

1 NOTIONS DE THERMODYNAMIQUE COMMUNES À TOUTES LES APPLICATIONS

1.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES CYCLES, NOTATIONS

Dans de nombreuses applications pratiques, comme par exemple dans les centrales thermiques à vapeur, le fluide subit une série de transformations qui l'amènent à se retrouver dans son état initial. On parle alors de cycle.

Dans certains cas (moteurs à combustion interne) les gaz d'échappement sont rejetés dans l'atmosphère, aussi est-il impropre de parler de cycle. Cependant, dans une approche simplifiée de ces transformations, on suppose que les propriétés thermodynamiques du fluide sortant sont les mêmes que celles du fluide entrant, et on peut alors considérer que le fluide parcourt un cycle partiel, dit cycle ouvert, qu'il est possible de fermer par une évolution fictive complémentaire, ce qui permet alors de le comparer à d'autres cycles fermés. Par extension, on en vient à parler de cycle pour qualifier la représentation de la succession des évolutions thermodynamiques subies par le ou les fluides mis en jeu dans une technologie énergétique.

1.1.1 CYCLES MOTEURS

Sur terre, l'énergie mécanique se présente sous deux formes principales :

- l'énergie potentielle, provenant essentiellement de l'attraction de la gravitation terrestre, est celle que possède un corps au repos situé en altitude : énergie contenue dans l'eau d'un barrage ;
- l'énergie cinétique est celle que possède un corps en mouvement : énergie du vent, des cours d'eau...

Sous ces deux formes, l'énergie mécanique disponible est largement inférieure aux nombreux besoins des sociétés humaines actuelles, qui correspondent aux transports (23 % du bilan énergétique français), à la génération d'électricité ou à l'entraînement des machines agricoles et industrielles...

Ce n'est que depuis le milieu du XVIII^e siècle que l'homme est devenu capable, grâce aux découvertes de Papin et de Watt, de transformer de la chaleur en énergie mécanique. Depuis, des progrès considérables ont été faits dans la mise au point des moteurs, et les évolutions technologiques se poursuivent à un rythme soutenu, du fait des avancées de la science et des contraintes environnementales de plus en plus strictes.

Pour convertir de la chaleur en énergie mécanique, dans la quasi-totalité des cycles utilisés, le fluide thermodynamique est successivement comprimé, puis chauffé, et enfin détendu. Si le cycle est ouvert, le fluide est alors évacué dans l'environnement externe ; s'il est fermé, il est refroidi, puis de nouveau comprimé... Les divers moteurs que l'on utilise diffèrent par :

- le type de cycle thermodynamique qu'ils utilisent ;
- la nature du fluide thermodynamique qui les traverse ;
- les types de source chaude et d'organe de compression et de détente qu'ils emploient.

Différentes typologies peuvent être ainsi établies. Généralement, on distingue :

- les moteurs à fluide compressible, où le fluide reste à l'état de gaz ou de vapeur pendant tout le cycle. Dans ce cas, un compresseur est bien sûr nécessaire. Selon les cas, on utilise comme source chaude une chaudière ou une chambre de combustion pour un cycle ouvert si le fluide technique contient de l'oxygène (généralement de l'air) ;
- les moteurs à fluide condensable, dans lesquels le fluide change d'état : en sortie du condenseur, il s'agit d'un liquide qui est comprimé par une pompe, puis chauffé et transformé en vapeur dans une chaudière, vapeur qui est ensuite détendue dans une turbine ou un moteur à piston. Le travail de compression, proportionnel au volume massique du fluide, est dans ces moteurs beaucoup plus faible que dans les précédents.

On distingue aussi communément :

- les moteurs à combustion interne, fonctionnant en cycle ouvert, pour lesquels la source chaude est une chambre de combustion ;
- les moteurs à combustion externe, fonctionnant en cycle fermé, pour lesquels la source chaude est une chaudière.

Il est clair que ces différentes catégories se recouvrent partiellement. Pour notre part, nous avons choisi de présenter d'abord les moteurs à combustion interne : turbines à gaz et moteurs dérivés (chapitre 2), moteurs à essence et moteurs diesel (chapitre 3), puis les moteurs à combustion externe : les moteurs Stirling (chapitre 4) et les installations motrices à vapeur (chapitres 6 et 7).

1.1.2 CYCLES RÉCEPTEURS

Dans un cycle moteur, on apporte de la chaleur et l'on produit de l'énergie mécanique. Dans un cycle récepteur (ou encore générateur), on opère en sens inverse : on apporte de l'énergie mécanique et on s'en sert pour remonter le niveau thermique d'une quantité de chaleur.

Trois types de cycles récepteurs sont communément utilisés :

- les cycles de réfrigération (frigopompes, chapitre 9) ;
- les cycles de pompes à chaleur (thermopompes, chapitre 10) ;
- les cycles à compression mécanique de vapeur, chapitre 10.

Les deux premiers diffèrent simplement par les niveaux de température de fonctionnement et par l'effet recherché. Dans les cycles de réfrigération, on cherche à refroidir une enceinte, tandis qu'une pompe à chaleur est utilisée pour le chauffage.

1.1.3 CYCLE DE CARNOT

Le lecteur intéressé par une présentation plus complète du cycle de Carnot pourra se reporter à la section 2.4.3 du tome 1. On sait que l'efficacité d'un tel cycle est égale à

$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$, si T_1 et T_2 sont respectivement les températures des sources chaude et froide (figure 1.1.1).

Cette valeur correspond au maximum d'efficacité pour une machine ditherme, mais la réalisation d'un cycle de Carnot présente de nombreuses difficultés :

- d'une part parce qu'en pratique, il faut qu'il y ait une certaine différence de température entre la machine et les sources chaude et froide lors des transformations AB et CD ;
- d'autre part parce que la réalisation d'une compression isotherme CD ou d'une détente isotherme AB pose de nombreux problèmes technologiques.

On a en effet vu (section 2.3.6 du tome 1) que l'on est conduit pour différentes raisons à utiliser généralement des dispositifs fixes pour échanger de la chaleur, et des machines adiabatiques pour réaliser des compressions ou des détentes.

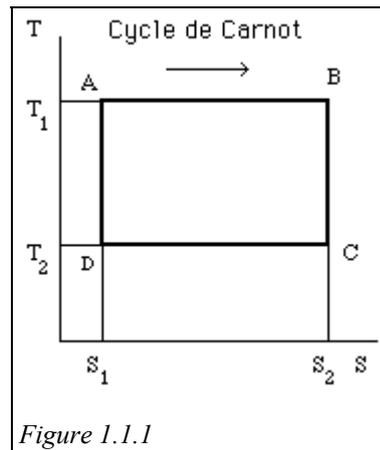


Figure 1.1.1

Les cycles moteurs réels s'écartent donc sensiblement du cycle de Carnot, les isothermes AB et CD étant le plus souvent remplacées par des isobares ou des isovolumes. En revanche, on cherche bien entendu à ce que la détente BC et la compression DA se rapprochent des isentropiques.

1.1.4 CYCLES AVEC RÉGÉNÉRATION

On peut concevoir des cycles où les compressions et détentes isentropiques DA et BC sont remplacées par d'autres évolutions, chacune d'entre elles se déduisant de l'autre par translation dans un diagramme entropique (figure 1.1.2). On parle alors de régénération.

Dans ces conditions, il est théoriquement possible de réaliser l'ensemble des échanges de chaleur internes et externes à température constante, et le cycle idéal avec régénération atteint la même efficacité que celui de Carnot.

En pratique, l'échange de chaleur interne ne se fait bien sûr pas à température constante, et on introduit la notion d'efficacité du régénérateur pour en qualifier les performances.

Des exemples de cycles moteurs à régénération seront donnés plus loin (turbine à gaz section 2.1.5.1, cycle de Stirling chapitre 4, cycles à vapeur à prélèvement section 6.1.2).

1.1.5 CYCLES THÉORIQUES ET RÉELS

Ce qui distingue essentiellement les cycles, ce sont d'une part les états (gazeux ou liquides) dans lesquels le fluide de travail est susceptible de se trouver, et d'autre part la nature des évolutions qu'il subit.

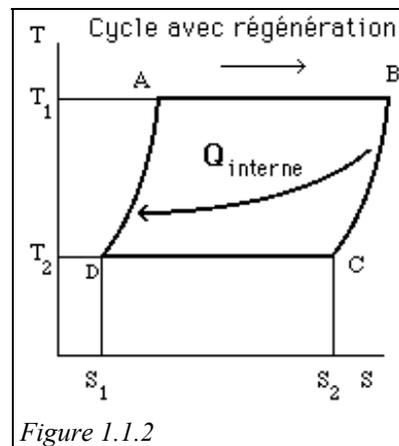


Figure 1.1.2

L'étude des machines thermiques permet, à partir de l'analyse thermodynamique des cycles théoriques, de bien comprendre l'ensemble des contraintes auxquelles on est confronté lorsque l'on cherche à convertir en puissance mécanique ou électrique de la chaleur, ou réciproquement en chaleur ou froid de l'énergie mécanique.

En pratique, comme on le verra, de nombreuses difficultés technologiques se présentent, et les cycles réels s'écartent souvent notablement des cycles théoriques que l'on est capable de calculer. L'étude d'un type particulier de machine dépend donc fortement des dispositifs techniques, notamment mécaniques et thermiques, qui sont mis en jeu, et nous essaierons dans ce qui suit de prendre en compte ces particularités dans la mesure du possible.

La présentation des cycles théoriques conserve cependant un grand intérêt, car ils constituent la référence thermodynamique, et déterminent les limites qu'il est possible d'atteindre, en terme de rendement par exemple. L'étude des cycles permet ainsi de guider efficacement l'ingénieur dans sa démarche d'amélioration des moteurs.

1.1.6 NOTIONS DE RENDEMENT OU D'EFFICACITÉ

Il peut être utile à ce stade de préciser ce que recouvre la notion de rendement ou d'efficacité, bien que nous l'ayons déjà utilisée à plusieurs reprises.

Dans le cas général, elle est assez intuitive : pour une machine thermique destinée à transformer de la chaleur en puissance mécanique, il s'agit du rapport entre la puissance produite et la chaleur fournie à la machine : $\eta = \frac{\tau}{Q}$.

Les difficultés proviennent de ce que les termes "puissance produite" ou "chaleur fournie à la machine" n'ont pas nécessairement une signification unique.

Chaleur fournie

À la source chaude est fournie une certaine énergie calorifique Q_0 , déterminée par le débit de combustible et les conditions de la combustion. Nous avons vu dans le tome 1 que, même en supposant la combustion complète, la chaleur reçue dépend de l'enthalpie de condensation de l'eau récupérée. Généralement, on calcule Q_0 par rapport au pouvoir calorifique inférieur (PCI) du combustible, ce qui revient à sous-estimer légèrement le potentiel de celui-ci. Lorsque la combustion n'est pas complète, les choses peuvent se compliquer notablement, comme nous l'avons montré dans la section 4.6 du tome 1.

Supposons maintenant Q_0 déterminée. En général, une partie de cette chaleur s'échappe au niveau de la source chaude, et n'est pas communiquée au fluide thermodynamique : il s'agit des pertes par convection, conduction et rayonnement de la chaudière ou de la chambre de combustion, des pertes éventuelles par les fumées... On peut caractériser ces pertes par un rendement de chaudière η_{ch} , égal au rapport de Q_1 fournie au fluide à Q_0 .

Puissance produite

La puissance τ produite par la machine est par définition égale à la différence entre la puissance fournie τ_d , et la puissance consommée τ_c , avec la convention d'exprimer leurs valeurs positivement, à leur somme si elles sont calculées algébriquement.

τ_d est égale à la somme des puissances fournies sur les différents arbres des organes de détente, et τ_c à la somme des puissances consommées sur les arbres des organes de compression.

On appelle rendement thermodynamique, ou encore rendement interne η_i , le rapport de la puissance produite τ à Q_1 .

La puissance τ ne correspond cependant pas entièrement à celle qui sera délivrée par le moteur, car des "auxiliaires" sont nécessaires pour que l'ensemble puisse fonctionner. Leur rôle est d'approvisionner le moteur en combustible, d'assurer sa lubrification et son refroidissement...

De plus, un certain nombre de frottements internes doivent être vaincus. On regroupe généralement sous le nom de pertes mécaniques l'ensemble de ces prélèvements sur la puissance disponible, qui chute en conséquence, et on peut les représenter par le rendement mécanique η_m , le rendement total étant égal au produit de ce dernier par le rendement interne défini plus haut : $\eta = \eta_i \cdot \eta_m$.

D'une manière plus générale, lorsque l'on a affaire à des cycles relativement complexes, on est conduit à adopter une définition élargie du rendement ou de l'efficacité, qui est la suivante : il s'agit du rapport de l'effet énergétique utile à l'énergie payante mise en jeu.

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie payante}}$$

Cette manière de faire est celle qui est retenue dans Thermoptim (section 3.3.1 du tome 1). Elle présente l'avantage de rester valable dans tous les cas, tant pour les cycles moteurs que pour les cycles récepteurs. Dans ce dernier cas, on ne parle plus de rendement mais plutôt de COefficient de Performance COP (cf. section 9.3).

1.2 BILANS ÉNERGÉTIQUES ET EXERGÉTIQUES

L'analyse des performances des diverses technologies étudiées dans ce tome conduit de manière classique à calculer leurs bilans énergétiques. Nous montrerons aussi l'intérêt complémentaire que peut présenter l'établissement de bilans exergétiques, qui ne pose pas de difficulté particulière mais demande à être fait avec grand soin faute de quoi des erreurs peuvent être commises.

Dans les sections traitant des diverses applications, nous verrons comment en pratique peuvent être établis les bilans énergétiques et exergétiques, et en quoi ils diffèrent. Nous nous contenterons ici d'en présenter les principes, en suggérant au lecteur désireux d'approfondir la question de se reporter à la littérature spécialisée, relativement abondante aujourd'hui, et notamment aux ouvrages de L. Borel et M. Moran cités en références.

1.2.1 Bilans énergétiques

La méthode générale exposée section 2.3.5 du premier tome présente la manière de dresser un bilan enthalpique. Pour un système en régime permanent (cas auquel nous nous limiterons), il s'agit simplement de comptabiliser les flux aux frontières de chaleur, de travail utile et d'enthalpie, et éventuellement dans des cas particuliers comme pour une réaction de combustion, et bien que cela soit en contradiction formelle avec le premier principe, de réintroduire un terme de génération d'énergie dans le volume, l'équation générale du bilan d'un volume de contrôle devenant la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{transport} \\ \text{entrant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{transport} \\ \text{sortant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{transfert} \\ \text{à} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{génération} \\ \text{dans le} \\ \text{volume} \end{array} \right\} = 0 \quad (1.2.1)$$