

1- Généralités

1.1- Introduction

Le transfert de chaleur (ou transmission de la chaleur ou encore thermocinétique) est devenue une science très vaste dont certaines lois remontent à 1811 ou plus loin, mais qui subit depuis quelques décennies une étude intensive due aux exigences des technologies nucléaire, solaire et aérospatiale. De plus, la prise de conscience du fait que les sources d'énergie courantes ne sont pas renouvelables et que leur utilisation contribue à la détérioration de l'environnement a été le point de départ de différentes mesures visant à limiter la consommation de l'énergie, notamment dans le domaine du chauffage. C'est pour cette raison que la réglementation thermique de la construction neuve a évolué dans ce sens depuis les années 70.

Avec le développement prodigieux des techniques modernes, il est devenu indispensable à tout ingénieur, quel que soit le domaine où il sera appelé à œuvrer, de posséder une sérieuse connaissance des lois du transfert thermique. Même dans le domaine de la médecine, le corps humain lui-même n'échappe pas à ces lois. Tout cela est dû au fait qu'il est difficile de trouver une activité humaine où n'intervient pas un échange de chaleur puisque ce dernier intervient dès qu'il existe une différence de température dans le système.

Le transfert de chaleur s'effectue habituellement selon trois modes: par conduction, par convection et par rayonnement. Seuls la conduction et le rayonnement sont des modes fondamentaux de transfert de chaleur; la convection, tout en étant très importante, ne fait que combiner la conduction avec un transfert de matière.

Dans la pratique, il est rare qu'une situation particulière ne concerne qu'un seul mode; le plus souvent, deux sinon trois modes entrent en jeu. C'est à l'ingénieur de savoir poser correctement les hypothèses simplificatrices de son problème et établir éventuellement le modèle mathématique afin de négliger par exemple les modes qui ne sont pas prédominants et de ne considérer que le mode prépondérant.

1.2- Définitions

1.2.1- La thermodynamique et le transfert de chaleur

La thermodynamique (ou *thermostatique*) qui étudie la conversion des différentes formes d'énergies entre elles, s'intéresse surtout aux conditions d'équilibre; elle n'envisage pas la vitesse avec laquelle les échanges d'énergie ont lieu, en principe, en l'absence de la variable temps. Au contraire, le transfert thermique (ou *thermocinétique*) s'intéresse surtout à la détermination des quantités de chaleur échangées par unité de temps et de surface. La thermodynamique rend de très précieux services à l'ingénieur. Cependant, elle est incapable de donner les indications sur les dimensions requises (surface d'échange) qui dépendent essentiellement de la cinétique de l'échange thermique.

1.2.2- Chaleur, chaleur latente, sensible et spécifique

Le mode de transfert d'énergie entre deux corps s'effectue sous forme d'énergie cinétique d'agitation moléculaire désordonnée. Il est le fait d'une différence de température entre deux corps. La chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, élevant ainsi la température de ce dernier, tout en abaissant celle du premier. La chaleur ne se propage d'un corps froid vers un corps chaud qu'à la condition de fournir un travail.

La chaleur est une forme particulière d'énergie dont l'unité internationale est le joule [J]. L'ancienne unité, la calorie (1 cal = 4.185 J) qui est définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever 1g d'eau de 1 °C reste cependant encore utilisée pour exprimer une quantité de chaleur.

On distingue deux formes de chaleur, la chaleur latente et la chaleur sensible. On parle de *chaleur latente* lorsque le corps qui reçoit ou qui cède de la chaleur l'utilise pour changer d'état sans que sa température varie: par exemple il faut fournir 335 KJ (80 Kcal) pour fondre 1 Kg de glace, et 2260 KJ (540 Kcal) pour évaporer 1 Kg d'eau. Lorsque le corps qui reçoit ou cède de la chaleur s'échauffe ou se refroidit sans changer d'état, on parle alors de *chaleur sensible*.

Pour relier la variation de température ΔT que va subir un corps à la quantité de chaleur ΔQ qu'il reçoit ou cède et à sa masse m , il faut connaître sa chaleur spécifique c_p :

$$\Delta Q = m c_p \Delta T \quad (1.1)$$

La chaleur spécifique à pression constante s'exprime en [J/Kg °K]. Le tableau ci-dessous nous situe l'ordre de grandeur des C_p de diverses matières.

Matière	Chaleur spécifique C_p [KJ/Kg °K]
Acier inox	0.46
Aluminium	0.896
Air sec à 20 °C, 1 atm	1.012
Glace à 0 °C	2.26
Eau à 20 °C	4.182
Verre courant à 20 °C	0.67
Brique rouge	0.84-0.88
Laine de verre	0.67
Verre	0.67-0.779
Bois	2.39-2.72
Béton armé fourré	0.84
Béton de laitier	0.80
Plaque de liège	1.76

Tab.1.1- Chaleur spécifique à pression constante de diverses matières.

Il existe des relations empiriques, qui permettent de déterminer le coefficient c_p par exemple pour l'eau en [J/Kg°K] :

$$c_p = 4176.2 - 0.0909T + 5.4731 \cdot 10^{-3} T^2$$

en encore

$$c_p = 4186.74 - 0.44876T - 0.943717 \cdot 10^{-2} T^2 + 0.749972 \cdot 10^{-4} T^3$$

Cette dernière n'étant valable que dans la plage des températures allant de 0.01 à 270 °C avec une incertitude relative maximale de 0.7 %.

1.2.3- Régime permanent, variable et quasi-stationnaire

On dit qu'un régime est *permanent* (ou *stationnaire*) quand, en tout point du système, les températures ne dépendent pas du temps. Dans le cas contraire, le régime est dit *instationnaire*, *variable* ou parfois *transitoire*. Le régime est dit périodique (ou quasi-stationnaire) quand, en chaque point la température varie d'une façon cyclique selon une loi donnée. Le terme quasi-

stationnaire est parfois utilisé dans le cas des sources de chaleur en mouvement (soudure par exemple) car pour un observateur lié à la source, le système apparaît stationnaire.

1.2.4- Champ de température

En chaque point d'un milieu, la température est définie par une fonction $T = f(x, y, z, t)$ où x, y et z sont les coordonnées du point considéré et t le temps.

Si la température ne dépend que d'une seule coordonnée, x par exemple, on dira que le champ est unidimensionnel $T = f(x, t)$.

1.2.5- Surfaces isothermes

C'est le lieu des points ayant à chaque instant la même température. Dans chaque corps, il existe à chaque instant une famille de surfaces isothermes qui ne peuvent se couper.

1.2.6- Gradient de température et divergence

C'est l'opérateur mathématique défini par:

$$\overrightarrow{\text{grad}} T = \vec{\nabla} T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (1.2)$$

donc c'est un vecteur orienté dans la direction dans laquelle la variation de la température par unité de longueur est la plus forte c'est-à-dire, normale à la surface isotherme passant par ce point. Il est positif dans la direction des températures croissantes (Fig.1.1).

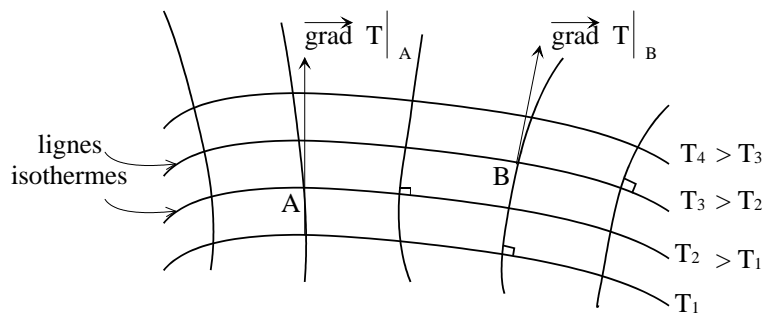


Fig.1.1- Isothermes et gradient de température.

L'opérateur mathématique divergence, quant à lui, est défini par :

$$\operatorname{div} T = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.3)$$

1.2.7- Conductibilité thermique

La conductibilité thermique est une propriété importante des matériaux. Elle détermine souvent, en régime stationnaire, l'aptitude d'un matériau à conduire plus ou moins la chaleur en vue d'une application thermique déterminée. Pour simplifier dans ce contexte, on dira que la conductibilité thermique, caractérisée par le *coefficient de conductivité thermique* λ , dépend du matériau et de la température comme le montre le tableau ci-dessous:

Matière	Conductivité thermique λ [W/m °K]
Acier	13 – 73
Aluminium	204
Air immobile à 20 °C	0.0251
Glace à –10 °C	2.33
Eau immobile à 20 °C	0.597
Cuivre	380
Brique rouge	0.70-0.81
Laine de verre	0.051-0.059
Verre	0.74-3.05
Bois	0.20-0.72
Béton armé fourré	1.55
Béton de laitier	0.70
Plaque de liège à °C	0.07

Tab.1.2- Conductivité thermique de diverses matières.

De même que pour le coefficient C_p , il existe des relations empiriques par exemple pour l'eau :

$$\lambda = 0.569 + 1.88857 \cdot 10^{-3} T - 7.85700 \cdot 10^{-6} T^2$$

équation valable dans la plage des températures allant de 0.01 à 130 °C avec une incertitude relative maximale de 0.9 %.

D'après ce tableau, nous constatons que la conductibilité thermique des solides est plus grande que celle des liquides qui dépasse, à son tour, celle des gaz.

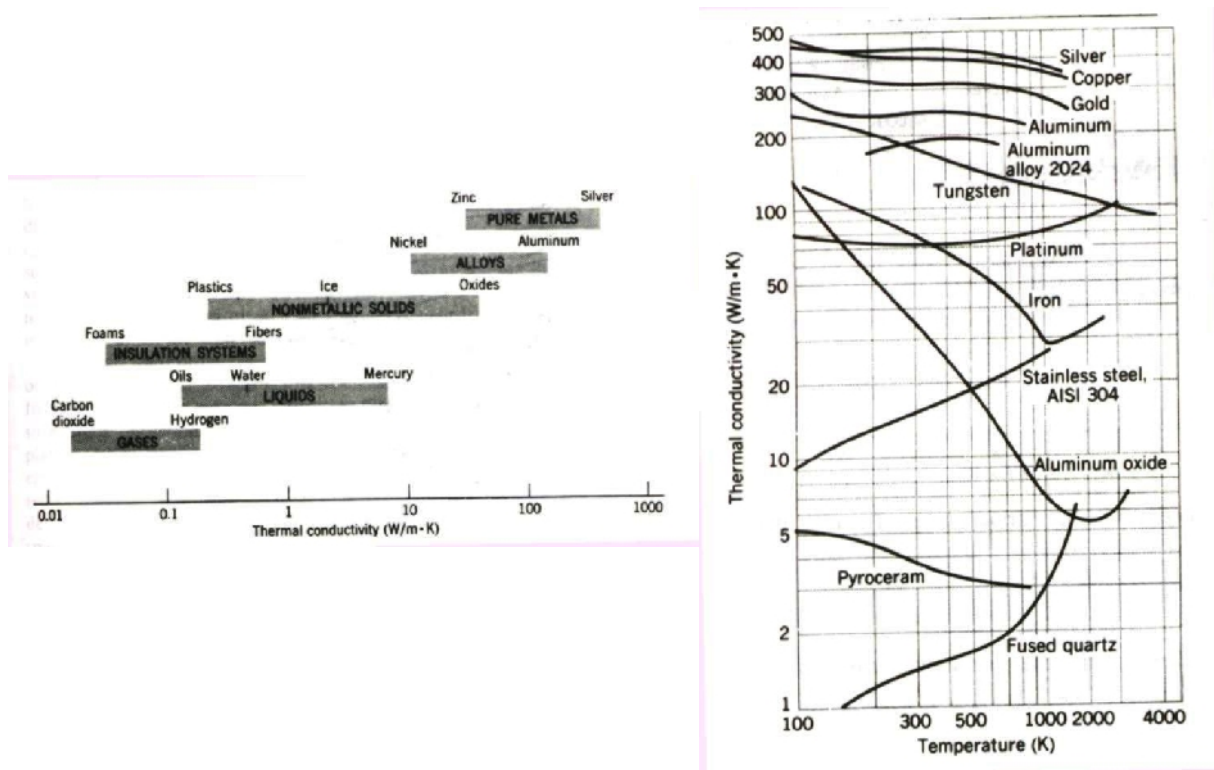


Fig.1.2- Conductibilité thermique de certains matériaux [6].

1.3- Conduction

Le mode de transfert de chaleur par conduction (ou encore diffusion) est provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux, ou encore entre deux milieu en contact physique; il n'y a pas de déplacement appréciable des molécules. Donc même si la conduction existe dans les fluides, on ne s'intéresse à ce phénomène que dans les seuls cas où le mouvement du fluide est impossible (couche limite au voisinage d'un corps solide, fluide enfermé dans les petits ports d'un solide, ...etc). En pratique, la conduction est presque toujours combinée à la convection et parfois au rayonnement.

La conduction est le seule mode qui permet un transfert de chaleur efficace à travers les solides opaques. Lorsque l'on chauffe l'une des extrémités d'une barre métallique, la chaleur se transmet par conduction à l'autre extrémité plus froide. Le mécanisme exacte de la conduction dans les solides n'est toujours pas totalement élucidé, mais découle surtout du mouvement des électrons

libres dans le corps, enclenché dès que s'y établit une différence de température. Ainsi, les bon conducteurs de chaleur sont en général de bon conducteurs électriques (or, argent, cuivre, aluminium, ...etc). Dans de nombreuses applications industrielles, il est nécessaire de connaître la vitesse de propagation de la chaleur dans un solide pour une différence de température donnée. On fait alors appel à des techniques de calculs mathématiques sophistiqués, souvent effectués au moyen d'ordinateur (pas de solution analytique).

1.4- Convection

Dans un champ de gravitation, toute différence de température dans un liquide ou un gaz modifie sa densité, un mouvement se produisant alors au sein du fluide. Ce mouvement de brassage, dans lequel les parties les plus chaudes du fluide ont tendance à s'élever et les parties froides et denses à descendre, s'appelle convection. Les mouvements dus uniquement à des différences de température du fluide constituent la *convection naturelle* (ou convection libre). Si le mouvement du fluide est renforcé par un travail mécanique (ventilateur, pompe,...etc), on parle alors de *convection forcée*.

La convection est un mode de transfert plus rapide que la conduction puisque la chaleur n'a pas à diffuser, mais à se laisser passivement véhiculer par le fluide.

1.5- Rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement se produit entre deux surfaces par l'émission et l'absorption de radiations électromagnétiques. Contrairement aux autres modes (conduction et convection), le rayonnement ne requiert aucun milieu physique pour sa propagation: il se propage même dans un vide parfait. De ce fait, le transfert de chaleur par rayonnement est plus efficace par rapport aux deux autres modes. C'est aussi le plus intéressant et le plus difficile (théorie).

Le transfert de chaleur par rayonnement obéit à la loi de Stefan qui indique que la puissance totalement émise (toutes longueurs d'onde comprises) par un corps chauffé est proportionnelle à la température absolue du corps élevée à la puissance quatre. Ainsi, plus la température est élevée, plus la puissance émise est importante.

Notons enfin que les surfaces opaques peuvent absorber ou réfléchir les rayonnement incidents et qu'en général, les surfaces mates et rugueuses absorbent mieux le rayonnement que les surfaces brillantes et polies.

1.6- Récupérateurs de chaleur

On appelle récupérateur de chaleur ou *échangeur de chaleur* tout appareil dans lequel de la chaleur est transmise d'un fluide à un autre. Dans l'industrie thermique, ce sont des appareils dans lesquels il y a échange de chaleur entre vapeur, eau chaude ou encore eau surchauffée. Ces appareils sont généralement constitués d'un corps extérieur, d'un faisceau de tubes dans lesquels circule le fluide primaire et d'une chambre d'admission et de départ du fluide secondaire.

Il existe plusieurs types de récupérateurs de chaleur qui sont principalement choisis en fonction des puissances thermiques à transférer, de leur efficacité ainsi que de leurs coûts.