

Chapitre 1: Notions générales de thermodynamique et modes de transfert de chaleur

I.1 Introduction à la thermodynamique

La thermodynamique est une branche fondamentale de la physique qui s'intéresse à l'étude des échanges d'énergie, en particulier sous forme de chaleur et de travail, ainsi qu'aux transformations subies par les systèmes matériels. Elle constitue le socle théorique de nombreux domaines de l'ingénierie, notamment le génie thermique, le génie énergétique et le bâtiment. En pratique, la thermodynamique permet d'analyser le fonctionnement des systèmes de chauffage, de climatisation, de réfrigération et de production d'énergie, tout en mettant en évidence les limites physiques imposées par les lois naturelles.

I.2 Les concepts fondamentaux

I.2.1 Systèmes thermodynamiques

Un système thermodynamique est défini comme une portion de l'univers que l'on isole conceptuellement afin d'étudier ses échanges avec le milieu extérieur. Selon la nature de ces échanges, le système peut être ouvert, fermé ou isolé.

Un système ouvert échange simultanément de la matière et de l'énergie avec son environnement, comme c'est le cas d'un échangeur de chaleur ou d'une turbine.

Un système fermé, quant à lui, n'échange pas de matière mais peut échanger de l'énergie sous forme de chaleur ou de travail, par exemple un gaz contenu dans un cylindre muni d'un piston mobile.

Enfin, un système isolé n'échange ni matière ni énergie avec l'extérieur et constitue un modèle idéal rarement rencontré en pratique.

I.2.2 Grandeurs thermodynamiques et état du système

L'état thermodynamique d'un système est décrit à l'aide de grandeurs physiques mesurables appelées variables d'état, telles que la température, la pression, le volume ou encore l'énergie interne. Lorsque ces grandeurs sont connues, l'état du système est entièrement défini. Certaines grandeurs, dites intensives, sont indépendantes de la quantité de matière, comme la température et la pression, tandis que les grandeurs extensives, telles que l'énergie interne ou le volume, dépendent directement de la masse du système. Cette distinction est essentielle pour l'établissement des bilans énergétiques et l'analyse des transformations.

I.2.3 Transformations thermodynamiques

Une transformation thermodynamique correspond au passage d'un système d'un état initial à un état final. Elle peut être provoquée par un échange de chaleur, un échange de travail ou les deux simultanément. Pour faciliter l'analyse, on considère souvent des transformations idéales comme les transformations isothermes ($T = \text{Coste}$), isobares ($P = \text{Coste}$), isochoriques ($V = \text{Coste}$) ou adiabatiques ($Q = \text{Coste}$). Bien que ces transformations idéales soient rarement observées dans les systèmes réels, elles permettent de modéliser les phénomènes physiques et de comprendre le comportement global des systèmes thermiques.

I.2.4 Les lois fondamentales de la thermodynamique

I.2.4.1 Loi zéro de la thermodynamique

La loi zéro de la thermodynamique établit le concept fondamental d'équilibre thermique. Elle stipule que si deux systèmes sont chacun en équilibre thermique avec un troisième système, alors ils sont en équilibre thermique entre eux. Cette loi permet de définir la température comme une grandeur physique mesurable et justifie l'utilisation des thermomètres. Elle constitue ainsi la base de toute mesure thermique et de toute analyse des échanges de chaleur.

I.2.4.2 Première loi de la thermodynamique

La première loi de la thermodynamique exprime le principe de conservation de l'énergie. Elle affirme que la variation de l'énergie interne d'un système est égale aux échanges énergétiques aux frontières du système. Cette loi montre que l'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais seulement transformée. Elle est largement utilisée pour établir des bilans énergétiques dans les systèmes thermiques, qu'il s'agisse de moteurs, de cycles frigorifiques ou de bâtiments.

Pour un système fermé, le premier principe s'énonce comme suit :

$$\Delta U = Q - W \quad (1)$$

Dans le cas général, l'écriture de la première loi pour un système ouvert s'exprime sous la forme :

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} + \sum \dot{m}_{\text{entrée}} e_{\text{entrée}} - \sum \dot{m}_{\text{sortie}} e_{\text{sortie}} \quad (2)$$

I.2.4.3 Seconde loi de la thermodynamique

La deuxième loi de la thermodynamique introduit la notion d'irréversibilité des phénomènes naturels. Elle précise que la chaleur se transfère spontanément d'un corps chaud vers un corps froid et jamais l'inverse sans apport d'énergie extérieure. Cette loi introduit également le concept d'entropie (S), qui permet de quantifier le degré de désordre et d'irréversibilité d'un système. Elle montre que toute transformation réelle s'accompagne d'une production d'entropie, ce qui impose des limites aux rendements des machines thermiques.

La loi de l'accroissement de l'entropie constitue l'expression mathématique du second principe. Elle stipule que, pour tout processus réel et irréversible, l'entropie totale de l'univers, constitué du système étudié et de son environnement, ne peut qu'augmenter.

$$\Delta S_{\text{univers}} = \Delta S_{\text{système}} + \Delta S_{\text{extérieur}} \geq 0 \quad (3)$$

Pour une transformation réversible, la variation d'entropie de l'univers est nulle, tandis que pour une transformation réelle irréversible, elle est strictement positive.

I.2.5 Chaleur et travail

La chaleur et le travail sont deux modes distincts de transfert d'énergie entre un système et son environnement. La chaleur est une énergie échangée uniquement en raison d'une différence de température, tandis que le travail correspond à une énergie échangée sous l'effet de forces macroscopiques, comme lors de la compression ou de l'expansion d'un gaz. Il est important de

souligner que la chaleur et le travail ne sont pas des propriétés du système, mais dépendent du processus suivi lors de la transformation.

I.3 Généralités sur les modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est le processus par lequel l'énergie thermique se déplace d'une région à température élevée vers une région à température plus basse. Ce transfert peut s'effectuer selon trois modes fondamentaux : la conduction, la convection et le rayonnement. Dans les systèmes réels, ces modes agissent souvent simultanément, notamment dans le domaine du bâtiment, où les échanges thermiques à travers les parois font intervenir plusieurs mécanismes à la fois.

I.3.1 Conduction thermique

La conduction thermique est un mode de transfert de chaleur qui se produit au sein des milieux solides ou des fluides immobiles. Elle résulte des interactions microscopiques entre les particules du matériau, sous l'effet d'un gradient de température. La loi de Fourier décrit ce phénomène en reliant le flux de chaleur à la conductivité thermique du matériau et au gradient de température :

$$\vec{\phi} = -\lambda S \nabla T \quad (4)$$

Où $\vec{\phi}$ représente le vecteur de flux thermique exprimé en W, ∇T le gradient de température dans l'espace, et λ la conductivité thermique du matériau. Le signe négatif indique que le flux de chaleur est orienté dans le sens opposé à l'augmentation de la température, traduisant ainsi le transfert spontané de la chaleur des régions chaudes vers les régions froides.

La conductivité thermique λ est une propriété physique intrinsèque du matériau qui caractérise son aptitude à conduire la chaleur. Elle dépend de la nature du matériau, de sa structure microscopique, de sa densité et, dans certains cas, de la température. Les matériaux présentant une conductivité thermique élevée, tels que les métaux ou le béton dense, favorisent le transfert rapide de chaleur et sont qualifiés de bons conducteurs thermiques. À l'inverse, les matériaux à faible conductivité thermique, comme la laine minérale, le liège ou les matériaux biosourcés, limitent le flux thermique et sont utilisés comme isolants. Dans le domaine du bâtiment, la maîtrise de la conductivité thermique des matériaux est un paramètre clé pour réduire les pertes énergétiques, améliorer le confort thermique et optimiser la performance énergétique globale des enveloppes.

I.3.1.1 Résistance thermique R

Dans le domaine du bâtiment, l'analyse des transferts thermiques à travers les parois s'appuie sur les notions de résistance thermique et de coefficient de transmission thermique, qui permettent de quantifier la capacité d'un élément constructif à s'opposer au flux de chaleur. La résistance thermique, notée R , caractérise l'aptitude d'une couche de matériau à freiner le transfert de chaleur par conduction. Pour une paroi plane homogène d'épaisseur e et de conductivité thermique λ , la résistance thermique s'exprime par la relation :

$$R = \frac{e}{\lambda S} \quad (5)$$

Où R est exprimée en K/W , e en mètres et λ en $W/m \cdot K$. Plus la résistance thermique est élevée, plus la paroi est performante du point de vue de l'isolation thermique. Dans le cas des parois multicouches, la résistance thermique totale est obtenue en additionnant les résistances thermiques de chaque couche ainsi que les résistances superficielles intérieure et extérieure liées aux échanges convectifs et radiatifs :

$$R_{tot} = R_{si} + \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se} \quad (6)$$

I.3.1.2 Coefficient de transmission thermique U

Le coefficient de transmission thermique, communément appelé coefficient U , représente la quantité de chaleur transmise à travers une paroi par unité de surface et par degré de différence de température entre les ambiances intérieure et extérieure. Il est défini comme l'inverse de la résistance thermique totale :

$$U = 1/R_{tot} \quad (7)$$

et s'exprime en W/K .

Une faible valeur du coefficient U traduit une bonne performance thermique de la paroi. À titre indicatif, dans le bâtiment, les résistances superficielles normalisées prennent généralement des valeurs de l'ordre de $R_{si} \approx 0,13 \text{ m}^2 \cdot K/W$ pour la face intérieure et $R_{se} \approx 0,04 \text{ m}^2 \cdot K/W$ pour la face extérieure. Les résistances thermiques des matériaux de construction varient fortement selon leur nature : un mur en béton plein de 20 cm d'épaisseur présente une résistance thermique de l'ordre de $R \approx 0,10$ à $0,15 \text{ m}^2 \cdot K$, tandis qu'une couche de laine minérale de 10 cm peut atteindre une résistance thermique comprise entre $R \approx 2,5$ et $3,0 \text{ m}^2 \cdot K/W$. Dans les bâtiments performants, les exigences réglementaires conduisent généralement à des résistances thermiques globales supérieures à 3 à $5 \text{ m}^2 \cdot K/W$ pour les murs et pouvant dépasser $6 \text{ m}^2 \cdot K/W$ pour les toitures, ce qui correspond à des coefficients U inférieurs à $0,30 \text{ W/m}^2 \cdot K$ pour les murs et à $0,15 \text{ W/m}^2 \cdot K$ pour les toitures.

I.3.2 Convection thermique

La convection thermique est un mode de transfert de chaleur qui se produit entre une surface solide et un fluide en mouvement (Ex. Air, eau). Dans le bâtiment, elle intervient principalement aux interfaces entre les parois (murs, toiture, vitrages) et l'air intérieur ou extérieur. Contrairement à la conduction, qui se fait à l'intérieur d'un matériau immobile, la convection résulte du déplacement du fluide sous l'effet des différences de température. Lorsqu'une paroi est plus chaude que l'air ambiant, elle transmet de la chaleur à l'air voisin, qui se dilate, devient plus léger et s'élève : on parle de convection naturelle. Si le mouvement d'air est provoqué par un ventilateur ou le vent, il s'agit de convection forcée.

Le flux thermique convectif est modélisé par la loi de Newton donnée par la formule suivante :

$$\Phi_{conv} = h A (T_s - T_{\infty}) \quad (8)$$

Où h est le coefficient d'échange convectif (en $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), A la surface d'échange (en m^2), T_s la température de la surface et T_∞ la température du fluide loin de la surface. Le coefficient h dépend de la nature du fluide, de la vitesse d'écoulement et de l'orientation de la paroi. Dans le bâtiment, les valeurs typiques sont de l'ordre de 5 à 10 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ pour la convection naturelle intérieure, et peuvent atteindre 20 à 30 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ à l'extérieur sous l'effet du vent.

La convection joue un rôle essentiel dans le calcul des résistances thermiques superficielles, qui interviennent dans la détermination du coefficient global de transmission thermique U . Elle influence donc directement les pertes énergétiques du bâtiment et le confort thermique des occupants.

I.3.2.1 Couche limite thermique

Lorsque qu'une paroi est à une température T_s différente de celle de l'air ambiant T_∞ , il se forme au voisinage immédiat du mur une zone appelée *couche limite thermique*, d'épaisseur δ_t , dans laquelle la température varie progressivement entre T_s et T_∞ . Le gradient de température dans cette zone peut être approximé par :

$$\frac{dT}{dy} \approx \left(\frac{T_s - T_\infty}{\delta_t} \right) \quad (9)$$

Selon la loi de Fourier appliquée localement dans le fluide au contact de la paroi, le flux thermique vaut:

$$\varphi = -\lambda \left(\frac{dT}{dy} \right) \quad (10)$$

Ce qui conduit, en utilisant l'approximation précédente, à:

$$\varphi \approx \lambda \left(\frac{T_s - T_\infty}{\delta_t} \right) \quad (10)$$

On observe donc que le flux thermique est inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche limite : plus δ_t est faible, plus le gradient de température est important et plus le transfert thermique est élevé. En convection, on écrit également le flux sous la forme :

$$\varphi = h (T_s - T_\infty) \quad (11)$$

Ce qui permet d'identifier:

$$h \approx \frac{\lambda}{\delta_t} \quad (12)$$

Ainsi, lorsque l'air circule rapidement (vent ou ventilation), l'air chaud au contact du mur est continuellement renouvelé, ce qui empêche l'épaississement de la couche limite thermique ; l'épaisseur δ_t diminue alors, le coefficient d'échange convectif h augmente, et par conséquent les pertes thermiques deviennent plus importantes. Cette relation explique pourquoi les parois extérieures d'un bâtiment subissent des pertes de chaleur plus élevées en présence de vent.

I.3.3 Rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est un mode de transfert de chaleur qui ne nécessite aucun milieu matériel et qui s'effectue par émission d'ondes électromagnétiques. Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu émet un rayonnement thermique. Dans le bâtiment, ce phénomène intervient notamment entre les parois intérieures, entre une surface et le ciel, ou encore au niveau des vitrages exposés au soleil. Contrairement à la conduction et à la convection, le rayonnement dépend fortement de la température absolue des surfaces et de leurs propriétés radiatives. Le flux radiatif émis par une surface est donné par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi = \varepsilon \sigma A(T_s^4) \quad (13)$$

Où ε est l'émissivité de la surface (comprise entre 0 et 1), $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ est la constante de Stefan-Boltzmann, A la surface d'échange et T la température absolue en kelvins.

Dans le cas d'un échange radiatif entre deux surfaces à températures T_1 et T_2 , le flux net s'écrit :

$$\Phi_{net} = \varepsilon \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (14)$$

Ce transfert augmente très rapidement avec la température en raison de la dépendance en T^4 . Dans les bâtiments, le rayonnement contribue au confort thermique ressenti par les occupants, car une paroi froide peut absorber du rayonnement du corps humain, générant une sensation d'inconfort même si l'air est chaud. Le rayonnement thermique joue également un rôle important dans les pertes nocturnes des toitures vers le ciel et dans les apports solaires à travers les vitrages.

Remarque:

On peut avoir froid dans une pièce chaude si les murs sont froids, car le corps perd de la chaleur par rayonnement vers ces surfaces.

I.3.3.1 Propriétés radiatives des surfaces : émissivité, réflectivité et absorptivité

Les échanges radiatifs dépendent fortement des propriétés de surface des matériaux. L'**émissivité** (ε) caractérise la capacité d'une surface à émettre du rayonnement thermique ; elle varie de 0 (surface parfaitement réfléchissante, qui n'émet presque rien) à 1 (corps noir, qui émet le maximum possible à sa température). La **réflectivité** (ρ) indique la fraction du rayonnement incident qui est renvoyée par la surface, tandis que l'**absorptivité** (α) correspond à la fraction du rayonnement absorbée et transformée en énergie thermique. Ces grandeurs sont liées par la relation :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (15)$$

Où τ est la **transmissivité** (fraction traversant le matériau), souvent négligeable pour les surfaces opaques. Dans le bâtiment, les matériaux sombres ont une **émissivité et une absorptivité élevées**, ce qui leur permet d'absorber et de rayonner efficacement la chaleur, tandis que les matériaux clairs ou métallisés ont une **réflectivité élevée** et limitent le rayonnement, ce qui est utile pour réduire les apports solaires ou les pertes nocturnes.

Le Tableau suivant regroupe les propriétés de surface de certains matériaux de construction utilisés en Algérie.

Tableau I.1 Propriétés de surface de certains matériaux de construction utilisés en Algérie.

Matériau	Émissivité (ϵ)	Absorptivité (α)	Réfectivité (ρ)	Transmissivité (τ)	Remarques thermiques
Brique rouge	0,85 – 0,95	0,85 – 0,95	0,05 – 0,15	≈ 0	Opaque, absorbe bien le rayonnement, restitue efficacement la chaleur (rayonnement et inertie thermique élevée). Idéale pour stocker et restituer la chaleur.
Parpaing	0,70 – 0,90	0,70 – 0,90	0,10 – 0,30	≈ 0	Opaque, moins dense que la brique, absorbe le rayonnement mais restitue la chaleur plus rapidement (moins d'inertie). Isolation thermique modérée.
Porte métallique	0,05 – 0,20	0,05 – 0,20	0,80 – 0,95	≈ 0	Opaque, réfléchit la majeure partie du rayonnement, émet très peu de chaleur, très faible inertie thermique. Le métal se refroidit et se réchauffe rapidement.