

Chapitre I

Concepts et définition de la thermodynamique appliquée

1 Introduction

La thermodynamique, ou l'étude théorique de la chaleur constitue un domaine cohérent qui se distingue des autres domaines de la physique.

Elle permet, à l'aide d'un certain nombre de variables, de décrire l'état d'un système matériel.

La thermodynamique ou l'étude théorique de la chaleur correspond à l'étude de la dynamique des systèmes thermomécaniques, c'est à dire à l'étude d'un système matériel au cours de son évolution à l'aide d'un certain nombre de variables décrivant son état en fonction des échanges d'énergies mécaniques (travail) et thermiques (chaleur) avec le milieu extérieur au système.

La thermodynamique est la science qui étudie les lois de transformations de l'énergie.

2 Définition du système thermodynamique et du volume de contrôle

2.1 Définition d'un système

Un système est défini par une région de l'espace délimité par une surface fermée. Cette surface est appelée **frontière** du système, elle peut être réelle ou imaginaire.

Tout ce qui est extérieur à cette surface est appelé : **environnement** ou bien **milieu extérieur** indépendant de la nature de cette surface.

On caractérise un système suivant la nature de ses échanges (matière et énergie) avec l'extérieur. On distingue trois types de systèmes :

2.1.1 Un système fermé

Il est dit fermé s'il n'échange pas de matière avec le milieu extérieur. La **masse du système reste constante** (la masse de la quantité de matière est fixe) pour des systèmes non réactifs. Cependant les échanges d'énergie avec l'extérieur sont possibles.

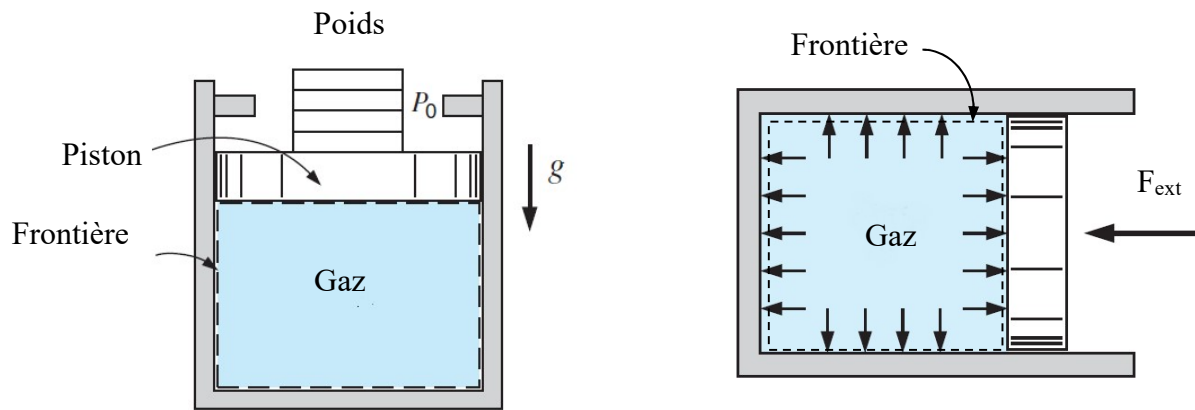


Figure I.1 Système fermé.

2.1.2 Un système ouvert et le volume de contrôle

Un système ouvert échange de la matière avec le milieu extérieur (c'est un système qui est caractérisé par le fait qu'un ou plusieurs de ces surfaces sont constamment traversé par un écoulement). Ce cas est très fréquent, pour l'étude on fait appel à la mécanique des fluides (Étude des écoulements), alors on étudie le débit de masse à travers un volume constant appelé **volume de contrôle**, si l'écoulement est stationnaire (indépendant du temps).

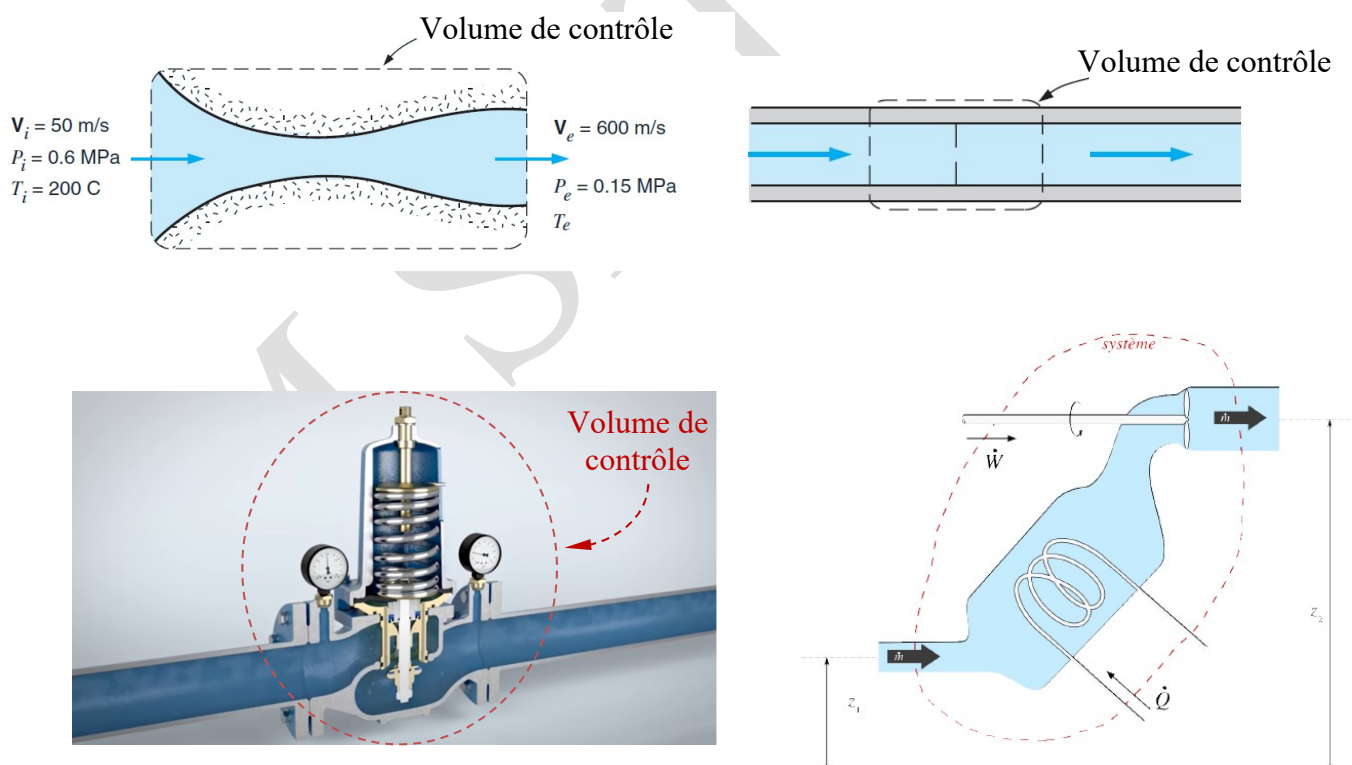


Figure I.2 Système ouvert.

2.1.3 Un système isolé

Le système est dit isolé s'il n'échange ni matière ni travail ni énergie avec le milieu extérieur.

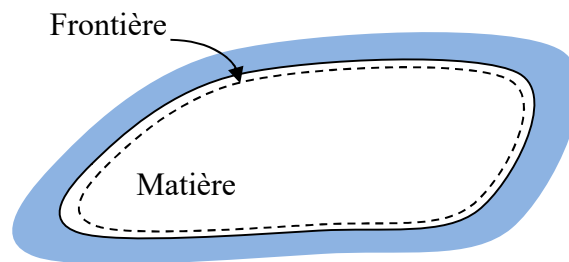


Figure I.3 Système isolé.

2.2 État d'un système thermodynamique

Pour décrire l'état d'un système thermodynamique, on utilise des **variables d'état**. Certaines variables dépendent de l'échelle du système (volume, masse, énergie, etc.) et sont appelées **variables extensives**; d'autres variables sont intrinsèques et ne dépendent pas de l'échelle (température, pression, etc.) et sont appelées **variables intensives**. Pour distinguer commodément les variables intensives et extensives.

Exemple:

Considérons un système qui passe d'un état (1) défini par P_1 à un état (2) défini par P_2 .

$$\Delta P = \int_1^2 \Delta p = P_2 - P_1$$

ΔP ne dépend que de l'état initial et de l'état final, donc ΔP est une différence totale exacte (La pression est une variable d'état). Les variables d'état peuvent décrire un état d'un système. Donc une grandeur sera une fonction d'état si sa variation entre les états 1 et 2 est indépendante du chemin suivi pour effectuer la transformation. En revanche, une grandeur dont la variation dépend du chemin suivi n'est pas une fonction d'état.

2.2.1 Variables intensives

Les variables intensives **ne dépendent pas de la masse et ne sont pas additives** du sous-ensemble. Le nombre de variables intensives indépendantes nécessaires pour décrire un état d'équilibre est appelé **la variance du système**.

2.2.2 Variables extensives

Les variables extensives **dépendent de la masse et sont additives** du sous-ensemble. Pour définir l'état extensif du système, il faut de plus préciser les valeurs d'une variable extensive de chacune des phases en présence.

La règle de phase de Gibbs permettant de déterminer le nombre de variables d'état nécessaires pour caractériser l'état (intensif ou extensif) d'un système sera introduite au chapitre 2.

Exemple:

$$\begin{array}{ccc}
 \boxed{\begin{array}{c} P \\ T \\ V \end{array}} & + & \boxed{\begin{array}{c} P \\ T \\ V \end{array}} = \boxed{\begin{array}{c} P \\ T \\ 2V \end{array}} \\
 \text{Masse (m)} & & \text{Masse (m)} & & \text{Masse (2m)} \\
 v=V/m & & v=V/m & & v=2V/2m=V/m
 \end{array}$$

La température et la pression sont des variables intensives et le volume est une variable extensive.

Remarque :

Toutes les variables d'état extensives ramenées à l'unité de masse deviennent intensives, tel que le volume massique (appelé aussi **volume spécifique**)

3 Équilibre thermodynamique

On dit qu'un système est en équilibre thermodynamique si et seulement si toutes les variables qui le décrivent sont constantes et uniformes. Pour qu'un système soit en équilibre thermodynamique il faut que les conditions d'équilibre mécanique, thermique et chimique soient satisfaites

- **Équilibre mécanique** : la pression du système est constante et uniforme.
- **Équilibre thermique** : la température dans le système est constante et uniforme.
- **Équilibre chimique** : la composition chimique est constante et uniforme.

4 Évolution et cycle

4.1 Changement d'état

L'étude d'un système matériel au cours de son évolution à l'aide d'un certain nombre de variables décrivant son état en fonction des échanges d'énergies mécaniques (travail) et thermiques (chaleur) avec le milieu extérieur au système.

4.2 Évolution

Un système thermodynamique peut subir une succession de changement (variation) entre les différents états, est dite évolution.

4.3 Évolution quasi statique

Certaines évolutions sont caractérisées par le fait qu'une variable reste constante au cours de ses évolutions le préfixe **iso** est utilisé pour les caractériser.

- Évolution isotherme : c'est une évolution à température constante.
- Évolution isobare : c'est une évolution à pression constante.
- Évolution isochore : c'est une isochore évolution à volume constant.

4.4 Cycle

Si un système dans son état initial ou à partir d'un état initial subit un certain nombre de changements d'état et revient à son état initial on dira que ce système a subi un cycle. Les variables d'état final ont les mêmes valeurs qu'à l'état initial.

5 Le principe zéro de la thermodynamique

Si deux systèmes sont en équilibre thermodynamique avec un troisième alors ils sont en équilibre dynamique entre eux.

$$\left. \begin{array}{l} \text{si (A) a la même température que (C)} \\ \text{si (B) a la même température que (C)} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{(A) et (B) ont la même température}$$

Une grandeur sera une fonction d'état si sa variation entre les états 1 et 2 est indépendante du chemin suivi pour effectuer la transformation. En revanche une grandeur dont la variation dépend du chemin suivi n'est pas une fonction d'état.

6 Volume massique (v volume spécifique)

$$\text{Volume massique} = \frac{\text{Volume}}{\text{masse}} \Leftrightarrow v = \frac{V}{m} \quad \text{Unité : } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (\text{variables intensives})$$

7 La température

La température (*variables intensives*) est une grandeur physique mesurée à l'aide d'un thermomètre et étudiée en thermométrie. Dans la vie courante, elle est reliée aux sensations de froid et de chaud, provenant du transfert thermique entre le corps humain et son environnement. L'échelle absolue de la température est le Kelvin [K].

$$\text{Avec : } T [\text{K}] = T [^{\circ}\text{C}] + 273.15$$

8 La pression

La pression (*variables intensives*) est une grandeur physique qui traduit les échanges de quantité de mouvement dans un système thermodynamique, et notamment au sein d'un solide ou d'un fluide. C'est une grandeur scalaire (ou tensorielle) intensive. L'unité de la pression s'exprime en pascal, de symbole Pa. L'analyse dimensionnelle montre que la pression est homogène à une force surfacique.

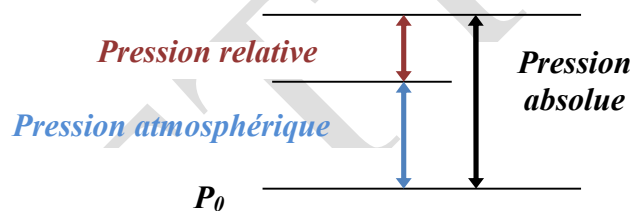
l'unité de la pression est le **pascale**, de symbole **Pa** ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$).

$$\text{Pression} = \frac{\text{Force}}{\text{Surface}} \Leftrightarrow P = \frac{F}{S} \text{ Unité } \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \equiv \text{Pa} \text{ (Pascale)}$$

La correspondance entre le pascal et les unités de pression n'appartenant pas au SI passe par la valeur standard de la pression atmosphérique :

Donc:

$$\begin{aligned} P_0 &= 1 \text{ atm} \approx 1 \text{ bar} & (1 \text{ atm} = 1,013 \, 25 \text{ bar} = 101 \, 325 \text{ Pa} = 1 \, 013,25 \text{ hPa}) \\ &= 10^5 \text{ Pa} = 10^2 \text{ kPa} & (1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2) \\ &= 0.1 \text{ MPa} \end{aligned}$$



$$\text{Pression absolue} = \text{Pression atmosphérique} + \text{Pression relative}$$

Le pascal étant une unité relativement petite par rapport aux valeurs usuelles, on utilise souvent ses multiples :

- l'**hectopascal** (hPa) : $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} = 100 \text{ N m}^{-2}$,
- le **kilopascal** (kPa) : $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa} = 1 \, 000 \text{ Pa} = 1 \, 000 \text{ N m}^{-2}$,
- le **mégapascal** (MPa) : $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \, 000 \, 000 \text{ Pa} = 1 \, 000 \, 000 \text{ N m}^{-2} = 1 \text{ N mm}^{-2}$,
- le **gigapascal** (GPa) : $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa} = 1 \, 000 \, 000 \, 000 \text{ Pa} = 1 \, 000 \, 000 \, 000 \text{ N m}^{-2} = 1 \text{ kN mm}^{-2}$,
- le **térapascal** (TPa) : $1 \text{ TPa} = 10^{12} \text{ Pa} = 1 \, 000 \, 000 \, 000 \, 000 \text{ Pa} = 1 \, 000 \, 000 \, 000 \, 000 \text{ N m}^{-2}$.

Les conversions vers des unités hors du SI :

- $1 \text{ Pa} \approx 7,500 \, 615 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ (millimètre de mercure ou torr),
- $1 \text{ Pa} \approx 9,869 \, 233 \times 10^{-6} \text{ atm}$ (atmosphère normale),
- $1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar}$,
- $1 \text{ hPa} = 10^{-3} \text{ bar} = 1 \text{ mbar}$ ou millibar,
- $1 \text{ Pa} \approx 1,42 \times 10^{-4} \text{ psi}$.