}$

Pour un GP, cela implique :

$$PV = \text{cste}$$

($P = \text{cste}/V$: hyperbole comme $f : x \rightarrow 1/x$)

• Comment traiter le cas d'une transformation adiabatique ?

A retenir : Pour une transformation adiabatique et réversible (transformation qui pourrait se faire exactement dans le sens inverse) d'un gaz parfait:

- On a la loi de Laplace : $PV^\gamma = \text{cste}$
- L'allure de la courbe correspondante dans le diagramme P(V) est « quasiment une branche d'hyperbole », mais de pente plus importante qu'une isotherme.

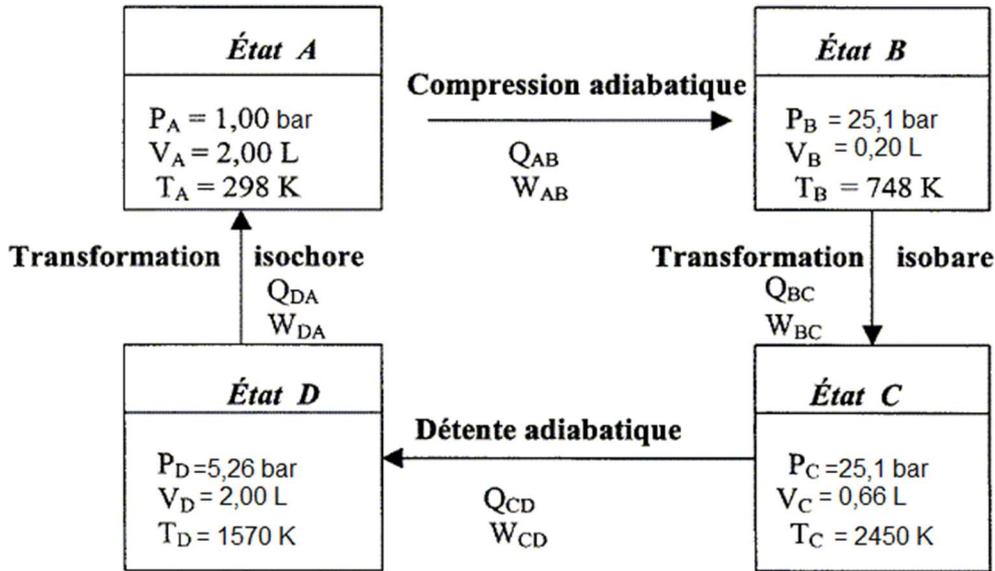
Souvent on se sert de la loi de Laplace pour relier les pressions et volumes initiaux et finaux : $P_i.V_i^\gamma = P_f.V_f^\gamma$

Exemple 15.1

c) Echanges énergétiques lors du cycle : exemple résolu du cycle diesel modèle

Pour résumer, on peut distinguer les 4 transformations suivantes pour le système gazeux considéré comme un gaz parfait diatomique. $n = 81 \text{ mmol}$, $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

$$C_V = \frac{5}{2}nR = 1,68 \text{ J.K}^{-1} \text{ et } C_P = \frac{7}{2}nR = 2,36 \text{ J.K}^{-1}$$



1) Calculs des grandeurs énergétiques :

A → B	adiabatique	$\Delta U_{AB} = C_V.(T_B - T_A)$	$Q_{AB} = 0$	$W_{AB} = \Delta U_{AB}$
B → C	isobare	$\Delta U_{BC} = C_V.(T_C - T_B)$	$Q_{BC} = C_P.(T_C - T_B)$	$W_{BC} = -P_B(V_C - V_B)$
C → D	adiabatique	$\Delta U_{CD} = C_V.(T_D - T_C)$	$Q_{CD} = 0$	$W_{CD} = \Delta U_{CD}$
D → A	isochore	$\Delta U_{DA} = C_V.(T_A - T_D)$	$Q_{DA} = C_V.(T_A - T_D)$	$W_{DA} = 0$

Rappels importants pour le calcul des transferts thermiques :

- Pour une transformation adiabatique : $Q = 0$
- Pour une transformation isobare (P_{cste}) : $Q_P = \Delta H = C_P.(T_f - T_i)$
- Pour une transformation isochore (V_{cste}) : $Q_V = \Delta U = C_V.(T_f - T_i)$
- Pour une transformation isotherme (T_{cste}) d'un GP : $Q = -W = \int_{V_1}^{V_2} PdV$ (car $\Delta U = 0$)

Valeurs numériques :

A → B	adiabatique	$\Delta U_{AB} = 757 \text{ J}$	$Q_{AB} = 0$	$W_{AB} = 757 \text{ J}$
B → C	isobare	$\Delta U_{BC} = 2864 \text{ J}$	$Q_{BC} = 4010 \text{ J}$	$W_{BC} = -1154 \text{ J}$
C → D	adiabatique	$\Delta U_{CD} = -1481 \text{ J}$	$Q_{CD} = 0$	$W_{CD} = -1481 \text{ J}$
D → A	isochore	$\Delta U_{DA} = -2141 \text{ J}$	$Q_{DA} = -2141 \text{ J}$	$W_{DA} = 0$

2) Calcul du travail fourni par le moteur Diesel :

Sur tout un cycle :

$$\Delta U_{\text{cycle}} = 0 \text{ car } C_V(T_A - T_A) = 0$$

$$W_{\text{cycle}} = -1869 \text{ J}$$

$$Q_{\text{cycle}} = 1869 \text{ J}$$

Ce résultat n'est pas étonnant car $\Delta U_{\text{cycle}} = W_{\text{cycle}} + Q_{\text{cycle}} = 0$

Remarque : Lorsque le cycle comporte des adiabatiques, il est plus aisé de procéder ainsi pour obtenir W_{cycle} plutôt que calculer la somme des travaux de toutes les étapes.

3) Calcul du rendement :

Pour un moteur, la grandeur d'intérêt est le travail fourni (= l'opposé du travail total reçu par le système).
La grandeur coûteuse est le transfert thermique reçu lors de la combustion.

Calculer le rendement $\rho = \frac{\text{grandeur utile}}{\text{grandeur coûteuse}}$

$$\text{Ici } \rho = \frac{|W_{\text{cycle}}|}{Q_{BC}} = \frac{1869}{4010} = 47\%$$

Entraînement complet : **Exemple 15.2**

d) Cas d'un cycle avec changement d'état

On procède de même mais pour le calcul des transferts thermiques, on utilise $Q = m \cdot \ell_{\text{changement d'état}}$

Exemple 15.3

Remarque : Pour l'instant on ne sait pas représenter le changement d'état dans le diagramme P(V) : chapitre 16.

2. Comment se font les transferts thermiques dans une machine thermique ?

Machine thermique ditherme : Le système de la machine est en contact avec deux thermostats appelés « source froide » et « source chaude ».

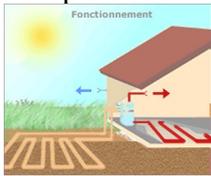
On peut donc distinguer 3 transferts énergétiques vers le système : le travail W , le transfert thermique de la source froide Q_F et le transfert thermique de la source chaude Q_C :

Premier principe de la thermodynamique pour une machine cyclique : Sur tout un cycle, le 1^{er} principe devient :

$$0 = W + Q_F + Q_C$$

Ainsi le système ne peut pas recevoir 3 transferts positifs :

- soit $W < 0$: le système « libère » de l'énergie sous forme de travail (mouvement) : on a un **moteur**
- soit $W > 0$: le système reçoit du travail pour réaliser des transferts thermiques de manière inhabituelle : on a un **récepteur**. (Q_C est négatif, le cas $Q_F < 0$ est inutile car spontané)

Type de machine thermique ditherme	Système étudié	Sources	Sens réel des transferts énergétiques	Signe des transferts énergétiques reçus	Grandeurs d'intérêt	Rendement ou efficacité :
Moteur thermique à combustion interne 	Air admis dans la chambre de combustion	« Chaude » : Energie de combustion « Froide » : système de refroidissement	Source chaude ↓ Système → W ↓ Source froide	$W < 0$ $Q_C > 0$ $Q_F < 0$	Grandeur utile = Travail total <u>fourni</u> Grandeur coûteuse = transfert thermique de combustion	Rendement $\rho = \frac{\text{grandeur utile}}{\text{grandeur coûteuse}} = \frac{ W }{Q_C}$
Réfrigérateur 	Fluide frigorigène	« Chaude » : air de la pièce « Froide » : air intérieur du réfrigérateur	Source chaude ↑ Système ← W ↑ Source froide	$W > 0$ $Q_C < 0$ $Q_F > 0$	Grandeur utile = transfert thermique froid Grandeur coûteuse = travail	Efficacité $e = \frac{\text{grandeur utile}}{\text{grandeur coûteuse}} = \frac{Q_f}{W}$
Pompe à chaleur 	Fluide frigorigène	« Chaude » : Intérieur du domicile « Froide » : sol ou air extérieur	Source chaude ↑ Système ← W ↑ Source froide	$W > 0$ $Q_C < 0$ $Q_F > 0$	Grandeur utile = transfert thermique chaud Grandeur coûteuse = travail	Efficacité $e = \frac{\text{grandeur utile}}{\text{grandeur coûteuse}} = \frac{ Q_c }{W}$

Quelques ordres de grandeurs de rendement de machines réelles :

Machine	Centrale nucléaire	Moteur à essence	Moteur Diesel	Machine	Pompe à chaleur air-eau	Congélateur	Réfrigérateur
Rendement	30-40%	35%	45%	Efficacité	3-5	2	8

Cas concret : **Exemple 15.4**

I. Définition d'une machine thermique

- Une machine thermique est un dispositif thermodynamique permettant la conversion de travail en transfert thermique ou de transfert thermique en travail.
- Une machine thermique ditherme est en contact avec 2 thermostats appelés « source chaude » à T_C et « source froide » à T_F .

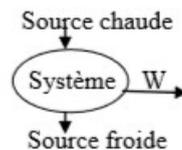
II. Réalisation pratique d'une machine thermique

- Une machine thermique utilise un agent thermique : gaz, liquide ou corps pur sous plusieurs phases.
- A l'issue d'un cycle, l'agent thermique doit être renouvelé pour le moteur à explosion, ou bien il peut être conservé, comme pour le réfrigérateur.

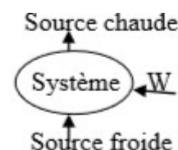
III. Etude formelle des machines thermiques

- Un moteur thermique exploite le mouvement naturel de la chaleur (T_C vers T_F) pour produire du travail.

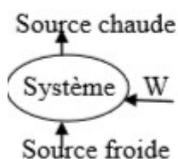
Son rendement vaut $\rho = \frac{-W}{Q_C}$



- Un réfrigérateur utilise un apport de travail pour prélever de la chaleur de la source froide. Son efficacité vaut $e = \frac{Q_F}{W}$



- Une pompe à chaleur utilise du travail pour transférer de la chaleur vers la source chaude. Son efficacité vaut $e = \frac{-Q_C}{W}$



- Si un agent thermique décrit une transformation cyclique au cours desquelles il reçoit le travail W et de la chaleur Q_i de thermostats à la température T_i , alors $W + \sum Q_i = 0$ (1er principe)

IV. Rappels importants pour le calcul des transferts thermiques :

- Pour une transformation adiabatique : $Q = 0$
- Pour une transformation isobare (P cste) : $Q_p = \Delta H = C_p \cdot (T_f - T_i)$
- Pour une transformation isochore (V cste) : $Q_v = \Delta U = C_v \cdot (T_f - T_i)$
- Pour une transformation isotherme (T cste) d'un GP : $Q = -W$ (car $\Delta U = 0$)
- Pour une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait, on a $P \cdot V^\gamma = \text{cste}$: loi de Laplace.