



LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR

notions préliminaires

la thermique

La thermique est la science relative à la chaleur.

Si depuis toujours l'homme avait constaté les effets de la chaleur : dilatation, fusion, ébullition et ceux inverses du froid : rétractation, solidification, liquéfaction, il n'en avait pas tiré de lois jusqu'à un passé récent.

Les mesures de températures datent du début du 18^e siècle.

Le premier thermomètre à mercure fut construit par FAHRENHEIT, physicien prussien (1686-1736). CELSIUS (1704-1744) physicien suédois, proposa en 1742 la division centésimale couramment employée de nos jours.

Les premières mesures calorimétriques furent l'œuvre de LAVOISIER et LAPLACE.

la chaleur

La chaleur peut se définir comme une sensation. Celle que nous éprouvons devant

un foyer en activité par exemple.

La chaleur est produite :

- par la combustion principalement ;
- par le frottement de deux corps ;
- par le passage du courant électrique ;
- par la compression brusque d'un gaz ;

— par certaines réactions chimiques et nucléaires.

La principale source de chaleur est le soleil.

La chaleur est une forme de l'énergie et elle peut produire du travail.

le froid

Le mot « froid » est employé pour définir l'absence de chaleur.

Par comparaison, le froid est

à la chaleur ce que l'obscurité est à la lumière. Froid et obscurité sont des termes négatifs.

la température

La température caractérise l'action plus ou moins énergétique de la chaleur sur nos sens. C'est elle qui nous permet de dire qu'un corps est plus ou moins chaud qu'un autre.

Mais qu'est-ce que la température ?

Il a fallu attendre les progrès de la physique moderne pour connaître la réponse à cette question :

Toute la matière qui nous entoure, qu'il s'agisse de solides, de liquides ou de gaz, est formée de particules et celles-ci ne sont jamais en repos.

La température d'un corps ne traduit pas autre chose que l'énergie d'agitation des particules qui le constituent.

Chauffer un corps revient à apporter aux particules de ce corps un supplément d'énergie, de sorte que leur vitesse d'agitation deviendra plus grande.

En conséquence, on peut admettre des vitesses d'agitation

de plus en plus grandes et qu'il n'y ait pas de limite supérieure à la température.

Par contre, en concevant des agitations de plus en plus faibles, un moment arrive où l'on doit atteindre le stade du repos au delà duquel on ne peut évidemment imaginer d'agitation moindre. Autrement dit, il existe dans le domaine des basses températures un « point d'arrêt » : il se situe à $-273,16$ °C et c'est à cette limite que l'on donne le nom de **zéro absolu**.

La température se mesure par rapport à des étalons conventionnels. Dans le système centésimal les deux points fixes choisis par CELSIUS sont la température de la glace fondante et celle de l'eau bouillante (sous la pression de 76 cm de mercure).

Deux unités sont employées pour définir les températures :

— le degré KELVIN (°K) pour les températures absolues (T),

— le degré CELSIUS (°C) pour les températures usuelles (t).

la quantité de chaleur

Pour élever un poids à une hauteur donnée, il faut dépenser d'autant plus d'énergie que le poids est plus lourd.

De même, si nous voulons élever la température d'un certain corps il faudra lui fournir une quantité d'énergie

calorifique croissant avec le nombre de degrés que nous voulons gagner.

Faisons l'expérience suivante:

Prenons un réchaud électrique du commerce de 120 volts et 5 ampères. Sa puissance est de 600 watts et il dégage à chaque seconde une certaine quantité d'énergie calorifique.

Sur ce réchaud, disposons un litre d'eau. Pour élever ce litre d'eau de 80 degrés (par exemple de 20 °C à 100 °C), il faut

555 secondes, soit approximativement 10 minutes.

Dans les mêmes conditions, disposons deux litres d'eau. Pour avoir le même gain de 80 degrés Celsius, il faudra le double de temps, soit environ 20 minutes.

On voit que, contrairement à la température qui n'est qu'un simple repère dans l'échelle du chaud et du froid, **la quantité de chaleur est mesurable.**

Elle est généralement symbolisée par la lettre Q.

unités de quantité de chaleur

Tout travail s'accompagne d'un dégagement de chaleur. Inversement la chaleur permet la production de travail (moteurs thermiques).

La première loi de la thermodynamique est la loi de la conservation de l'énergie : « dans un cycle thermodynamique, la variation d'énergie d'un système : E, est égale à la somme de l'énergie mécanique W et de l'énergie thermique Q fournies ».

$$E = Q + W$$

Le travail s'exprimant en joule (J) il est normal d'exprimer les quantités de chaleur dans la même unité.

Rappelons sa définition : « le joule est le travail produit par une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force ».

Les thermiciens utilisent toutefois une unité traditionnelle: la kilocalorie qui se définit comme la quantité de chaleur à fournir à un kilogramme d'eau pour porter sa température de 14,5 °C à 15,5 °C.

L'équivalent mécanique de la kilocalorie est le nombre 4 186.

Autrement dit :

$$1 \text{ kcal} = 4 186 \text{ joules}$$

On sait que le système d'unités légal en France, depuis le

1^{er} Janvier 1962, est le système international (S.I.). Il retient le **joule** comme unité de quantité de chaleur et tolère l'emploi de la kilocalorie.

On peut avoir à exprimer des quantités de chaleur par unité de temps, par exemple : **la puissance** d'une installation de chauffage. Nous aurons soit des **watts** (joule/seconde) unité de puissance mécanique soit des kilocalories/heures.

Les chiffres exprimant les valeurs trouvées seront très voisins :

$$\begin{aligned} 1 \text{ W} &= 0,860 \text{ kcal/h} \\ 1 \text{ kcal/h} &= 1,163 \text{ W} \end{aligned}$$

Il est donc indispensable, pour éviter toute confusion, de bien mentionner après chaque valeur l'unité employée.

Chaleur massique

Par définition la chaleur massique est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 kg de ce corps.

La quantité de chaleur nécessaire pour élever une masse "m" d'un corps de Δt °C est donnée par la relation :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$

Elle s'exprime en joule lorsque c est donnée en J/kg ou en kcal si c est donnée en kcal/kg.

Il ressort de la définition de la kilocalorie que la chaleur massique de l'eau est 1 kcal (4 186 joules).

La valeur donnée pour la cha-

leur massique d'un gaz correspond à l'hypothèse que l'échauffement se fait à pression constante.

On note cette chaleur : c_p

QUELQUES CHALEURS MASSIQUES

Air	1 000 J/kg
Eau	4 180 »
Vapeur d'eau	1 900 »
Glace	2 100 »
Fibres de verre	837 »
Polystyrène expansé	1 380 »
Verre cellulaire	837 »

Chaleurs latentes

Tout changement d'état d'un corps s'effectue à température constante (loi des phases). Ainsi la transformation de l'eau en glace s'effectue à 0 °C, et tant que le mélange contient une partie en phase liquide, la température ne baissera pas en dessous de 0 °C. Mais ces transformations absorbent ou dégagent une certaine quantité de chaleur. Ces quantités sont appelées : **chaleurs latentes** parce que non apparentes. On leur

oppose les **chaleurs sensibles** qui se manifestent, par exemple, par une augmentation de température.

On distingue :

- **la chaleur de vaporisation** d'un liquide : c'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kg de ce liquide, à la température t , pour le transformer en vapeur saturante. Par exemple la chaleur de vaporisation de l'eau à 100 °C est de 2 250 kJ/kg.
- **la chaleur de fusion** d'un

corps solide : c'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kg de ce corps pour le fondre à la température de transformation.

Par exemple la glace à 0 °C doit recevoir 385 kJ/kg pour devenir de l'eau. Inversement il faudra absorber 385 kJ/kg pour transformer l'eau à 0 °C en glace :

- **la chaleur de solidification** égale à la chaleur de fusion,
- **la chaleur de condensation** égale à la chaleur de vaporisation.

notion d'enthalpie

L'énergie E d'un système thermodynamique est la somme de trois énergies :

- **l'énergie potentielle** E_g due au champ de la pesanteur :

$$E_g = m g z$$

m : masse,

g : accélération de la pesanteur,

z : altitude.

- **l'énergie cinétique** E_c due à la vitesse :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

v = vitesse

- **l'énergie interne** E_i liée à l'énergie des molécules et atomes.

Cette dernière énergie est beaucoup plus difficile à calculer que les précédentes et son étude est en fait l'essentiel de la thermodynamique. Pour simplifier cette étude on introduit en dehors des notions de pression p , de volume V et de températures T d'un fluide la notion d'**enthalpie** qui correspond à l'ancienne notion de chaleur totale.

On note l'enthalpie : H .

S'agissant d'une énergie elle s'exprime en joule (ou en kcal). Le plus souvent il s'agit d'enthalpie massique même si le terme massique ne figure pas.

Explicitons cette notion :

Si nous chauffons un corps à pression constante pour accroître son énergie interne, nous produisons une dilatation, c'est-à-dire un travail.

$$W = p (V_2 - V_1)$$

En appliquant la loi de la conservation de l'énergie :

$$E = Q + W$$

nous pouvons poser :

$$Q = E_{i2} - E_{i1} + p (V_2 - V_1)$$

La formule peut s'écrire :

$$Q = (E_{i2} + p V_2) - (E_{i1} + p V_1)$$

les quantités $(E_i + pV)$ sont appelées **enthalpies** et nous obtenons :

$$Q = H_1 - H_2$$

Dans une transformation isobare, c'est-à-dire à pression constante, la différence $H_1 - H_2$ est la quantité de chaleur reçue par le système par unité de masse. Autrement dit dans les problèmes que nous avons à traiter en isolation thermique la quantité de chaleur à fournir à un corps de température t_1 pour le porter à une température t_2 (ce corps pouvant se trouver sous plusieurs phases) sera une différence d'enthalpies.

Prenons un exemple :

soit à porter de l'eau (phase liquide) de 0 °C à 150 °C (phase vapeur) de 0 à 100 °C il faut fournir (chaleur massique) :

$4\,180 (100 - 0) = 418\,000$ J/kg;
pour vaporiser l'eau à 100 °C il faut fournir (chaleur latente) $2\,250\,000$ J/kg

pour porter la vapeur de 100 à 150 °C il faut fournir (chaleur massique : C_p) : $1\,900 (150 - 100) = 95\,000$ J/kg
soit au total $2\,763$ kJ/kg.

Si nous avons 5 kilogrammes d'eau à 0 °C à porter à 150 °C (à la pression atmosphérique) il faut fournir :

$$H = 2\,763 \times 5 = 13\,815 \text{ kJ}$$

L'enthalpie de la vapeur à 150 °C et à la pression atmosphérique normale (76 cm Hg) est de $2\,763$ kJ/kg.

La notion d'enthalpie est très commode pour les calculs de transformation d'état et également pour les calculs de température des mélanges.

Deux exemples nous montreront son intérêt.

Première application - Quelle quantité de chaleur faut-il retirer à 5 kg de vapeur à 150 °C et à la pression atmosphérique pour donner de l'eau à 50 °C ?

L'enthalpie de l'eau à 50 °C est :

$$H_1 = 4\,180 \times 50 \times 5 = 1\,045 \text{ kJ.}$$

L'enthalpie de la vapeur à 150 °C est de $13\,815$ kJ (voir plus haut). La quantité de chaleur perdue est donc :

$$13\,815 - 1\,045 = 12\,770 \text{ kJ}$$

Deuxième application. Soit à déterminer la température du mélange si l'on verse 2 litres d'eau à 10 °C dans 5 litres d'eau à 50 °C.

En fait la température du mélange est indépendante de la chaleur massique du fluide.

En effet nous pouvons poser :

$$H_1 = 4\,180 \times 10 \times 2,$$

$$H_2 = 4\,180 \times 50 \times 5,$$

$$H_1 + H_2 = 4\,180$$

$$[(10 \times 2) + (50 \times 5)].$$

Soit t la température finale

$$H_1 + H_2 = 4\,180 \times t \times (2 + 5).$$

Des deux égalités nous tirons :

$$t = \frac{(10 \times 2) + (50 \times 5)}{2 + 5} = 38,57 \text{ °C}$$

Généralisons : en appelant m_1 la première masse, m_2 la deuxième, t_1 la température de la masse m_1 , t_2 celle de la masse m_2 et t la température finale nous pouvons écrire :

$$t = \frac{t_1 m_1 + t_2 m_2}{m_1 + m_2}$$

C'est surtout dans le domaine du conditionnement d'air que nous aurons l'utilisation de la notion d'enthalpie. Faute d'avoir étudié le diagramme psychrométrique de Mollier, nous ne pouvons pas encore donner d'exemple pratique.

Mais nous pouvons comprendre que l'air contient une certaine énergie calorifique fonction de sa température. Lorsque nous aurons à réchauffer ou rafraîchir de l'air, nous mettrons en jeu une puissance calorifique ou frigorifique que nous évaluerons par les différences d'enthalpies de l'air aux températures initiales et finales.

théorie générale du phénomène de l'échange de chaleur

Entre deux corps dont la température est différente se produit inévitablement un flux calorifique, la chaleur se déplaçant du corps chaud vers le corps froid jusqu'à ce qu'il y ait équilibre de température.

On remarquera l'analogie avec :

a) - l'**hydraulique** : différence

de pressions dans le cas d'un écoulement d'eau,

b) - l'**électricité** : différence de voltages dans un équilibre électrique.

Aucun moyen ne permet d'empêcher l'échange de chaleur. Seule son intensité peut être modifiée.

l'échange de chaleur s'effectue de trois manières différentes

a) Par conduction

La chaleur se propage à travers tous les corps solides ou liquides de molécule à molécule, ces dernières étant supposées immobiles. Dans les gaz (théorique cinétique) ce sont les chocs de molécules animées de vitesses différentes qui produisent les échanges d'énergie.

Exemple : Si l'on place l'extrémité d'une barre de fer dans un foyer au bout de quelques instants l'autre extrémité devient chaude et la main est obligée de la quitter.

b) Par convection

Ce mode de propagation est propre aux fluides (gaz ou liquides), les molécules directement au contact d'un corps de température plus élevée

«A» s'échauffent et tendent à se déplacer par gravité. La restitution des calories absorbées au contact de corps de température inférieure «B» entraîne la création d'un cycle de convection accélérant les échanges thermiques entre A et B.

Exemple : Le radiateur de chauffage central élève la température des molécules de l'air qui, devenues plus légères, montent vers le plafond et sont immédiatement remplacées par d'autres refroidies au contact des parois ou objets rencontrés sur leur parcours.

c) Par rayonnement

La transmission de chaleur par rayonnement se produit même aux basses tempéra-

res, dès que deux corps de température différente sont mis en présence l'un de l'autre tout en restant séparés par un milieu perméable au rayonnement. La chaleur se transforme en énergie rayonnante, elle traverse le milieu perméable et atteint l'autre corps.

Une partie de l'énergie se transforme alors en chaleur et est absorbée par ce deuxième corps. Le reste de l'énergie se réfléchit sous forme de chaleur rayonnante.

Le transport de chaleur par rayonnement ne nécessite aucun support matériel : il se produit également dans le vide.

Exemple : La terre est chauffée par le soleil par rayonnement.

Généralement ces trois cas possibles d'échange se produisent simultanément. La conduction pure a lieu uniquement dans les corps solides, et cela n'est même pas toujours vrai. Ainsi on assimile les échanges de chaleur dans les matériaux de construction à la conduction pure. En fait, il s'agit de corps poreux. Dans ces pores, remplis par l'air, il y a rayonnement et convection. Il est toutefois impossible de dissocier ces trois modes de transmission et c'est par simplification que l'on groupe l'ensemble des phénomènes sous le nom de conduction.

Ceci est sans inconvénient les valeurs des coefficients de conductivité données par les tables étant toutes établies expérimentalement, le calcul étant pratiquement impossible.

flux de chaleur

Avant d'aborder l'étude plus poussée des trois mécanismes de transmission de la chaleur, il nous faut définir la caractéristique la plus importante : le flux de chaleur (symbole Φ).

Le flux de chaleur est la quantité de chaleur échangée par unité de temps. Etant une énergie par unité de temps donc une puissance, le flux se mesure, dans le système S.I. en watts.

Dans l'ancien système des thermiciens le flux se mesure, généralement en kilocalorie par heure : kcal/h.

Reprenons l'unité légale. On dira par exemple d'une chaudière qu'elle est de 10 kW si le flux qu'elle débite est de

10 000 watts c'est-à-dire 10 000 joules par seconde.

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

ΔQ = quantité de chaleur transmise exprimée en joules pendant l'espace de temps Δt exprimé en seconde.

Le cas le plus courant de transmission de chaleur, dans le bâtiment au moins, est celui de l'échange entre deux ambiances séparées par une paroi plane. Il est alors commode pour les calculs de rapporter le flux à l'unité de surface et nous avons la **densité de flux** (symbole φ)

$$\varphi = \frac{\Phi}{S}$$

φ se mesure donc en W/m².

rayonnement

Ondes électromagnétiques.

Tous les corps solides et liquides émettent, par leur

surface, de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Cette énergie se

manifeste à nous suivant sa longueur d'onde (voir fig. 1).

Le rayonnement visible (lumière) possède une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,8 μ suivant les couleurs du spectre. Au dessous de 0,4 μ on rencontre : les rayons ultra-violet, puis les rayons X, puis les rayons γ . Au-dessus de 0,8 et jusqu'à 400 μ on trouve le rayonnement infra-

rouge au delà commence le règne des ondes radioélectriques.

Le **rayonnement** comporte toujours une multitude de longueurs d'ondes ; exemple le spectre lumineux. Il faut le distinguer d'une **radiation** de longueur d'onde bien déterminée comme en acoustique, on distingue un bruit d'un son pur.

Longueur d'onde		Fréquence Hz
10^{-10} mm -	Rayons cosmiques	- $3 \cdot 10^{21}$
10^{-9} » -		- $3 \cdot 10^{20}$
10^{-8} » -	Rayons γ	- $3 \cdot 10^{19}$
10^{-7} » -		- $3 \cdot 10^{18}$
10^{-6} » -	Rayons X	- $3 \cdot 10^{17}$
10^{-5} » -		- $3 \cdot 10^{16}$
10^{-4} » -	Ultra-violet	- $3 \cdot 10^{15}$
10^{-3} » -	Lumière visible	- $3 \cdot 10^{14}$
10^{-2} » -	Infra-rouge (rayonnement calorifique)	- $3 \cdot 10^{13}$
10^{-1} » -		- $3 \cdot 10^{12}$
1 » -	Ondes ultra-courtes	- $3 \cdot 10^{11}$
10 » -		- $3 \cdot 10^{10}$
10^2 » -		- $3 \cdot 10^9$
10^3 » -		- $3 \cdot 10^8$
10^4 » -		- $3 \cdot 10^7$
10^5 » -	Ondes courtes	- $3 \cdot 10^6$
1 km.-	Ondes moyennes	- $3 \cdot 10^5$
10 » -	Ondes longues	- $3 \cdot 10^4$
10^2 » -		- $3 \cdot 10^3$
10^3 » -	Basse fréquence	- $3 \cdot 10^2$
10^4 » -		- 30
10^5 » -		- 3

Fig. 1 - Gamme de longueur d'ondes et de fréquences des oscillations électromagnétiques.

Tous les rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière (environ 3×10^{10} cm/s).

Les ondes électromagnétiques se propagent toutes, comme la lumière, en ligne droite en milieu homogène. Elles se réfléchissent et se réfractent.

Si une énergie rayonnée tombe sur un corps (absorbant pour ses longueurs d'ondes) elle se transforme en chaleur.

Le rayonnement, même de nature non calorifique, constitue finalement un processus de transmission de la chaleur.

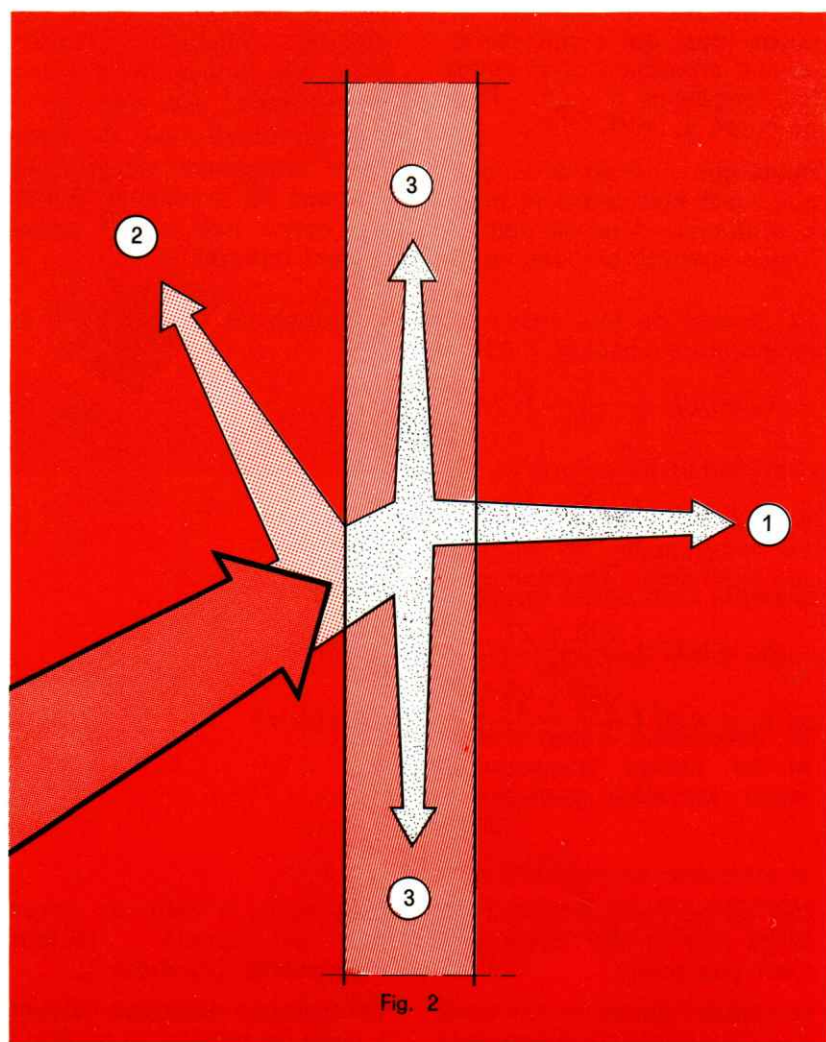
Inversement, tout corps transforme une partie de son

énergie calorifique en rayonnement.

Dans les limites des températures usuelles la plus grande partie de l'énergie rayonnée se présente sous forme de rayons infra-rouges.

L'indice de réfraction, le pouvoir réflecteur et la transparence d'un corps varient avec la longueur d'onde du rayonnement. Ainsi le verre laisse passer la plus grande partie des rayons solaires. Il laisse beaucoup moins bien passer les rayonnements de plus grandes longueurs d'ondes émis par d'autres corps. C'est l'exemple de la serre: le châssis vitré se comporte vis-à-vis du rayonnement de la terre comme un corps opaque.

pouvoir absorbant



Considérons un rayonnement tombant sur une surface (figure 2).

L'énergie E reçue par la surface S se divise en trois parties :

- 1 : énergie transmise à travers le corps : T ,
- 2 : énergie réfléchi : R ,
- 3 : énergie absorbée : A , se traduisant par l'élévation de température du corps.

$$E = T + R + A$$

Le **pouvoir absorbant** d'un corps est par définition le rapport de l'énergie absorbée par l'énergie incidente. Il est noté a_λ c'est-à-dire qu'il est donné pour une longueur d'onde déterminée.

$$a_\lambda = \frac{A}{E}$$

La direction de l'onde incidente est supposée, par simplification, perpendiculaire à la surface du corps.

Le pouvoir absorbant caractérise un corps, il est indépendant de la quantité d'énergie reçue E.

L'étude du rayonnement a été réalisée par un certain nombre de physiciens : PLANCK,

WIEN, STEFAN, KIRCHHOFF.

Cette étude étant fort complexe, son exposé dépasserait le cadre de cette notice.

Nous nous contenterons d'en donner les conclusions.

Le rayonnement est proportionnel à la puissance 4 de la température absolue T ($T = t + 273$) du corps émetteur. Il augmente donc très rapidement avec la température. A partir de 700 °C une partie du rayonnement devient visible (incandescence).

Le processus d'absorption et d'émission suivent les mêmes lois. Il s'ensuit que l'absorption dépend également de la température.

corps noir

On appelle corps noir un corps idéal qui serait parfaitement absorbant pour toutes les longueurs d'ondes. Pour ce corps $a_\lambda = 1$.

Remarque : Le terme « corps noir » est mal choisi et prête à confusion. Ainsi le noir de fumée absorbe bien les radia-

tions visibles, mais il a un pouvoir réflecteur notable pour les longueurs d'ondes plus grandes. Ce n'est donc pas un corps noir au sens défini précédemment. Il a été proposé de remplacer le terme corps noir par « **corps radiant intégral** ».

La densité de flux émise par une surface de corps noir à la température absolue T (°K) est :

$$h_r = 5,77 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ W/m}^2,$$

exprimée en kilocalorie :

$$h_r = 4,96 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ kcal/h.m}^2.$$

Exemple : un corps noir à 27 °C émet

$$h_r = 5,77 \left(\frac{273 + 27}{100} \right)^4 = 465 \text{ W/m}^2$$

$$\text{ou } h_r = 4,96 \left(\frac{273 + 27}{100} \right)^4 = 400 \text{ kcal/h.m}^2.$$

corps usuels

Les corps réels diffèrent du corps noir et leur absorption n'est pas totale.

Le rapport du pouvoir émissif (ou d'absorption) d'une sur-

face réelle à celui du corps noir est appelé : **facteur d'émissivité** (symbole ϵ).

On trouvera quelques valeurs ϵ dans le tableau ci-contre :

Valeurs moyennes des constantes relatives par rapport au corps noir :

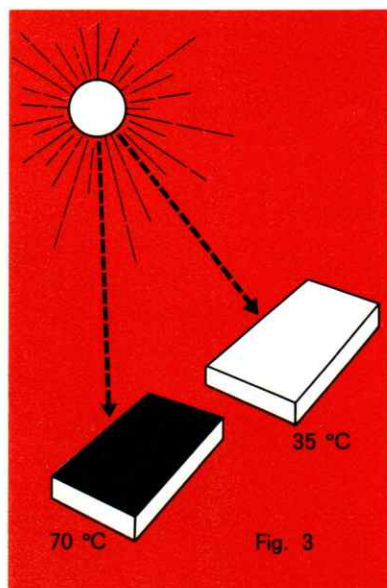
Corps noir : 1	Peinture à l'huile : 0,91	Eau, glace : 0,965
Brique : 0,92	Linoléum : 0,90	Givre : 0,985
Bois : 0,89	Sable clair : 0,89	Neige : 0,995
Verre : 0,91	Gazon : 0,98	Peau humaine : 0,954
Laine : 0,96	Fourrure : 0,99	Cuivre poli : 0,04
Caoutchouc : 0,98	Carton : 0,95	Aluminium poli : 0,03

L'absorption des corps réels varie en général avec la longueur d'onde.

Ainsi, la couleur blanche absorbe peu le rayonnement visible : elle le réfléchit. Mais elle se comporte sensiblement comme le corps noir pour le

rayonnement infra-rouge aux températures usuelles (quelques centaines de degrés).

Une surface blanche réfléchit le rayonnement solaire, mais absorbe le rayonnement fourni par un appareil de chauffage.



Au contraire une surface noire absorbe ces deux types de rayonnements : solaire et calorifique.

Si deux plaques sont exposées au soleil :

- l'une noire absorbera le rayonnement visible et sa température s'élèvera fortement.
- l'autre blanche réfléchira le rayonnement et sa température s'élèvera moins fortement.

Enfin une surface polie en aluminium réfléchit en grande

partie le rayonnement du radiateur.

Entre trois plaques : noire, blanche, aluminium poli, exposées devant un radiateur, les deux premières seront sensiblement à la même température, plus élevée que celle de la troisième.

Entre deux corps à des températures différentes la quantité de chaleur transmise pendant l'unité de temps sera :

$$\varphi = 5,77 E \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\text{avec } \frac{1}{E} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1$$

convection

Dans un fluide, les différences de température provoquent des différences de masse volumique qui engendrent les mouvements de fluide tendant à mélanger les zones chaudes et froides. Le phénomène global porte le nom d'échange par **convection**. En fait il résulte de la combinaison de la conduction de molécule à molécule et du mouvement du fluide. Il y a, à la fois, transfert de matière et d'énergie calorifique.

La convection est dite **naturelle** si le mouvement du fluide est provoqué par les différen-

ces de température soit entre un solide et le fluide, soit entre les différents éléments de ce fluide.

La densité du flux lors de l'échange par convection naturelle est fonction de la différence de température entre le fluide (température prise à bonne distance de la paroi) et la surface du corps. Cette densité de flux est proportionnelle à la racine quatrième de l'écart.

$$h_c = A (t_s - t_f)^{0,25}$$

A : coefficient dépendant du sens de l'échange (fig. 4).

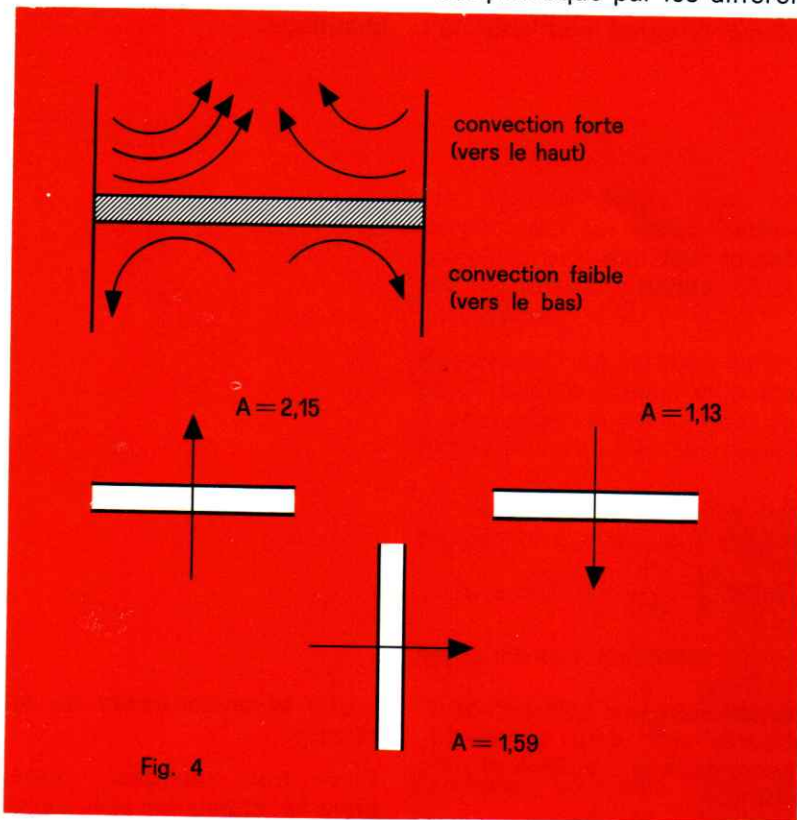


Fig. 4

La convection est dite **forcée** si le mouvement du fluide est provoqué par une cause mécanique indépendante des phénomènes thermiques: vent par exemple.

Les lois de la convection forcée sont très complexes. Si la densité du flux ne dépend que très peu des écarts de température, elle varie suivant un grand nombre de facteurs:

- forme géométrique de la surface d'échange,
- vitesse d'écoulement du fluide,
- forme de l'écoulement : laminaire ou turbulent.

Aucune expression mathématique ne donne dans ce cas la valeur de h_c . Il est nécessaire d'appliquer des valeurs expérimentales. Nous en donnerons quelques-unes le moment venu.

conduction

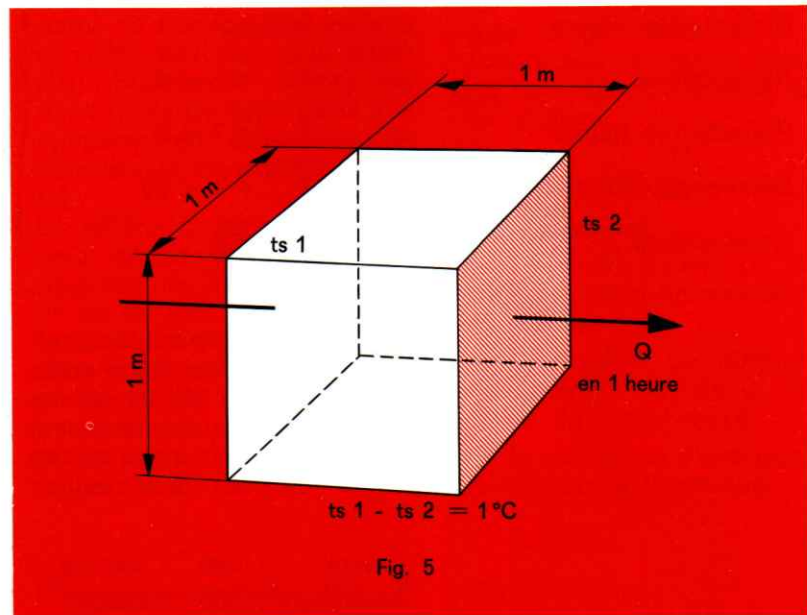
La chaleur, avons-nous dit, traduit la vitesse d'agitation des particules élémentaires de la matière : molécules pour les fluides, édifices cristallins pour les solides.

Ce phénomène d'agitation des molécules est facilement concevable pour les fluides. Pour les solides, les mouvements des atomes autour de leur position d'équilibre

s'imaginent plus difficilement.

D'ailleurs si une part de l'énergie se propage par le choc des atomes entre eux, une part plus importante est transmise par les électrons libres déjà responsables de la conductibilité électrique. Ce n'est pas par hasard si les meilleurs conducteurs du courant électrique le sont aussi de la chaleur.

coefficient de conductivité



La conductivité thermique d'un corps est la quantité de chaleur traversant un mètre carré du corps considéré, pour un mètre d'épaisseur, par heure et pour une différence de température de 1°C entre les deux faces.

Le coefficient de conductivité est désigné par la lettre grecque « λ » (lambda).

Il s'exprime en watts par m^2/m et par $^{\circ}\text{C}$: $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ en simplifiant.

Dans le système des thermiciens il s'exprime en $\text{kcal}/\text{m.h.}^{\circ}\text{C}$

$$1 \text{ W} = 0,860 \text{ kcal/h,}$$

$$1 \text{ kcal/h} = 1,163 \text{ W.}$$

Remarques : Le λ varie avec la température du corps considéré. Il augmente si la température croît et inversement diminue lorsque la température décroît : l'augmentation de température, en effet, occasionne :

- une augmentation de la vitesse des mouvements de convection,
- une augmentation de la radiation,
- une dilatation des molécules.

Le λ n'est jamais nul.

Ce dernier point explique le fait qu'un isolant ne peut que ralentir l'échange de chaleur.

La conductivité des matériaux de construction est encore plus celle des isolants, du fait de

leur structure, qu'elle soit alvéolaire, granulaire ou fibreuse, n'est pas une conductivité vraie mais bien une conductivité apparente tenant compte des phénomènes internes de rayonnement, de convection et de conduction.

classification des corps

On peut, pour fixer les idées, retenir une échelle des conductivités thermiques :

Isolants	$\lambda < 0,10$	} Valeurs données à la température d'emploi.
Semi-réfractaires	$0,10 < \lambda < 0,30$	
Réfractaires légers	$0,30 < \lambda < 1$	
Réfractaires	$1 < \lambda < 3$	
Réfractaires lourds	$3 < \lambda < 8$	
Semi-conducteurs	$8 < \lambda < 20$	
Conducteurs	$20 < \lambda$	

Les matériaux de construction usuels ont un λ compris entre 0,10 et 3 W/m °C, ce qui ne veut pas dire que tous soient réfractaires: il faudrait encore qu'ils tiennent aux hautes

températures, ce qui n'est pas le cas.

Exemples de conductivité thermiques (W/m °C) à 20 °C environ.

Cuivre : 390	Marbre : 3	Fibre de verre : 0,04
Aluminium : 200	Béton : 1,5	Polystyrène : 0,037
Fer : 60	Verre : 1	Verre cellulaire : 0,057

résistivité thermique

C'est l'inverse de la conductivité. Elle est désignée par la lettre « ρ ».

$$\rho = \frac{1}{\lambda}$$

résistance thermique

La conductivité est définie par le coefficient λ donné par **mètre d'épaisseur** et pour un mètre carré du matériau considéré.

Il est bien évident que la

résistance offerte par un corps au passage de la chaleur sera proportionnelle à son épaisseur et inversement proportionnelle à sa conductivité.

La résistance thermique d'un corps, ou d'un élément de paroi est désignée par la lettre « r ».

Il ne faut pas faire de confusion avec la résistivité (ρ) qui est (voir plus haut) l'inverse de la conductivité.

Nous pouvons donc écrire :

$$r = \frac{e}{\lambda} \text{ ou encore } r = e\rho$$

e = épaisseur exprimée en mètres.

conductance

C'est l'inverse de la résistance. Elle est désignée par la lettre k.

$$k = \frac{1}{r} = \frac{\lambda}{e}$$

Plaque simple (fig. 6)

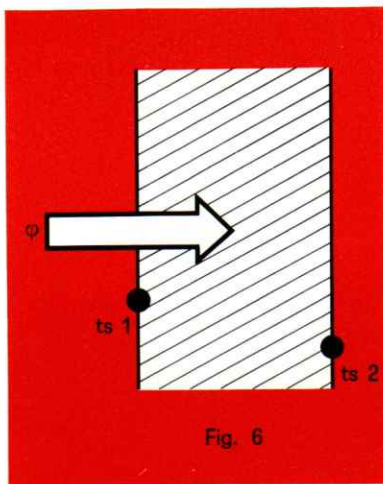


Fig. 6

Supposons une portion de 1 m^2 prise au centre d'une paroi de très grande surface et composée d'un seul matériau. Supposons encore les deux faces de cette paroi aux températures différentes et maintenues constantes ts_1 et ts_2 .

La différence de température sera cause de la création d'un flux de chaleur et si $ts_1 > ts_2$ ce flux sera dirigé de la face 1 vers la face 2. La densité de ce flux sera proportionnelle à la différence de température et inversement proportionnelle à la résistance thermique de la paroi.

$$\varphi = \frac{ts_1 - ts_2}{r}$$

La considération des analogies de la thermique et de l'électricité permet de comparer cette formule à celle de la loi d'Ohm :

$$I = \frac{U}{R}$$

On rapproche :

- l'intensité du courant électrique (I) de la densité du flux thermique,
- la tension ou différence de potentiel (U) de la différence de température,
- la résistance électrique de la résistance thermique.

Plaques juxtaposées (fig. 7)

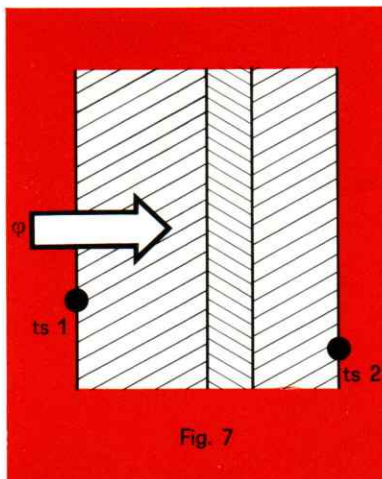


Fig. 7

Si maintenant nous sommes en présence d'une paroi composée de plaques parallèles de matériaux différents, il est bien évident que les résistances des plaques vont s'ajouter.

$$\varphi = \frac{ts_1 - ts_2}{r_1 + r_2 + r_3 + r_n}$$

$$\text{avec } r_1 = \frac{e_1}{\lambda_1} \text{ et } r_2 = \frac{e_2}{\lambda_2}$$

$$r_3 = \frac{e_3}{\lambda_3} \text{ et } r_n = \frac{e_n}{\lambda_n}$$

On écrit alors :

$$\varphi = \frac{ts_1 - ts_2}{\sum \frac{e}{\lambda}}$$

Remarque - Dans la pratique les trois modes d'échanges de chaleur interviennent simultanément. Nous devrions donc étudier maintenant comment ils se combinent. Les problèmes sont toutefois différents selon le domaine d'application c'est pourquoi nous avons préféré faire une notice sur les déperditions thermiques propre à chaque domaine : bâtiment et industrie.

NOTES PERSONNELLES

ISOVER SAINT-GOBAIN est membre du Centre d'Etudes et de Recherches des Fibres Isolantes Minérales.

ISOVER SAINT-GOBAIN

Boîte Postale 124
62, Boulevard Victor-Hugo
92 - NEUILLY-SUR-SEINE
Téléphone : 637-10-00



SAINT-GOBAIN S.A. au capital de 500.000.000 F
Siège Social : 62, boulevard Victor-Hugo - 92/NEUILLY-SUR-SEINE
R.C. Paris 57 B 22 817 - Imp. Raffy, Paris - Imprimé en France - 9 - 71