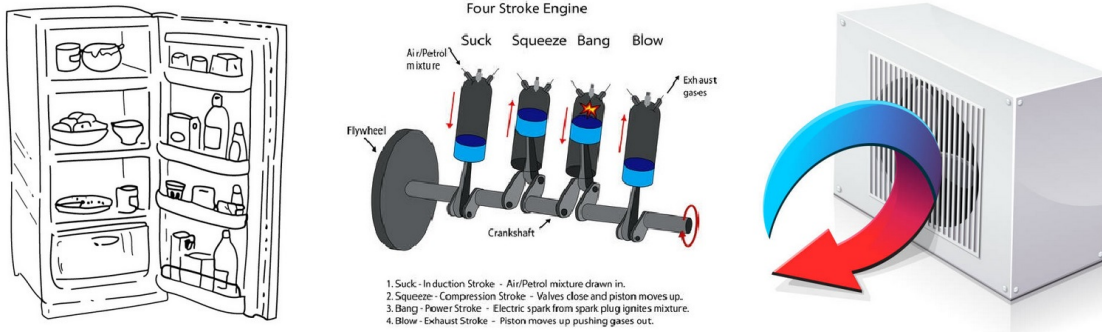


Chapitre 21 : Machines thermiques

Développées par des physiciens depuis le début du XVIII^e siècle, les machines thermiques sont aujourd'hui partout autour de nous : conservation des aliments dans des réfrigérateurs, moteurs thermiques dans les voitures, chauffage ou refroidissement des habitations avec des pompes à chaleur et des climatiseurs, production d'électricité dans les centrales, etc.

Le point commun de toutes ces machines est de contenir un fluide (gaz, et éventuellement liquide) qui subit des cycles de transformations. dans ce chapitre nous allons étudier leur fonctionnement.



Plan du cours

I Machines thermiques cycliques	2	III Machines dithermes réceptrices	7
I.1 Présentation	2	III.1 Fonctionnement	7
I.2 Modélisation	3	III.2 Machine frigorifique	7
I.3 Théorème de Carnot	4	III.3 Pompe à chaleur	9
II Moteur ditherme	4	IV Les machines thermiques dans le diagramme de Raveau	11
		V Cogénération	12

À savoir

Schématisation d'une machine thermique (schéma, conventions de signe)	I.2
Signes des transferts thermiques et travaux échangés pour les différents types de machines	I.1
Grandeurs d'intérêt et grandeurs coûteuses pour les différents types de machines	I.2
Définition de l'efficacité d'une machine thermique	I.2
Théorème de Carnot.	I.3
ODG d'efficacités pour différents types de machines.	II,III.2,III.3
Principe de la cogénération.	V

À savoir faire

Analyser un dispositif et le modéliser par une machine cyclique ditherme (schéma + signes des échanges).	TD1,4,6
Identifier un cycle moteur ou récepteur d'après le sens de parcours du cycle.	Chap. 13
Déterminer l'efficacité d'une machine thermique.	TD1,2,6
Utiliser le 1 ^{er} principe sur un cycle.	TD1,3
Retrouver l'expression du rendement de Carnot.	II,III.2,III.3

I Machines thermiques cycliques

I.1 Présentation

♥ Définition

Machine thermique cyclique : C'est un dispositif dans lequel un fluide décrit un cycle et réalise une conversion d'énergie thermique en énergie mécanique ou inversement :

- les **moteurs thermiques** convertissent l'énergie thermique en énergie mécanique ;
- les **machines réceptrices thermiques** (réfrigérateur, congélateur, climatiseur, pompe à chaleur) convertissent une énergie mécanique (un travail) en énergie thermique en réalisant un transfert thermique d'un corps froid vers un corps chaud (sens inverse au sens spontané).

À quoi servent les machines thermiques ?

Type de machine	Exemples	Principe de fonctionnement
Moteurs thermiques	voiture, centrale nucléaire	convertissent la chaleur récupérée par la combustion du carburant en travail mécanique.
Machines frigorifiques	réfrigérateur, congélateur, climatiseur	prélèvent de la chaleur à un milieu pour la rejeter dans un autre milieu plus chaud.
	pompe à chaleur	réchauffent un milieu en prélevant de la chaleur à un milieu plus froid (même principe que les réfrigérateur, congélateur, etc.) mais le but recherché est différent.

Vidéos expliquant le fonctionnement des différentes machines :

- Moteur à 4 temps (au moins de 1'26 à 5'00)
- Réfrigérateur
- Pompe à chaleur

♥ Définition

Machine cyclique ditherme : Une machine ditherme cyclique échange du transfert thermique avec deux thermostats (ou sources de chaleur) de températures constantes.

Conventions de notation :

- Q_C = transfert thermique algébrique **reçu** de la source chaude de température T_C
- Q_F = transfert thermique algébrique **reçu** de la source froide de température $T_F < T_C$

I.2 Modélisation

★ Méthode

Comment modéliser une machine cyclique ditherme ?

① Définir le système étudié : c'est le fluide qui décrit le cycle.

Exemples : - le mélange air-essence pour le moteur thermique
 - le fluide caloporteur dans le réfrigérateur
 - l'eau du circuit secondaire dans la centrale nucléaire

② Représenter schématiquement le système et les deux thermostats

③ Noter avec des flèches le travail (W) et les 2 transferts thermiques (Q_F et Q_C) reçus par le système, et préciser leurs signes (**ce sont des grandeurs algébriques**)



Remarque

On parle de machine réceptrice (ou récepteur) si le travail W qu'elle reçoit est positif (= réellement reçu), et de machine motrice (ou moteur) si le travail W qu'elle reçoit est négatif (= réellement fourni à l'extérieur).

Application directe :

Compléter le tableau ci-dessous en indiquant les grandeurs d'intérêt et les grandeurs coûteuses :

Machine	Énergie échangée utile	Énergie échangée qui coûte
Moteur thermique		
Réfrigérateur		
Climatiseur		
Pompe à chaleur		



Définition

Efficacité d'une machine thermique (notée e) :

$$e = \left| \frac{\text{énergie échangée utile}}{\text{énergie échangée qui coûte}} \right|$$



Remarque

La notion d'efficacité est valable quel que soit le type de machine, mais on lui donne un nom différent selon le type de machine : rendement pour un moteur (noté η), efficacité frigorifique pour un réfrigérateur et parfois coefficient de performance pour une pompe à chaleur.

I.3 Théorème de Carnot

♥ Théorème

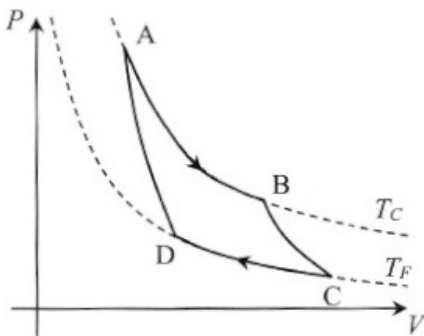
Théorème de Carnot : L'efficacité d'une machine ditherme cyclique réelle est toujours inférieure ou égale à l'efficacité de Carnot obtenue dans le cas d'un cycle réversible, qui est maximale et qui ne dépend que de la température des deux sources de chaleur (thermostats).

Le cycle de Carnot est constitué de **deux transformations isothermes réversibles** aux températures T_F de la source froide et T_C de la source chaude, reliées par **deux transformations adiabatiques réversibles** (isentropiques).

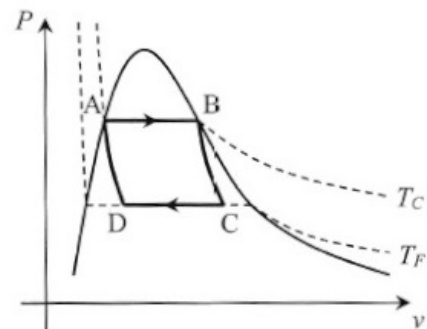


Remarques

- L'efficacité de Carnot est une limite théorique qu'il est impossible de dépasser une fois que les températures des thermostats sont fixées.
- Le cycle de Carnot est le cycle réversible associé à l'efficacité maximale. Pour que le cycle soit réversible, il faut que chaque étape du cycle soit réversible :
 - Pour que les échanges de transferts thermiques entre le système Σ et les sources de chaleur soient réversibles, il est nécessaire qu'au cours de ces échanges la température T du système soit égale à la température de la source de chaleur : les évolutions sont isothermes réversibles (inhomogénéité de température \Rightarrow irréversibilité).
 - En dehors de ces deux évolutions, le système Σ ne doit échanger aucun transfert thermique : il évolue alors de manière adiabatique réversible.



a) Cycle de Carnot moteur décrit par un gaz parfait



b) Cycle de Carnot moteur décrit par un fluide diphasé



Remarques

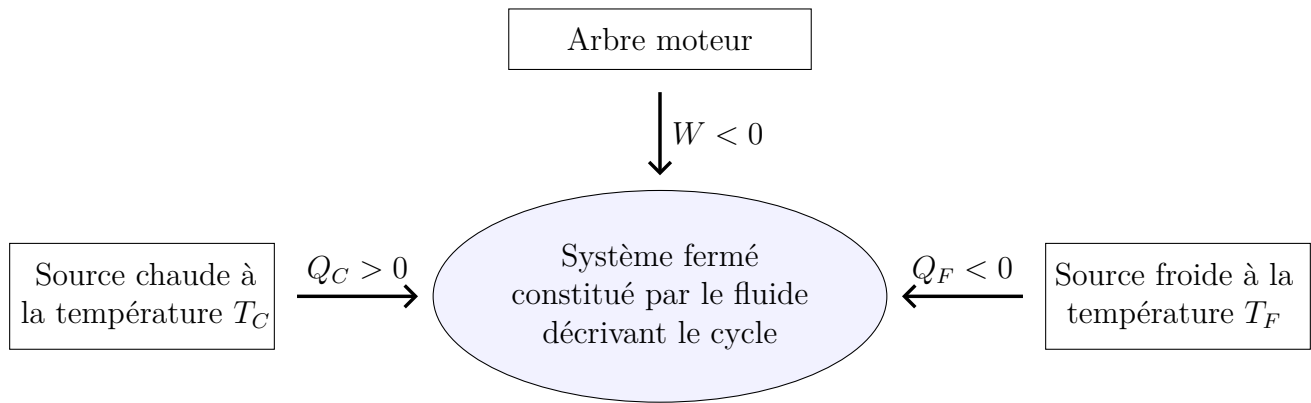
- Le cycle de Carnot peut être parcouru dans le sens moteur ou récepteur.
- Même s'il permet d'atteindre le rendement maximum, un cycle de Carnot présente en pratique peu d'intérêt puisqu'il doit forcément être décrit de manière quasi-statique : une machine qui utiliserait un tel cycle fournirait une puissance nulle !

II Moteur ditherme

Le but d'un moteur est de fournir du travail à l'utilisateur, en prenant de l'énergie à la source chaude. La source froide permet de refroidir le moteur.

Sur un cycle, le fluide décrivant le cycle d'un **moteur thermique ditherme** :

- fournit effectivement du travail à l'extérieur : $W < 0$
- reçoit effectivement du transfert thermique de la part de la source chaude : $Q_C > 0$
- fournit effectivement du transfert thermique à la source froide : $Q_F < 0$



Rendement d'un moteur : rapport de l'énergie échangée « intéressante » (utile) sur l'énergie échangée « qui coûte » (payée par l'opérateur) :

$$\eta = \frac{\text{énergie échangée utile}}{\text{énergie échangée qui coûte}} = \frac{|W|}{Q_C} = -\frac{W}{Q_C}$$

★ Méthode

Comment établir le rendement maximal d'un moteur ditherme ?

- ① Écrire le premier principe sur un cycle.
- ② Écrire le deuxième principe sur un cycle.
- ③ Combiner les deux expressions pour obtenir une inégalité.
- ④ Isoler $\eta = -\frac{W}{Q_C}$ et déduire le rendement maximum de l'inégalité obtenue.

🔪 Démonstration :

Démontrer l'expression du rendement de Carnot d'un moteur ditherme en suivant ces étapes :

1. Définir le système étudié et schématiser la machine en précisant le signe des transferts thermiques et du travail reçus.
2. Analyser le transfert d'intérêt et le transfert coûteux. En déduire l'expression du rendement r du moteur.
3. Appliquer les deux principes sur un cycle et les combiner pour en déduire le rendement de Carnot (r maximum).



Synthèse (moteur ditherme)

$$W < 0$$

(le but d'un moteur thermique est de fournir un travail)

$$Q_C > 0 \text{ et } Q_F < 0$$

(le moteur utilise le sens spontané des échanges thermiques : le fluide reçoit un transfert thermique de la source chaude et cède du transfert thermique à la source froide)

$$\text{Rendement : } \eta = -\frac{W}{Q_C}$$

(grandeur d'intérêt $|W|$, grandeur coûteuse : Q_C)

Rendement de Carnot :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

(fonctionnement réversible)

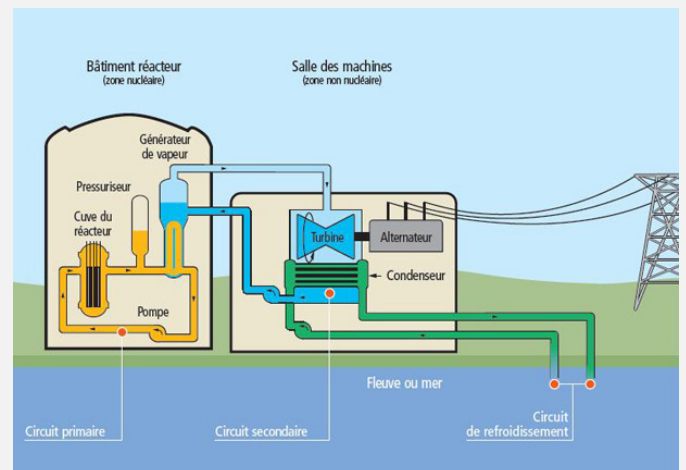
Moteur réel : $0 \leq \eta \leq \eta_C < 1$

(moteur à essence : $\sim 0,35$; moteur diesel : $\sim 0,45$; centrale nucléaire : $\sim 0,30$)

Application directe : Rendement de Carnot d'une centrale nucléaire

Une centrale thermique nucléaire peut être modélisée par un moteur thermique ditherme.

- Q1. Définir le système qui décrit le cycle moteur.
- Q2. Qui joue le rôle de source chaude ? de source froide ?
- Q3. Quelle est la forme du travail fourni ? À quel niveau est-il fourni ?
- Q4. Calculer le rendement de Carnot pour $T_C = 600^\circ\text{C}$ et $T_F = 20^\circ\text{C}$.



Remarque

Dans un moteur de voiture, le système est un mélange air + essence. La source froide est l'atmosphère extérieure, de température typiquement $T_F \approx 300\text{ K}$. La source chaude est l'essence brûlée, de température typiquement $T_C \approx 3000\text{ K}$. \rightarrow Rendement de Carnot d'un moteur de voiture $\eta_C \approx 0,9$

III Machines dithermes réceptrices

III.1 Fonctionnement

Le but d'une machine thermique réceptrice est d'utiliser le travail reçu pour prélever du transfert thermique à la source froide et fournir un transfert thermique à la source chaude.

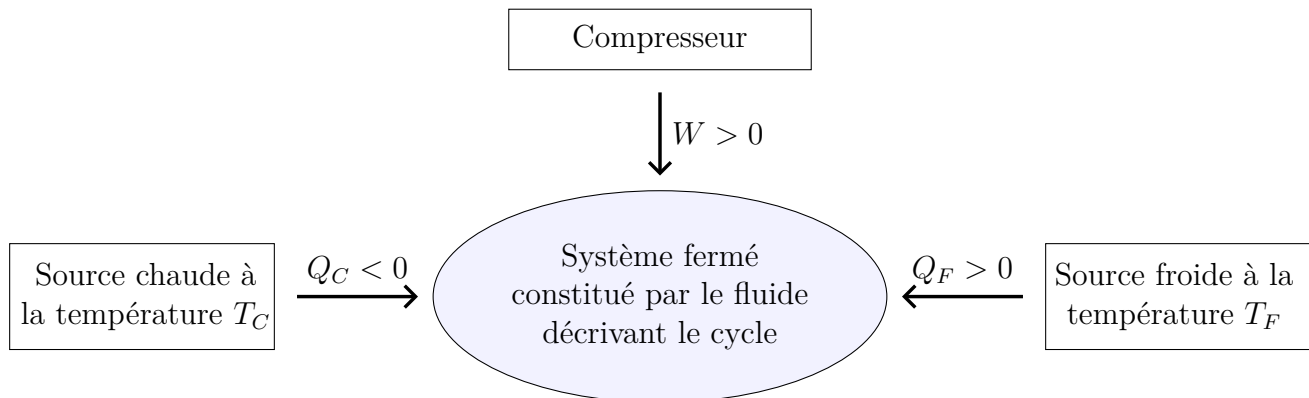
Sur un cycle, le fluide décrivant le cycle d'une **machine thermique réceptrice** :

- reçoit effectivement du travail de la part de l'extérieur : $W > 0$
- fournit effectivement du transfert thermique à la source chaude : $Q_C < 0$
- reçoit effectivement du transfert thermique de la part de la source froide : $Q_F > 0$



Remarque

La source chaude ne « réchauffe » pas le fluide de la machine, elle le refroidit ($Q_C < 0$) ; et la source froide ne « refroidit » pas le fluide, elle le réchauffe ($Q_F > 0$).



On peut classer les machines réceptrices en 2 catégories selon le but recherché :

- Avec une machine frigorifique, on cherche à prélever du transfert thermique (= de la chaleur) à la source froide → énergie utile = Q_F
- Avec une pompe à chaleur, on cherche à fournir du transfert thermique (= de la chaleur) à la source chaude → énergie utile = $-Q_C$

Efficacité d'une machine frigorifique :

$$e = \frac{\text{énergie échangée utile}}{\text{énergie échangée qui coûte}} = \frac{Q_F}{W}$$

Efficacité d'une pompe à chaleur :

$$e = \frac{\text{énergie échangée utile}}{\text{énergie échangée qui coûte}} = \frac{|Q_C|}{W} = -\frac{Q_C}{W}$$

III.2 Machine frigorifique

Démonstration :

Démontrer l'expression du rendement de Carnot d'une machine frigorifique en suivant ces étapes :

1. Définir le système étudié et schématiser la machine en précisant le signe des transferts thermiques et du travail reçus.
2. Analyser le transfert d'intérêt et le transfert coûteux. En déduire l'expression de l'efficacité e de la machine frigorifique.
3. Appliquer les deux principes sur un cycle et les combiner et en déduire à l'efficacité de Carnot (e maximum).



Synthèse (machine frigorifique)

$$W > 0$$

(il faut fournir un travail au fluide d'une machine frigorifique)

$$Q_F > 0 \text{ et } Q_C < 0$$

(le fluide d'une machine frigorifique reçoit du transfert thermique de la part de la source froide et cède du transfert thermique à la source chaude)

$$\text{Rendement : } e = \frac{Q_F}{W}$$

(grandeur d'intérêt Q_F , grandeur coûteuse : W)

Rendement de Carnot :

$$e_C = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

(fonctionnement réversible)

Machine frigorifique réelle :

$$0 \leq e \leq e_C$$

($3 < e < 4$)

Application directe : Efficacité de Carnot d'un réfrigérateur

Un réfrigérateur peut être modélisé par une machine thermique ditherme.

- Q1. Définir le système qui décrit le cycle.
- Q2. Qui joue le rôle de source chaude ? de source froide ?
- Q3. Proposer des valeurs typiques pour T_F et T_C . En déduire l'efficacité de Carnot correspondante.



Remarque

On peut donc avoir des efficacités supérieures à 1 ! Mais le premier principe étant toujours respecté, il y a bien conservation de l'énergie.

Une efficacité égale à 5,7 signifie que $Q_F = 5,7 \times W$, donc avec $W = 1$ J de travail mécanique (pour faire fonctionner le compresseur), on arrive à prélever $Q_F = 5,7$ J de transfert thermique à la source froide pour la rejeter dans la source chaude.

III.3 Pompe à chaleur

Démonstration :

Démontrer l'expression du rendement de Carnot d'une pompe à chaleur en suivant ces étapes :

1. Définir le système étudié et schématiser la machine en précisant le signe des transferts thermiques et du travail reçus.
2. Analyser le transfert d'intérêt et le transfert coûteux. En déduire l'expression de l'efficacité e de la machine frigorifique.
3. Appliquer les deux principes sur un cycle et les combiner et en déduire à l'efficacité de Carnot (e maximum).



Synthèse (pompe à chaleur)

$$W > 0$$

(il faut fournir un travail au fluide d'une pompe à chaleur)

$$Q_F > 0 \text{ et } Q_C < 0$$

(le fluide d'une pompe à chaleur reçoit du transfert thermique de la part de la source froide et cède du transfert thermique à la source chaude)

$$\text{Rendement : } e = -\frac{Q_C}{W}$$

(grandeur d'intérêt $-Q_C$, grandeur coûteuse : W)

Rendement de Carnot :

$$e_C = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

(fonctionnement réversible)

Pompe à chaleur réelle :

$$0 \leq e \leq e_C$$

($2 < e < 5$)

Application directe : Efficacité de Carnot d'une pompe à chaleur

Une pompe à chaleur est utilisée pour chauffer une maison en hiver.

- Q1. Définir le système qui décrit le cycle.
- Q2. Qui joue le rôle de source chaude ? de source froide ?
- Q3. Calculer l'efficacité de Carnot pour $T_C = 35^\circ\text{C}$ et $T_F = 7^\circ\text{C}$.



Remarques

- Il faut comparer cette efficacité avec celle d'un chauffage électrique classique (= une résistance parcourue par un courant, qui chauffe par effet Joule), pour lequel il s'agit d'une conversion totale de l'énergie électrique (travail électrique) $|W|$ consommée, en chaleur $|Q_C|$. Le rendement est de 100 %, c'est-à-dire que l'énergie $|W|$ fournie par le générateur électrique est intégralement dissipée par effet Joule (faire un bilan d'énergie dans un circuit : générateur \rightarrow résistance) : $|Q_C| = |W|$.
- Avec une pompe à chaleur, on peut avoir jusqu'à $|Q_C| = 10 \times |W|$! D'où l'intérêt de remplacer ses vieux radiateurs électriques par une pompe à chaleur !
La remarque précédente reste valable : ce n'est pas « magique », il y a bien toujours conservation de l'énergie. Si $e = 10$, par exemple, ça ne signifie pas que 1 joule de travail ont été convertis en 10 joules de chaleur. Cela signifie qu'il a fallu payer 1 joule de travail mécanique, pour transférer 10 joules de chaleur dans la maison, en les prélevant à l'extérieur de la maison.

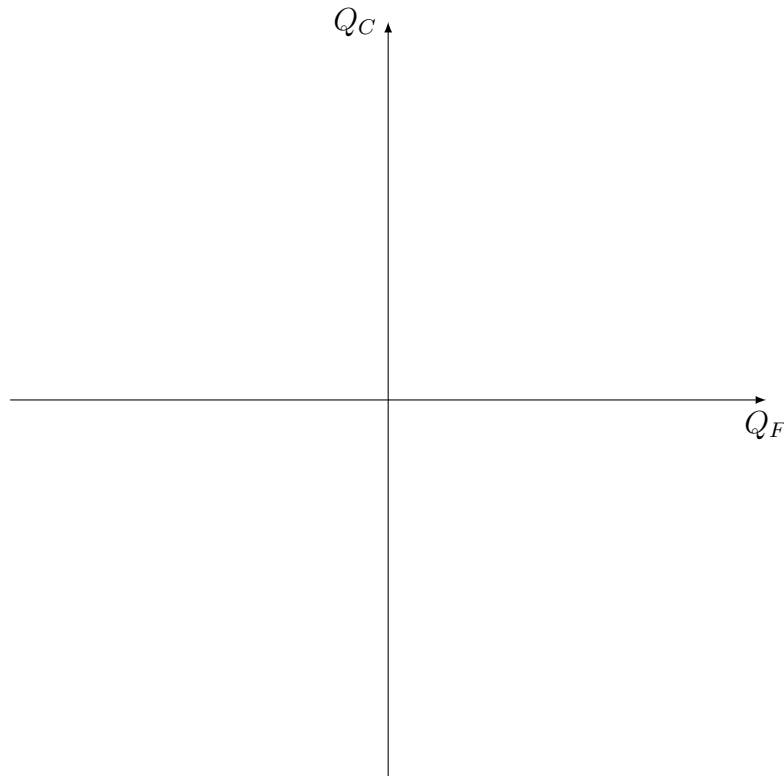
IV Les machines thermiques dans le diagramme de Raveau

le diagramme de Raveau (Q_C, Q_F) permet de classer les machines thermiques en fonction de leur utilité, notamment en fonction de leur caractère moteur ou récepteur.

Application directe :

Compléter le diagramme de Raveau ci-dessous en y faisant figurer :

- Q1. La droite modélisant le premier principe
- Q2. La zone des moteurs
- Q3. La droite correspondant au second principe
- Q4. La zone des récepteurs utiles
- Q5. La zone des récepteurs inutiles



V Cogénération

Un moteur thermique rejette de l'énergie sous forme de transfert thermique à la source froide (par exemple, ce transfert thermique chauffe l'eau de la rivière dans le cas d'une centrale électrique), c'est donc à la fois une perte d'énergie et une contribution au réchauffement de l'environnement.



Définition

Cogénération : La cogénération consiste à coupler la production d'énergie électrique (travail W) à une production d'énergie thermique destinée à chauffer des locaux, à produire de l'eau chaude, à fournir de la chaleur à un procédé industriel qui en nécessiterait.

La fonction principale d'une installation de cogénération est soit la production d'électricité (via un travail mécanique), soit la production d'énergie thermique. La source d'énergie est en général une combustion (charbon, déchets organiques, etc.).

Dans une installation de cogénération, le fluide constituant le système fermé décrivant des cycles :

- reçoit le transfert thermique $Q_C > 0$ libéré par la combustion
- fournit le transfert thermique utile $Q_u < 0$ (récupéré pour du chauffage ou un procédé industriel)
- le travail mécanique utile $W_u < 0$ produit

Deux grandeurs caractérisent une installation :

le rendement global :

$$\eta_g = \frac{|W_u + Q_u|}{Q_C}$$

le rapport chaleur-force CF :

$$CF = \frac{Q_u}{W_u}$$