

Chapitre 28 : Machines thermiques

Les premières machines thermodynamiques datent du XVII^e siècle avec les machines de Denis Papin. Mais il fallut attendre le XIX^e siècle pour que des fondements théoriques soient donnés à ces réalisations pratiques. En travaillant sur ce type de machines, Sadi Carnot dressa le premier les contours du cadre conceptuel que nous avons étudié ces dernières semaines. Nous concluons ce cycle de thermodynamique de première année avec un thème qui, historiquement, fut le préalable aux développements théoriques que nous maîtrisons désormais : quelle ironie n'est-ce pas ?

Comme présenté en introduction, l'énergie associée au refroidissement d'un litre d'eau d'1°C peut, en théorie, permettre de soulever de 430 m un bloc de pierre de 1 m. Ces ordres de grandeur laissent rêveur et expliquent notamment la révolution industrielle qui toucha le monde entier au XIX^e siècle.

I - Principe des machines thermiques

DÉFINITION

Machine thermique : Système fluide échangeant du **travail** avec un système mécanique (ou électrique) et des **transferts thermiques** avec un ou plusieurs thermostats au cours de transformations successives formant un **cycle**.

A Machines cycliques

RAPPEL

Lors d'une transformation cyclique, l'état initial et l'état final sont confondus.

VARIATION D'UNE FONCTION D'ÉTAT

TYPES DE CYCLES

Un cycle peut être :

B Différents types de machines thermiques

La distinction qui vient d'être faite en fonction du travail reçu nous permet de créer deux catégories de machines thermiques.

DÉFINITION

Moteur thermique :

Récepteur thermique :

Remarque : On peut aussi discriminer les machines en fonction de leur structure. On distingue :

C L'étude de machines dithermes

Dans le cadre du programme, on se limitera à l'étude de machines dithermes, c'est-à-dire n'utilisant que deux thermostats. On représente généralement les échanges par un schéma :

ET LES MACHINES MONOTHERMES ?

Remarque :

On s'intéresse alors à une machine ditherme, on qualifie alors de source chaude le thermostat de plus haute température T_c échangeant un transfert thermique Q_c avec le système et de source froide le thermostat de plus basse température T_f échangeant un transfert thermique Q_f avec le système.

INÉGALITÉ DE CLAUSIUS

Remarque :

II - Machines dithermes

A Moteur ditherme

① Sens des échanges

PRINCIPE DE CARNOT

② Performance énergétique : rendement du moteur

Un moteur permet de transformer de l'énergie thermique en énergie mécanique. Le rendement permet de quantifier la performance du moteur pour cette conversion.

DÉFINITION

Rendement d'un moteur : Noté η , le rendement est défini par :

Remarque : Q_f n'intervient pas dans l'expression du rendement d'un moteur ditherme. C'est un transfert rejeté vers l'atmosphère (inutile et qui ne coûte rien).

Quelle est la valeur maximale du rendement d'un moteur ditherme ?

À RETENIR

Quelle que soit la machine utilisée, le rendement d'un moteur ditherme vérifiera toujours l'inégalité suivante :

Remarque : On retrouve bien toujours un rendement inférieur à 1 !

Ordres de grandeur :

3 Optimisation de rendements industriels : principe de la cogénération

L'énergie dissipée sous forme de transfert thermique vers la source froide n'est pas prise en compte explicitement dans le rendement. Toutefois, celle-ci intervient comme l'écart entre le travail fourni et le transfert thermique reçu, et il est évidemment important de chercher à la minimiser le plus possible : c'est un terme de pertes.

Par exemple, dans une centrale nucléaire, 70% de l'énergie issue de la fission de l'uranium est perdue dans les tours de refroidissement, les fleuves ou la mer. On pourrait ainsi, théoriquement, diviser par 3 le nombre de centrales nucléaires du parc nucléaire français (bien entendu, ce n'est pas viable techniquement) en réutilisant ce transfert thermique pour le chauffage domestique par exemple.

Plus généralement, la cogénération consiste en la production, sur une même machine, de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique.

- Le transfert thermique est utilisé pour le chauffage à l'aide d'un échangeur ou la production de vapeur à l'aide d'une turbine
- L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique à l'aide d'un alternateur

B Récepteur ditherme**1 Sens des échanges****RÉCEPTEUR DITHERME**

2 Performance énergétique : efficacité

Un récepteur permet de transformer de l'énergie mécanique (ou électrique) en énergie thermique. L'efficacité permet de quantifier la performance du récepteur pour cette conversion.

DÉFINITION

Efficacité d'un récepteur : Notée e , l'efficacité est définie par :

Remarque : L'efficacité correspond au même raisonnement que celui mené sur les moteurs avec le rendement.

▷ Efficacité d'un réfrigérateur/climatiseur :

L'objectif d'un climatiseur est :

L'énergie utile est donc :

L'énergie coûteuse :

Quid du troisième transfert ?

EFFICACITÉ D'UNE MACHINE RÉFRIGÉRANTE

Quelle est la valeur maximale de l'efficacité d'une machine réfrigérante ?

EFFICACITÉ MAXIMALE

Quelle que soit la machine utilisée, l'efficacité d'une machine réfrigérante vérifiera toujours l'inégalité suivante :

Ordres de grandeur :

▷ Efficacité d'une pompe à chaleur :

L'objectif d'une pompe à chaleur est :

L'énergie utile est donc :

L'énergie coûteuse :

Quid du troisième transfert ?

EFFICACITÉ D'UNE POMPE À CHALEUR

Quelle est la valeur maximale de l'efficacité d'une pompe à chaleur ?

EFFICACITÉ MAXIMALE

Quelle que soit la machine utilisée, l'efficacité d'une pompe à chaleur vérifiera toujours l'inégalité suivante :

Ordres de grandeur :

3 Cycle de Carnot

Une machine ditherme mettant en jeu deux contacts avec des thermostats de températures différentes, on peut étudier le cycle d'une machine totalement réversible en contact avec ces deux mêmes thermostats. Ce cycle est appelé **cycle de Carnot** et, étant réversible, il correspond à une machine théorique ayant la meilleure performance énergétique.

CYCLE DE CARNOT

Remarques :

-

- Le cycle étant réversible, il peut être parcouru dans les deux sens.

- En pratique, on ne cherche pas à réaliser un tel cycle.

Exemples :

APPLICATION DIRECTE N°1

Considérons un moteur de Carnot contenant une quantité de matière n de gaz parfait.

- 1/ Rappeler la définition du rendement d'un moteur.
- 2/ Au cours de quelle étape du cycle le transfert thermique Q_c avec la source chaude est-il échangé ? Le calculer.
- 3/ Pour calculer le travail total échangé au cours du cycle, il est plus astucieux de calculer d'abord Q_f . Pourquoi ? En déduire que :

$$W_{\text{tot}} = -nRT_c \ln \frac{V_B}{V_A} - nRT_f \ln \frac{V_D}{V_C}$$

- 4/ Exprimer V_D/V_A puis V_C/V_B en fonction des températures des sources. En déduire une expression du travail en fonction de V_B et V_A seulement.
- 5/ Conclure sur le rendement du moteur. Commenter.

III - Exemple d'une machine à piston : Moteur quatre temps modélisé par le cycle de Beau de Rochas

Nous allons étudier ici le cycle réel d'un moteur à explosion. On l'appelle en France cycle de Beau de Rochas pour honorer son concepteur, toutefois, il est parfois nommé cycle d'Otto en commémoration du scientifique allemand qui le réalisa en pratique.

A Description : Cycle à quatre temps

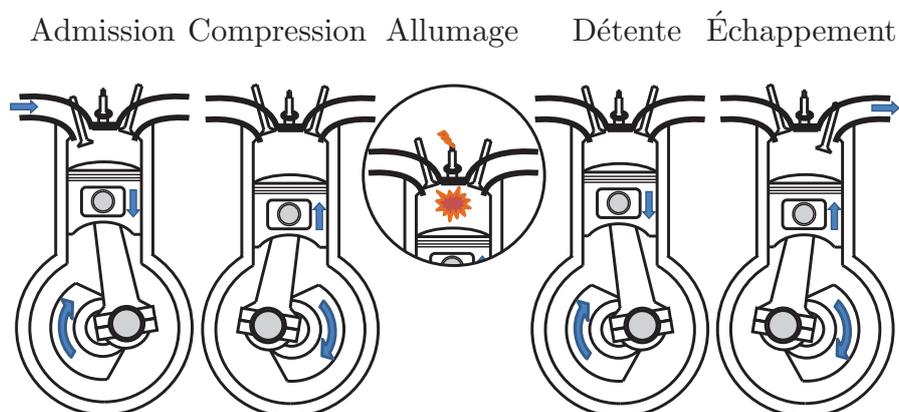


FIGURE 1 : Principe de fonctionnement d'un moteur quatre temps

▷ Premier temps : admission AB

Le cylindre ayant son volume minimal (point A : $V = V_{\min}$), la soupape d'admission s'ouvre et le mélange air+carburant entre dans le cylindre quasiment à pression constante. Le piston se déplace jusqu'à ce que le volume du cylindre soit maximal (point B : $V = V_{\max}$). La différence $V_{\max} - V_{\min}$ est la cylindrée du moteur.

▷ Deuxième temps : compression BC

Les soupapes étant fermées, le mélange est comprimé jusqu'au volume V_{\min} : point C.

▷ Troisième temps : explosion et détente CDE

Au point C, une étincelle électrique provoque l'explosion du mélange qui fait augmenter la pression jusqu'à atteindre la valeur maximale (point D). Les soupapes étant toujours fermées, les produits de la combustion se détendent en repoussant fortement le piston jusqu'à ce que le volume du cylindre soit maximum (point E)

▷ Quatrième temps : échappement EA

Au point E, la soupape d'échappement s'ouvre sur l'atmosphère. L'expulsion des gaz d'échappement s'accompagne d'une diminution brutale de la pression et du volume jusqu'au volume minimal (retour au point A). La soupape d'échappement se ferme alors et la soupape d'admission s'ouvre à nouveau, on est ramené au début du premier temps.

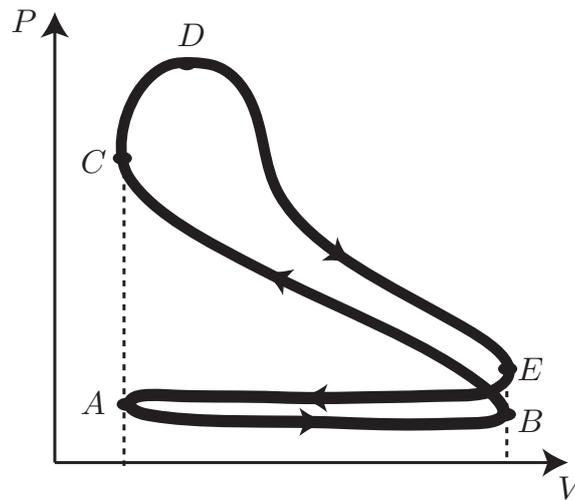


FIGURE 2 : Représentation du cycle « réel » d'un moteur quatre temps dans le diagramme de Clapeyron

Dans la pratique, les moteurs à explosion fonctionnent généralement avec quatre cylindres ce qui permet de réaliser une rotation quasi uniforme du moteur.



B Modélisation : Cycle de Beau de Rochas

Afin de pouvoir réaliser une étude plus simple du moteur, il est préférable de faire certaines hypothèses :

- Le mélange initial et les gaz d'échappement (principalement composés d'air, molécules diatomiques) sont assimilés à un gaz parfait diatomique de coefficient $\gamma = 1,40$.
- Le gaz ne subit aucune transformation chimique et l'énergie thermique effectivement dégagée lors de la combustion du carburant réel est supposée fictivement fournie par une source chaude fictive.

- L'admission AB est supposée isobare à la pression atmosphérique.
- La compression BC et détente DE (plus rapides que les échanges thermiques avec le carter) sont supposées adiabatiques et réversibles (quasistatiques et frottements négligés). Ces évolutions sont donc isentropiques.
- La combustion CD est suffisamment rapide pour que le piston n'ait pas le temps de se déplacer, CD est donc isochore.
- L'ouverture de la soupape ramène le gaz à pression atmosphérique assez rapidement pour que le piston n'ait pas le temps de bouger, EB est alors isochore. Durant cette évolution, le gaz se détend et cède de l'énergie thermique à l'atmosphère qui joue le rôle d'une source froide fictive.
- L'échappement des gaz BA se fait à pression constante.

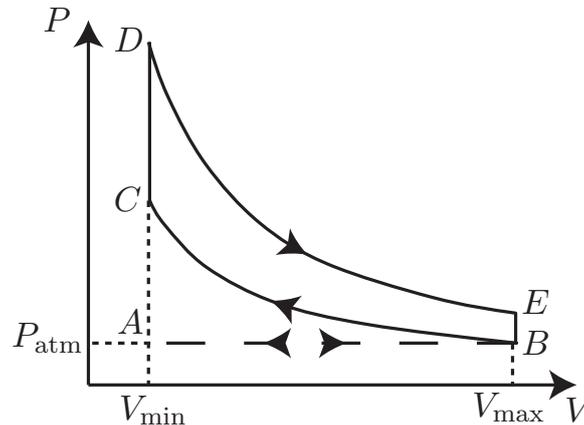


FIGURE 3 : Représentation du cycle de Beau de Rochas d'un gaz parfait diatomique.

En remarquant que les travaux au cours des étapes AB et BA se compensent, on peut occulter ces deux étapes au cours desquelles le système est ouvert. Le cycle est parcouru dans le sens horaire : c'est donc un cycle moteur.

Conclusion : Tout se passe comme si une certaine quantité de gaz constituant un système fermé décrivait indéfiniment un cycle constitué de deux adiabatiques réversibles et de deux isochores : Cycle de Beau de Rochas¹ (différent du cycle de Carnot d'où $\eta < \eta_C$).

Le système reçoit algébriquement un travail W de l'extérieur et les transferts thermiques $Q_{CD} = Q_c$ avec une source chaude, $Q_{EB} = Q_f$ avec une source froide.

C Calcul du rendement

APPLICATION DIRECTE N°2

On s'intéresse au rendement du cycle de Beau de Rochas modélisé précédemment. On note T_i la température au point i du cycle.

- 1/ Rappeler la définition du rendement du moteur. L'exprimer en fonction des transferts thermiques seulement.
- 2/ Calculer le transfert thermique Q_c reçu de la source chaude en fonction des températures T_C et T_D , et Q_f celui reçu de la source froide en fonction des températures T_B et T_E .
- 3/ En déduire l'expression du rendement en fonction des températures. Est-ce pertinent du point de vue industriel ?

Souvent, on exprime plutôt le rendement en fonction du taux de compression $\alpha = \frac{V_{max}}{V_{min}}$.

- 4/ Exprimer T_C et T_D en fonction de α et respectivement de T_B et T_E .
- 5/ Conclure sur l'expression du rendement. Vaut-il mieux avoir un fort ou un faible taux de compression ?

En pratique, $\alpha \sim 10$ ce qui donne un rendement d'environ 0,6. Il est difficile d'augmenter davantage le taux de compression car cela peut entraîner une auto-inflammation du mélange qui endommagerait le moteur.

1. Je vous invite à consulter la page Wikipédia du cycle sur laquelle une petite animation intéressante permet de voir les différentes étapes se succéder.