

2.1 NOTIONS FONDAMENTALES, DÉFINITIONS

A ce stade de notre étude, il est préférable de définir ou rappeler un certain nombre de notions fondamentales dont nous aurons besoin dans la suite de l'exposé : systèmes thermodynamiques, variables et équations d'état, phases, équilibres, transformations réversibles et irréversibles. Ces concepts sont nécessaires pour permettre de calculer les évolutions que subissent les fluides thermodynamiques. On est en effet amené à introduire des variables et des fonctions reliées entre elles par des équations qui ne peuvent être déterminées que si le milieu considéré est continu et homogène, c'est-à-dire si ces fonctions sont suffisamment régulières au sens mathématique du terme. En particulier, nous ne nous intéresserons qu'à des quantités de matière macroscopiques.

2.1.1 SYSTÈMES OUVERTS ET FERMÉS

Un **système thermodynamique** désigne une quantité de matière isolable de son environnement par une frontière fictive ou réelle. Ce système est dit **fermé** s'il n'échange pas de matière avec l'extérieur à travers ses frontières ; sinon il est dit **ouvert**. On notera que cette notion de système n'est pas du tout la même que celle que nous avons introduite plus haut pour caractériser une technologie énergétique en tant qu'assemblage de composants. Il y a là une difficulté de vocabulaire que l'on ne peut éviter compte tenu des usages, mais le contexte permet généralement sans difficulté de distinguer les deux acceptions du terme.

Les débutants sont souvent décontenancés par la distinction entre systèmes fermés et systèmes ouverts, ces derniers correspondant à un concept nouveau pour eux car au cours de leur scolarité de premier cycle, ils n'ont généralement étudié que des systèmes fermés (pour éviter la prise en compte des échanges de matière aux frontières).

Dans un moteur diesel ou à essence, les soupapes sont fermées pendant la compression, la combustion et la détente, isolant de l'extérieur la masse de gaz qui se trouve comprise entre le piston, la chemise et la culasse. Les transformations qui prennent place à l'intérieur du moteur doivent donc être calculées en système fermé. Dans le cas d'une turbine à gaz, compresseur, chambre de combustion et turbine sont parcourus par un flux continu de gaz. A l'entrée et à la sortie de chacun de ces composants, de la matière est transférée. Les transformations doivent alors être calculées en système ouvert.

Il y a un certain paradoxe dans le fait que les calculs sont généralement plus faciles à effectuer pour les systèmes ouverts que pour les systèmes fermés, bien que ces derniers ne mettent pas en jeu d'échanges de matière avec l'extérieur. La raison en est que la pression est généralement une donnée dans les calculs en système ouvert alors qu'elle dépend de nombreux facteurs dans un système fermé.

A titre d'exemple, la combustion dans une turbine à gaz (système ouvert) prend place à pression constante, à de faibles pertes de charge près, alors que dans un moteur diesel ou à essence (système fermé), la pression varie très fortement au cours de la transformation, de telle sorte qu'il est préférable, si l'on veut approcher un peu la réalité, de la décomposer en plusieurs étapes : par exemple d'abord à volume constant, puis à pression constante, et enfin à température constante.

Pour achever de compliquer les choses, il est naturel (mais fatal) de confondre les notions d'ouverture et de fermeture des systèmes au sens thermodynamique que nous

venons d'introduire et au sens du cycle complet que parcourent les fluides d'une machine thermique.

Par exemple un cycle de machine frigorifique à compression est un cycle fermé (figure 2.1.1), faute de quoi le frigorigène serait perdu dans l'atmosphère, ce qui serait à la fois coûteux et préjudiciable à l'environnement, alors que chacun de ses composants pris séparément (à l'exception éventuellement du compresseur s'il est volumétrique) constitue un système ouvert, traversé en régime permanent par un certain débit de fluide frigorigène.

La machine opère ainsi selon un cycle fermé associant plusieurs composants travaillant chacun en système ouvert.

Schéma d'un cycle frigorifique à compression

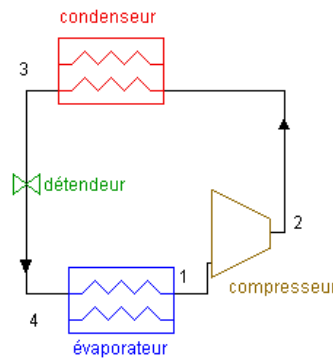


Figure 2.1.1 : Cycle frigorifique à compression

2.1.2 ÉTAT D'UN SYSTÈME, GRANDEURS INTENSIVES ET EXTENSIVES

La notion d'**état d'un système** représente "l'information minimale nécessaire à la détermination de son comportement futur". Les variables d'état (températures, pressions...) constituent l'ensemble des grandeurs physiques (ou propriétés thermodynamiques) nécessaires et suffisantes pour caractériser complètement un système à un instant donné. Il existe généralement plusieurs ensembles répondant à cette définition, mais on notera que la vitesse n'est pas une variable d'état, étant donné que sa définition fait intervenir deux instants successifs. Nous verrons par la suite que, pour une phase de masse unitaire, deux grandeurs suffisent pour déterminer toutes les autres. Il en résulte qu'il existe des équations reliant chaque variable d'état à deux d'entre elles indépendantes : $v = f(P, T)$... On appelle **équations d'état** de telles relations, fondamentales en pratique.

Selon le problème posé, on retient le plus souvent les couples suivants : (pression, volume), (pression, température), (température, volume). Une **fonction d'état** est une grandeur dont la valeur ne dépend que de l'état du système, et non pas de son histoire.

Un modèle physique fait intervenir des grandeurs représentatives de l'état d'un système, qui sont a priori fonction du temps et de la position du point considéré. Ces grandeurs peuvent être regroupées en deux grandes classes :

- les **grandeurs intensives**, telles que la pression, la température ou l'enthalpie massique, qui sont indépendantes de la quantité de matière considérée ;
- les **grandeurs extensives**, telles que la masse, l'enthalpie ou l'entropie, qui dépendent de la masse du système.

Une grandeur intensive relie la condition en un point du milieu considéré à une condition de référence en un autre point ou dans un autre milieu. Par exemple, la température est définie par rapport au zéro absolu ou au point triple de l'eau.

Une grandeur extensive est additive : si un système est composé de plusieurs phases, les grandeurs extensives qui le caractérisent sont égales à la somme de celles des

phases qui le composent. La masse ou l'enthalpie totale sont des grandeurs extensives.

On notera qu'en multipliant par la masse d'une phase certaines grandeurs intensives comme l'enthalpie massique ou l'entropie massique, on obtient des grandeurs extensives comme l'enthalpie ou l'entropie.

Rappelons qu'on appelle volume de contrôle une région de l'espace dotée de frontières réelles ou fictives, et délimitant ainsi le système (thermodynamique dans notre cas) auquel on s'intéresse. Un exemple de volume de contrôle est donné figure 2.3.1. Il est délimité par les parois fixes et mobiles de la machine M et par deux surfaces géométriques immatérielles notées A_1 et A_2 à l'instant initial t_0 , et B_1 et B_2 à $t_0 + dt$.

Dans l'exemple de la figure 2.3.1, le volume de contrôle est considéré comme un système fermé, que l'on suit dans son déplacement au cours du temps, A_1 passant en B_1 et A_2 en B_2 . Dans d'autres cas, les volumes de contrôle pourront délimiter des systèmes ouverts. Les masses qu'ils isolent seront alors susceptibles de varier en fonction des débits-masses traversant leurs frontières.

D'une manière générale, les modèles des composants que nous utiliserons sont établis en écrivant les lois de continuité et de conservation des variables extensives : masse, énergie, entropie... les bilans étant établis au niveau de volumes de contrôle bien choisis.

Les **lois de conservation** s'écrivent sous la forme générale :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{accumulation} \\ \text{dans le volume} \\ \text{de contrôle} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{transport} \\ \text{entrant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{transport} \\ \text{sortant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{transfert} \\ \text{à} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{génération} \\ \text{dans le} \\ \text{volume} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{consommation} \\ \text{dans le} \\ \text{volume} \end{array} \right\} \quad (2.1.1)$$

Pour les grandeurs conservatives, comme la masse, l'énergie interne et l'enthalpie, les deux derniers termes de l'équation disparaissent. Pour les grandeurs non conservatives, comme l'entropie ou le nombre de moles d'une espèce chimique en réaction, il peut être nécessaire d'introduire l'un ou l'autre.

Construire un modèle consiste à traduire cette expression sémantique en un jeu d'équations et à fixer les conditions initiales et aux limites.

2.1.3 PHASE, CORPS PURS, MÉLANGES

On appelle phase un milieu continu jouissant des trois propriétés suivantes :

- il est homogène (ce qui implique une température uniforme) ;
- la vitesse en chacun de ses points est nulle dans un repère convenable ;
- il n'est soumis à aucune force extérieure à distance (pression uniforme).

Comme on le sait, la matière se présente sous trois phases : solide, liquide et gazeuse. Un système thermodynamique peut être constitué d'un seul corps pur, ou en comporter plusieurs. Dans ce dernier cas, le mélange est caractérisé par sa composition, molaire ou massique. Chacun des constituants du mélange peut se trouver présent sous une ou plusieurs phases. Si les constituants et leurs phases sont répartis uniformément dans le volume délimité par les frontières du système, le

mélange est homogène, sinon il est hétérogène. Les propriétés d'un mélange dépendent bien évidemment de son homogénéité.

La notion de phase joue un rôle très important en pratique, car on supposera toujours dans ce qui suit que tout système physique est décomposable en un ensemble de phases.

2.1.4 ÉQUILIBRE, TRANSFORMATION RÉVERSIBLE

Une phase est dite en équilibre statique, ou plus simplement en équilibre, si :

- la pression et la température sont uniformes dans l'espace ;
- toutes les variables d'état sont constantes dans le temps.

On appelle transformation réversible entre deux états d'équilibre 1 et 2 une évolution fictive qui jouit des deux propriétés suivantes :

- elle est suffisamment lente à tous points de vue (vitesses, échanges de chaleur et de matière...) pour qu'on puisse l'assimiler à une suite continue d'états d'équilibre ;
- elle constitue la limite commune de deux familles de transformations réelles dont l'une mène de 1 à 2, et l'autre de 2 à 1.

Une transformation est dite irréversible dans les deux cas suivants :

- la transformation inverse n'est pas réalisable sans modification profonde de l'appareillage (mélange, combustion...);
- elle renferme une cause d'irréversibilité du type frottement ou viscosité.

2.1.5 TEMPÉRATURE

La notion de température peut être introduite de plusieurs manières différentes. Nous nous contenterons ici de la définition opérationnelle proposée par F. FER, qui repose sur les deux propositions suivantes :

- on sait construire un thermomètre, appareil dont toutes les propriétés physiques sont, dans des conditions opératoires bien définies, fonction d'une seule variable, appelée température ;
- on sait réaliser des milieux matériels tels que, lorsqu'un thermomètre y est plongé, son indication reste constante dans le temps et indépendante de son orientation et de la place qu'il occupe dans le milieu.

On pose alors que la température du milieu est égale à celle du thermomètre, et on dit que le milieu est en équilibre thermique.

A partir de cette présentation, il est possible de faire le lien avec les définitions axiomatiques de la température déduites par exemple du deuxième principe. Un exposé rigoureux et complet de cette notion sort cependant des limites que nous avons fixées pour cet ouvrage, et s'impose d'autant moins qu'elle est assez intuitive et que son utilisation pratique ne pose généralement pas de problème particulier.

2.1.6 NOTATIONS

On notera généralement en minuscules les variables d'état (à l'exception de la température exprimée en Kelvin et de la pression) et les fonctions d'état intensives (rapportées à l'unité de masse), et en majuscules les grandeurs extensives (rapportées à la masse totale).

Conformément à l'usage, une exception sera cependant faite pour l'énergie cinétique K , le travail des forces externes W et la chaleur échangée avec l'extérieur Q , qui seront écrits en majuscules même exprimées en unités massiques, et pour le travail utile τ , qui sera toujours écrit en minuscules.

On passe des unes aux autres en multipliant les premières par la masse m (pour les systèmes fermés), ou le débit massique \dot{m} (pour les systèmes ouverts).

$$\text{volume } v = \frac{V}{m} = \frac{\dot{V}}{\dot{m}} \quad (\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}) \quad \text{énergie interne } u = \frac{U}{m} = \frac{\dot{U}}{\dot{m}} \quad (\text{J kg}^{-1})$$

$$\text{entropie } s = \frac{S}{m} = \frac{\dot{S}}{\dot{m}} \quad (\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}) \quad \text{enthalpie } h = \frac{H}{m} = \frac{\dot{H}}{\dot{m}} \quad (\text{J kg}^{-1})$$

Pour des raisons de commodité, nous nous ramènerons, chaque fois que possible, à l'unité de masse du fluide considéré.

Dans cet ouvrage, nous n'utiliserons que très rarement les grandeurs extensives, aussi prendrons-nous la liberté, pour ne pas alourdir les notations, d'utiliser aussi les majuscules pour les grandeurs molaires, auxquelles nous aurons parfois recours. Lorsque ce sera le cas, nous l'indiquerons.

Rappelons par ailleurs qu'une kilomole (1 kmole) est la quantité d'une substance dont la masse est égale à sa masse molaire M exprimée en kilogramme : 1 kmole de O_2 a une masse de 32 kg.

Si M^* est la masse d'une molécule, $M^* = \frac{M}{N_0}$, N_0 étant le nombre d'Avogadro :

$$N_0 = 6 \cdot 10^{23} \text{ molécules /g.}$$

A l'état normal (0°C, 1 bar), le volume occupé par une kilomole est égal à 22,414 m³.

2.2 ÉCHANGES D'ÉNERGIE AU COURS D'UNE TRANSFORMATION

Les composants des machines thermiques sont parcourus par des fluides qui sont le plus souvent à l'état gazeux ou liquide. Au cours des transformations qu'ils y subissent, ces fluides échangent de l'énergie avec l'extérieur ou entre eux sous deux formes : mécanique, notée traditionnellement W , et thermique notée Q . Compte tenu de leur importance pratique, nous commencerons par étudier ces échanges d'énergie.

Conformément à notre parti pris de privilégier un exposé aussi simple que possible des bases de la thermodynamique, nous nous limiterons dans ce qui suit à des systèmes en régime permanent, car, même si les résultats que nous établirons se généralisent assez facilement, il est alors nécessaire d'adopter un formalisme plus lourd si l'on veut être rigoureux.

2.2.1 TRAVAIL δW DES FORCES EXTERNES SUR UN SYSTÈME FERMÉ

Considérons un système fermé monophasé. Les forces extérieures qui s'exercent sur lui se limitent généralement d'une part à l'action de la pesanteur sur la masse fluide, et d'autre part aux pressions qui s'exercent sur ses frontières.

Dans les machines thermiques, le travail de la pesanteur est dans la majorité des cas négligeable devant celui des actions dites "de contact". Pour fixer les idées, le travail fourni par une masse de 1 kg d'eau tombant d'une hauteur de 100 m est égal à