

TRANSFERT DE CHALEUR

CHAPITRE I Transmission de la Chaleur

1. Définition de transfert de chaleur :

C'est le déplacement de la chaleur d'une région à une autre suite à une différence de température, ce déplacement peut se produire entre deux corps en contact (solide-solide, solide-fluide, fluide-fluide) ou entre deux parties d'un même corps [].

Donc :

Le transfert thermique = énergie en transit dû à une différence de température.

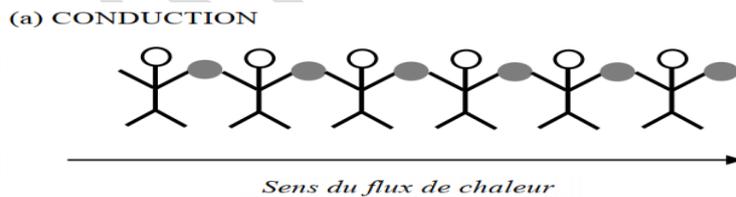
On distingue trois modes de transfert de chaleur :

1. La conduction thermique ou diffusion thermique.
2. Le rayonnement thermique.
3. La convection.

2. Les modes de transfert de chaleur:

2.1. La conduction:

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux), sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. Cette transmission est faible dans les gaz [].



La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température []:

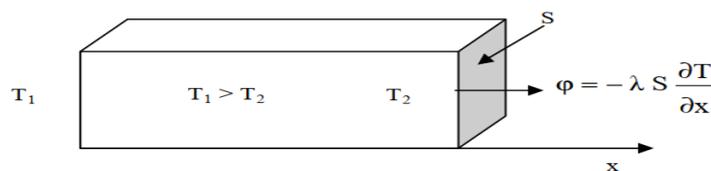


Figure 1 : Schéma du transfert de chaleur par conduction.

On trouvera dans le tableau1: les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux parmi les plus courants [].

Tableau 1: Conductivité thermique de certains matériaux []

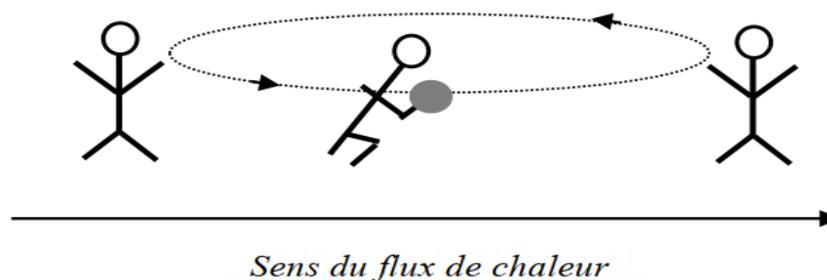
Matériau	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)	Matériau	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Brique terre cuite	1,1	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Verre	1,0	Polystyrène extrudé	0,028
Eau	0,60	Air	0,026

2.2. La convection :

C'est le transfert de chaleur (énergie) entre un solide et un fluide avec **déplacement macroscopique de matière**, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide (liquides, gaz) / différence de masse volumique. Nécessite un milieu fluide de transmission. Notons qu'il existe deux types de transferts convectifs []:

- **La convection forcée** : dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé par un dispositif mécanique quelconque (pompe ou gravité pour un liquide, ventilateur pour de l'air) [].
- **La convection naturelle**: lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide, le fluide chaud, qui aura une masse volumique plus faible que le fluide froid aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède [].

(c) CONVECTION



Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton[]: $\phi = S h (T_p - T_\infty)$

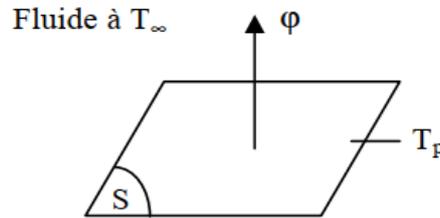


Figure 2 : Schéma du transfert de chaleur convectif[]

Avec :

ϕ	Flux de chaleur transmis par convection	(w)
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	(w m ⁻² c ⁻¹)
T_p	Température de surface du solide	(°C)
T_∞	Température du fluide loin de la surface du solide	(°C)
S	Aire de la surface de contact solide/fluide	(m ²)

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide [].

2.3. Le rayonnement:

C'est une forme particulière de transfert thermique dans laquelle l'énergie est portée par des ondes électromagnétiques. Le phénomène de rayonnement est créé par l'émission et l'absorption des ondes électromagnétiques et par la transformation de celle-ci en chaleur. Ce mode de transfert ne nécessite aucun support matériel et ne fait intervenir ni déplacement de la matière, ni contact entre les objets ou les milieux échangeant de l'énergie. Exemple: Chauffage par énergie infrarouge dans les opérations de cuisson et de rôtissage par les brûleurs à gaz ou des éléments électriques [].

La quantité d'énergie émise par un corps idéal (corps noir) est exprimée par la loi de Stefan-Boltzmann []:

$$\dot{Q} = \sigma A T^4$$

Où :

\dot{Q} : Énergie émise, W

σ : constante de Stefan-Boltzmann, $5,669 \times 10^{-8}$ W/(m².K⁴)

T : Température absolue, K

Dans le cas de surfaces réelles, le concept de corps gris est utilisé et l'équation devient []:

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A T^4$$

Où ϵ est l'émissivité du corps gris.

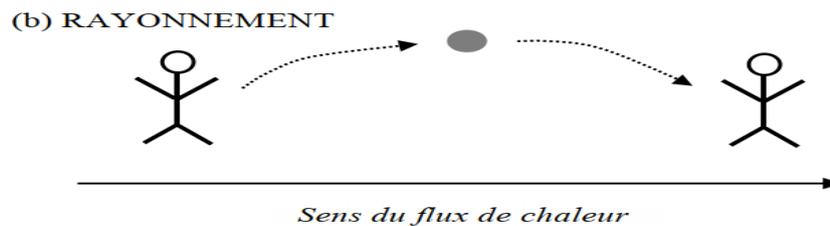
L'énergie transmise nette à l'aliment est[] :

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

Où T_1 est la température du corps émetteur et T_2 est la température de l'aliment [].

Remarque : Pas de contact entre les objets ou milieux qui échangent l'énergie.

Pas de milieu de transmission nécessaire (dans le vide, air) [].



3. Analogie avec l'électricité:

- Un débit de courant est un flux d'électrons [C/s]
 Pour obtenir un débit de courant, il faut force motrice: **une différence de potentielle électrique []**.
- Un débit de chaleur est un flux de chaleur [J/s]
 Pour obtenir un débit de chaleur, il faut une force motrice: **une différence de température []**.

4. Combinaison des différents modes de transferts

Le transfert d'énergie par chaleur se réalise le plus souvent par une combinaison de plusieurs modes. A titre d'exemple, le dispositif chauffage central, combine la convection (en général forcée) pour chauffer le fluide dans la chaudière, la conduction pour chauffer les parois du radiateur et la convection (en général naturelle) pour chauffer l'air autour du radiateur. Dans le cas du chauffage d'un solide par radiation, la transmission de chaleur sera une combinaison de radiation et de conduction. C'est le cas du verre d'une vitre chauffée par le rayonnement solaire; le transfert étant combiné avec une convection naturelle de l'air, derrière la vitre d'une pièce. Quelquefois le transfert thermique s'accompagne d'un transfert de matière. Par exemple dans le cas de l'ébullition d'un liquide, une partie du liquide subit un changement d'état physique et le gaz ainsi créé se sépare du liquide[].

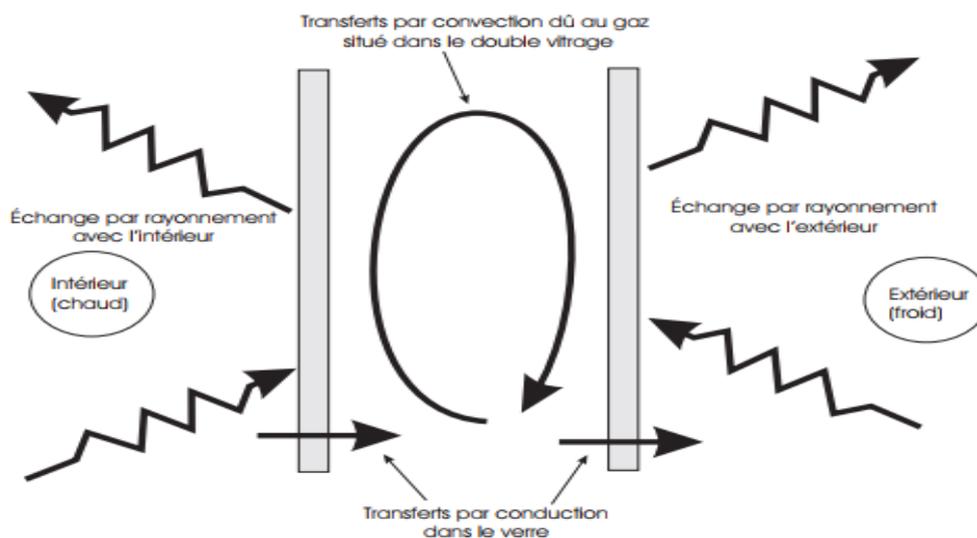


Figure 3: Exemple illustrant les différents types de transferts de chaleur [].

5.1. Analogie électrique:

Etant donné la similitude dans le mécanisme de passage du courant électrique et du transfert de chaleur dans les corps solide, nous pouvons faire une analogie [].

Après arrangement de l'équation du flux thermique donnée par la loi de Fourier, nous pouvons l'écrire sous la forme suivante []:

$$\Phi = \lambda s \frac{\Delta t}{\Delta x}; \quad \Phi = \frac{\Delta t}{\frac{\Delta x}{\lambda s}}$$

Cette équation ressemble à la loi d'Ohm de la conduction électrique qui a pour expression []:

$$I = \frac{\Delta V}{R}$$

où I : courant électrique (A) ;

ΔV :différence de potentiel (V) ;

R : résistance électrique (Ω) ;

On peut remarquer qu'il y a une analogie mathématique directe entre la conduction de la chaleur (loi de Fourier) et la conduction de l'électricité (loi d'Ohm). La résistance analogue dans la loi de Fourier s'appelle *résistance thermique*, notée par R_t et défini par []:

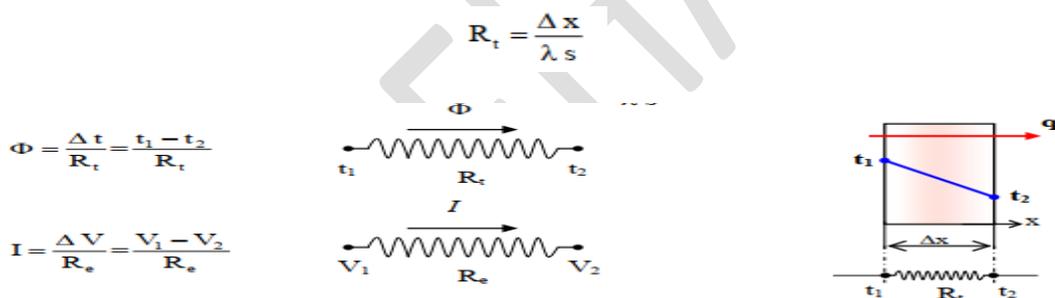


Fig.4: Résistance thermique de conduction [].

5.2 Analogie électrique

De même que nous avons procédé pour la conduction, la notion de résistance thermique est aussi valable pour le cas du transfert de chaleur par convection []. Ainsi, si nous considérons que la résistance thermique est égale à: $R = 1/hs$, la formule s'écrit alors [] :

$$\Phi = \frac{(t_p - t_{\infty})}{R} \rightarrow R = \frac{1}{h S}$$

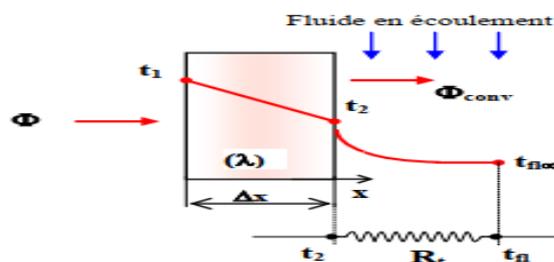


Fig.5: Résistance thermique de convection [].

6. Conditions aux limites spatio-temporelles:

L'équation générale de la chaleur traduit, par une relation entre les variables x, y, z, t et la température, le mécanisme du phénomène conductif, en tout point de coordonnées x, y, z à tout instant t [].

Cette équation aux dérivées partielles, linéaire, du deuxième ordre, admet en principe une infinité de solutions, faisant intervenir des constantes ou des fonctions arbitraires. Mais cette équation phénoménologique n'a de sens physique que pour de conditions définies. Ces conditions sont les causes qui déterminent l'évolution du phénomène. En effet, l'équation de la chaleur décrivant un phénomène irréversible, ceci implique que le milieu considéré a été soumis à un instant initial à une rupture de son équilibre thermique. Il est alors nécessaire de connaître la répartition initiale des températures en tout point du milieu et aussi la loi de variation de la fonction T ou/et, de sa dérivée normale $\partial T / \partial n$ sur la surface frontière [].

6.1 Conditions initiales :

La distribution des températures à l'intérieur du solide et sur sa surface est supposée connue à l'instant $t = 0$ c-à-d []: $T(x, y, z, t=0) = T_0(x, y, z)$

6.2 Conditions aux limites (Conditions aux surfaces) :

Les conditions que l'on impose sur la surface frontière c-à-d à la paroi du solide pour $t > 0$, seront affectées de l'indice p . Elles sont la traduction mathématique des conditions physiques réelles [].

6.2.1-Température imposée : (Condition de DIRICHLET)

La température est une fonction donnée du point M_P sur la paroi et/ou du temps []: $T_p = f(M_P, t)$

6.2.2- Densité de flux imposée : (Condition de NEUMANN)

La densité de flux thermique est une fonction donnée du point M_P sur la paroi et/ou du temps, soit algébriquement [] :

$$\varphi = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_p = f(M_P, t)$$

Où $(\partial T / \partial n)_p$ dérivée normale de T , calculée à la paroi

Remarque : Si le corps est thermiquement isolé, la densité de flux est nulle en tout point de sa surface (adiabaticité) [].

6.2.3. Transfert linéaire à la surface et condition mixte : (Condition de FOURIER)

La densité de flux traversant la surface frontière est proportionnelle à la différence de température entre la paroi et le milieu environnant, soit [] :

$$\varphi = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_p = h \cdot (T_p - T_\infty)$$

7. Système d'unités de chaleur et conversion :

7.1. Unités de mesure thermiques (Température) :

• Échelle Celsius (1742):

Cette échelle se caractérise par deux points fixes :

- Fusion de la glace à 0 °C;
- Ébullition de l'eau distillée à 100 °C.

Le degré Celsius est la variation de température qui produit la 1/100 partie de l'accroissement de pression que subit la masse d'un gaz parfait quand, à volume constant, la température passe du point 0 (glace fondante) au point 100 (ébullition de l'eau) ces deux points étant déterminés sous la pression atmosphérique normale[].



• Échelle Kelvin (1848):

L'étude des gaz à des pressions relativement basses a permis d'exprimer la pression (P) et le volume (V) du gaz par les relations suivantes : à V = cte ;[]

- à V = cte ; $P = P_0(1 + \beta \cdot T(^{\circ}C))$ (1)
- à P = cte ; $V = V_0(1 + \alpha \cdot T(^{\circ}C))$ (2)

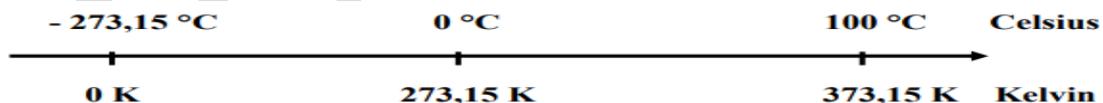
Avec $\alpha = \beta = 1/273,15 \text{ }^{\circ}C^{-1}$ et T exprimée en °C

Si on considère: $T = -273.15^{\circ}C$ et la pression est nulle on obtient:

- $P = P_0 \cdot \beta \cdot T(^{\circ}C)$
- $v = v_0 \cdot \alpha \cdot T(^{\circ}C)$

Avec : $T = T(^{\circ}C) + 1/\alpha = T(^{\circ}C) + 1/\beta = T + 273,15$

Donc : $T(^{\circ}C) = T(K) - 273.15$



• Échelle Fahrenheit (1707):

Elle est utilisée dans les pays anglo-saxons et se caractérise par les deux points fixes:

- température de fusion de glace : 32°F
- température d'ébullition de l'eau (1,013 bars) : 212 °F

Les températures Fahrenheit et Celsius sont liées entre elles par la relation suivante qui permet en même temps de faire la conversion d'une température à l'autre :

$T(^{\circ}F) = 1.8 T(^{\circ}C) + 32$

Tableau 2 : conversion entre différentes échelles de température []

	°C	K	°F
°C	1	$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15$	$T(^{\circ}F) = 1.8 T(^{\circ}C) + 32$
K	$T(^{\circ}C) = T(K) - 273.15$	1	$T(^{\circ}F) = 1.8 T(K) - 459.67$

$^{\circ}\text{F}$	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{[T(^{\circ}\text{F}) - 32]}{1.8}$	$T(\text{K}) = \frac{T(^{\circ}\text{F}) + 459.67}{1.8}$	1
--------------------	--	--	---

7.2. Unités thermiques

7.2.1. S.I :

Température :

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \qquad \Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C})$$

Quantité de chaleur :

$$1 \text{ Joule} = 0,239 \text{ cal} = 0,948.10^{-3} \text{ Btu}$$

Flux thermique :

$$1 \text{ W} = 0,239 \text{ cal.s}^{-1} = 0,86 \text{ kcal.h}^{-1} = 3,41 \text{ Btu.h}^{-1}$$

Densité de flux :

$$1 \text{ W.m}^{-2} = 23,6.10^{-6} \text{ cal.cm}^{-2}.\text{s}^{-1} = 0,86 \text{ kcal.m}^{-2}.\text{h}^{-1} = 0,317 \text{ Btu.ft}^{-2}.\text{h}^{-1}$$

Coefficient global de transmission thermique :

$$1 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1} = 23,9. 10^{-6} \text{ cal.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{C}^{-1} = 0,86 \text{ kcal.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{C}^{-1} = 0,176 \text{ Btu.ft}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{F}$$

Résistance thermique :

$$1 \text{ K.W}^{-1} = 4,1855^{\circ}\text{C.s.ca}1^{-1} = 1,163^{\circ}\text{C.h.kca}1^{-1} = 0,526^{\circ}\text{F.h.Btu}^{-1}$$

7.2.2. C.G.S. : Centimètre, gramme et seconde.

Quantité de chaleur :

$$1 \text{ cal} = 4,1855 \text{ J}$$

$$1 \text{ joule} = 0,2389 \text{ calories,}$$

$$\text{La thermie} = 1000 \text{ kcal.}$$

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ J/s.}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.600.000 \text{ joules} = 860.112 \text{ calories.}$$

$$1 \text{ kWh} = 0,86 \text{ thermie}$$

Flux thermique :

$$1 \text{ cal.s}^{-1} = 4,1855 \text{ W}$$

Densité de flux :

$$1 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{s}^{-1} = 4,1855.10^4 \text{ W.m}^{-2}$$

Coefficient global de transmission thermique :

$$1 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{C}^{-1} = 4,1855.10^{-4} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

Résistance thermique :

$$1 \text{ C.s.ca}1^{-1} = 0,239 \text{ K.W}^{-1}$$

7.2.3. ANGLO-SAXON :

Température :

$$T (^{\circ}\text{R}) = 1,8 T(\text{K})$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$\Delta T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 \Delta T(^{\circ}\text{C})$$

Quantité de chaleur :

$$1 \text{ Btu} = 1055 \text{ J}$$

$$(\text{Btu} = \text{British Thermal Unit})$$

Flux de chaleur :

$$1 \text{ Btu.h}^{-1} = 0,293 \text{ W}$$

Densité de flux :

$$1 \text{ Btu.ft}^{-2}.\text{h}^{-1} = 3,15 \text{ W.m}^{-2} \qquad (1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}) \text{ (Feet : pieds en français)}$$

Coefficient global de transmission thermique :

$$1 \text{ Btu.ft}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{°F}^{-1} = 5,68 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Résistance thermique:

$$1\text{°F.h.Btu}^{-1} = 1,9 \text{ K.W}^{-1}$$

Références

1. <http://perso.univlemans.fr/~bcasta/Cours%20L3%20Echanges%20thermiques/Cours%20de%20thermique%20L3%20SPI%202017.pdf>
2. https://fr.wikipedia.org/wiki/Conduction_thermique
3. <https://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/Distillation/chapitre2/pdf/chapitre2.pdf>
4. <https://www.techno-science.net/definition/3360.html>
5. https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/terminale/s/thermodynamique/transfets-thermiques.html#chapitre_transfert-thermique-par-conduction
6. <https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/MTTH.pdf>
7. <http://www.thermique55.com/principal/thermique.pdf>