

**UNIVERSITE ABDELMALEK ESSAADI**  
*Faculté des Sciences Tétouan*  
*Département de Physique*

*Master Spécialisé : Génie énergétique et environnement*  
*(GEE)*

**MODULE : TRANSFERTS THERMIQUES**

**Partie : CONVECTION**

**Pr. B. KHARBOUCH**

## Préambule

Imaginez une casserole remplie d'eau, et qu'on met sur le feu. Il se crée alors à l'intérieur des mouvements du fluide, qui ne reste pas immobile. Comment cela peut-il se faire, sachant que rien a priori n'a mis le fluide en mouvement ?

Ce qui se passe peut s'expliquer assez simplement. Il faut savoir que l'eau chaude est plus légère que l'eau froide, et que donc, elle a tendance à vouloir monter, à cause de la **poussée d'Archimède**, puisqu'elle est plus légère ! C'est exactement comme pour les montgolfières : l'air chaud qu'elles contiennent est plus léger que l'air froid autour du ballon, et donc par la poussée d'Archimède, le ballon s'élève.

Or on chauffe l'eau de notre casserole par le bas. Donc l'eau chaude au départ se trouve en dessous. Elle a tendance à remonter en surface, où elle se refroidit - et donc redescend, laissant l'eau plus chaude remonter...et ainsi de suite. Ce mouvement s'appelle la convection thermique. Il a tendance à former des rouleaux, comme on peut l'imaginer...

C'est grâce à ce type de mouvement par exemple, que les bougies peuvent brûler. En effet, une bougie qui brûle consomme de l'oxygène, et chauffe l'air autour d'elle. Donc cet air pauvre en oxygène, mais chaud, monte, et ce faisant, laisse la place à de l'air plus froid, mais plus riche en oxygène, et la bougie peut continuer à brûler. C'est ce qui explique la forme de la flamme : elle s'élève. Et même assez loin au dessus de la bougie, vous pouvez sentir l'air chaud qui monte, il suffit de mettre votre main au dessus.

Par contre, en apesanteur, il n'y a plus de gravité, donc plus de poussée d'Archimède. Si vous essayez d'allumer une bougie, elle va commencer à brûler, mais avec une flamme ronde. En effet, s'il n'y a plus de poussée d'Archimède, l'air chaud ne monte plus, et il reste autour de la mèche. Seulement, une fois que la bougie a consommé tout l'oxygène de cet air qui reste autour d'elle, aucun mécanisme ne permet de renouveler cet air. Donc la bougie, par manque d'oxygène, s'éteint !

Le chauffage électrique utilise lui aussi cette propriété : d'ailleurs on appelle de tels chauffages des convecteurs. Les mouvements de convection font que l'air chaud se répartit ainsi à travers la pièce - ils sont donc très efficaces !

## ***INTRODUCTION***

Les transferts thermiques font partie des Sciences de base, peu de domaines industriels où la thermique ne joue un rôle petit ou grand. Le chercheur, au minimum, doit donc en connaître les principes fondamentaux, être capable d'évaluer leur importance dans un problème particulier et dégager les ordres de grandeur par une modélisation simple.

Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides dans lesquels il est généralement prépondérant.

La convection est un mode de transfert de chaleur où celle-ci est advectée (transportée, conduite) par au moins un fluide. Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

- ***La convection libre ou naturelle*** : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur). La **convection naturelle** est un phénomène de la **mécanique des fluides**, qui se produit lorsqu'une zone change de **température** et qu'elle se déplace alors verticalement sous l'effet de la **poussée d'Archimède**. Le changement de température d'un fluide influe en effet sur sa **masse volumique**, qui se trouve modifiée par rapport à la masse volumique du fluide environnant.

- ***La convection forcée*** : le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur, turbine,...). C'est une circulation artificielle de fluide. Le transfert est plus rapide que dans le cas de convection naturelle.

***L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi***

*Chapitre 1*

# *Principes Fondamentaux de la Convection*

## *Généralités et Définitions*

***I-1. Introduction***

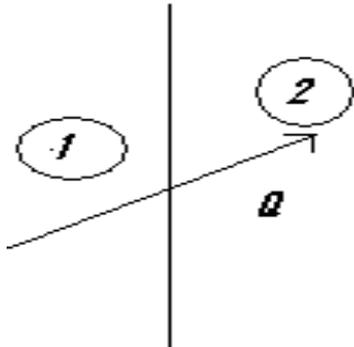
Dans les deux premières parties de ce cours de transfert de chaleur, l'attention a été portée sur l'étude de transmission de chaleur par conduction et rayonnement. Un effort a été nécessaire pour éliminer autant que possible les problèmes relatifs à la convection, afin de simplifier le travail et de mettre en valeur les méthodes de calculs propres à chaque mécanisme du transfert de chaleur. Malgré cet effort, il est très difficile de résoudre des problèmes pratiques sans la connaissance des mécanismes au moyen desquels la chaleur est transmise entre la surface d'un conducteur solide et le milieu environnant.

L'habitude didactique fait que l'on distingue trois modes de transmission de chaleur entre deux milieux différents (1) et (2) en interaction

***La conduction***  
***Le rayonnement***  
***La convection.***

Dans la pratique ces trois modes sont présents en même temps, interfèrent entre eux, et ce n'est que pour certains cas particuliers que l'on peut faire l'étude de l'un, pris isolément.

***I – 2. Rappel sur la définition des trois modes de transfert***

	<p>On désigne par :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* <math>Q</math> : quantité de chaleur transmise entre les milieux 1 et 2 en (J)</li> <li>* <math>\dot{Q}</math> : la puissance thermique (flux) correspondantes (Watts)</li> <li>* <math>\varphi</math> : la densité de flux (Watt/m<sup>2</sup>)</li> </ul>
---	--

Application du premier principe de la thermodynamique  $\Rightarrow$  la quantité d'énergie totale échangée se conserve.

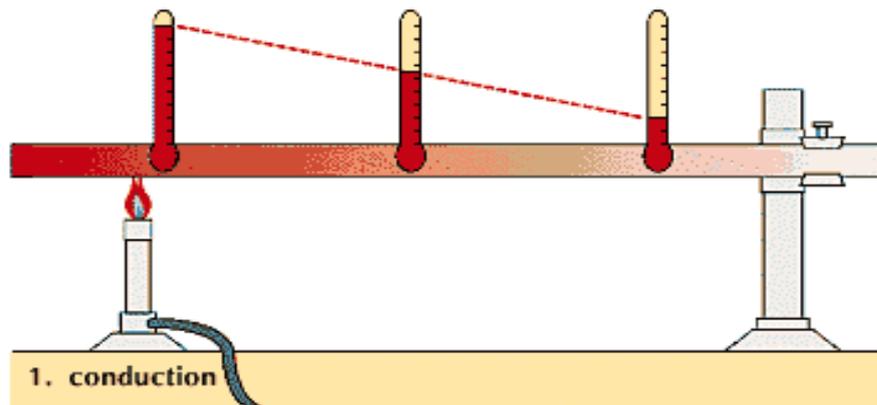
Application du deuxième principe  $\Rightarrow$  conduit à orienter le flux de la quantité  $Q$  des températures les plus élevées ( $T_1$ ) vers les plus basses  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ).

### **a- Conduction**

La conduction est interne aux milieux (1) et (2) mis en contact avec des sources de chaleur extérieures. L'écoulement de chaleur est caractérisé par la loi phénoménologique de Fourier suivante :

$$\varphi = -\lambda \vec{\nabla} T \cdot \vec{n}$$

Les milieux (1) et (2) doivent être en contact physique.



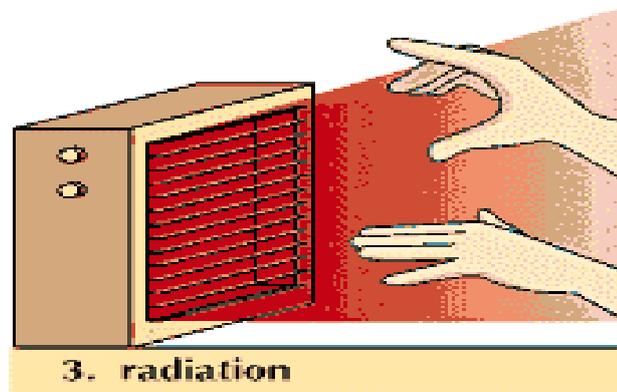
*Transfert par conduction*

### **b- Rayonnement**

Échange réciproque avec émission et absorption des photons par les surfaces des milieux (1) et (2) que ne sont pas forcément en contact. La loi fondamentale qui régit l'échange de chaleur par rayonnement est :

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

$T_1 > T_2$  pour 2 surfaces  $S$  supposées noires dans une configuration de facteur de forme égale à 1.



*Transfert radiatif*

### ***c- Convection***

La convection est un mode de transfert de chaleur qui se produit uniquement au sein des milieux fluides. Elle apparaît lorsqu'un fluide, liquide ou gaz, est en mouvement et présente des inhomogénéités spatiales de température.

La convection se produit lorsqu'il existe entre les milieux (1) et (2) une vitesse relative macroscopique non nulle  $\overline{V}_r$ . Le phénomène de transfert de chaleur résulte du couplage entre les échanges conductifs, radiatifs et le transfert par la matière en écoulement relatif.

Le transfert de chaleur par convection est donc intimement lié aux caractéristiques de l'écoulement du fluide. La connaissance préalable de notions élémentaires de mécanique des fluides est donc un pré requis indispensable. Un des plus importants aspects de l'étude hydrodynamique est d'établir si le mouvement du fluide est laminaire ou turbulent.

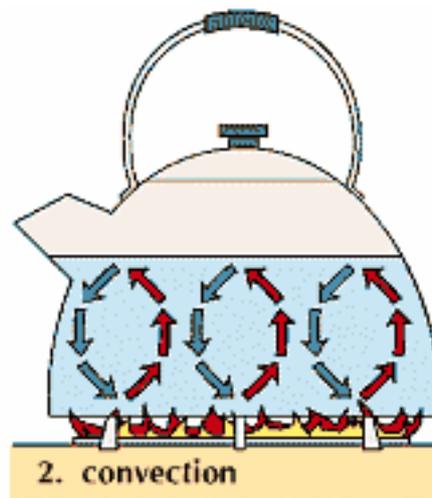
La convection n'introduit rien de fondamentalement différent de ce que l'on connaît déjà, grâce à la conduction et à la mécanique des fluides. La mécanique des fluides permet le calcul du champ de vitesse de fluide, auquel se superpose un problème de conduction dans un milieu déformable.

La convection, n'est donc, que la conduction dans un fluide déformable. Dans la pratique le milieu (1) est souvent un solide le milieu (2) est un fluide.

Le mouvement du fluide peut être dû à un des deux causes suivantes, ce qui conduit à la définition de deux modes de convection.

- ***Convection forcée*** : Le mouvement du fluide est imposé par une source extérieure d'énergie tel que pompe, ect.

- ***Convection libre ou naturelle*** : Le mouvement du fluide est dû au phénomène de transmission de chaleur lui même. Les gradients de température créent des gradients de masse volumique et par conséquent un mouvement du fluide.



***Transfert convectif***

### ***Différents échanges convectifs***

- ✓ échange thermique monophasique en convection forcée
- ✓ échange thermique monophasique en convection naturelle
- ✓ échange thermique accompagné d'ébullition
- ✓ échange thermique accompagné de condensation
- ✓

### I - 3. Définition du coefficient de transfert de chaleur par convection

On considère R résistance thermique équivalente à celle que le flux de chaleur rencontrerait en conduction à travers une paroi dont l'épaisseur serait celle du film (laminaire).

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

e: épaisseur du film  
λ : Conductivité thermique du fluide

Rigoureusement, le flux de chaleur par unité de surface s'écrit :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e}(T_p - T_i)$$

Tp: température de paroi solide  
Ti : température à la limite du film laminaire

Pour un régime bien établi, on peut considérer que la température du fluide au delà du fluide laminaire est  $T_\infty$ , et on prend comme densité de flux de chaleur

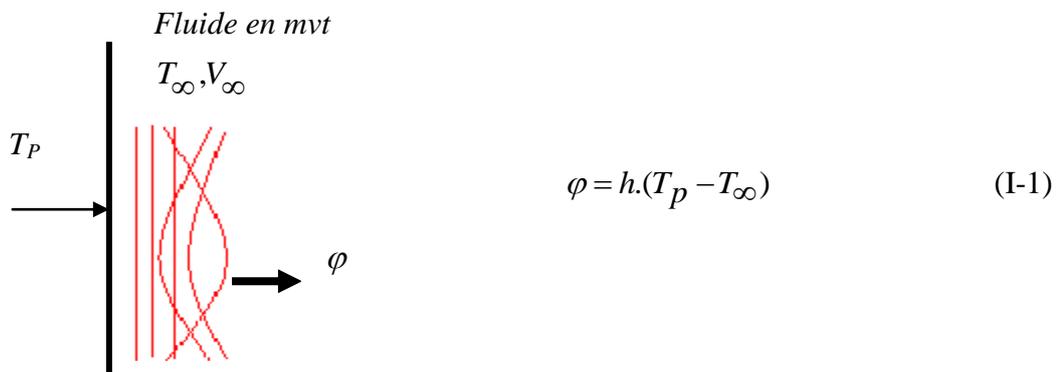
$$\varphi = \frac{\lambda}{e}(T_p - T_\infty) \quad W/m^2$$

$T_\infty$  : Température du fluide loin de la paroi.  
Tp: température de paroi solide

Cette loi simple, présente une énorme difficulté dans son application puisqu'on ne connaît pas l'épaisseur e du film laminaire. C'est ce qui amène à définir un coefficient de transfert de chaleur superficiel du coefficient de transfert de chaleur par convection par :

$$h = \frac{\lambda}{e} \quad Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$$

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent). Le flux de chaleur  $\varphi$  est donné par la loi de Newton



Avec

$\varphi$ :	Densité de flux de chaleur transmis par convection	(Watt/m <sup>2</sup> )
h :	Coefficient de transfert de chaleur par convection	W m <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup>
$T_p$ :	Température de la surface du solide	°C
$T_\infty$ :	Température du fluide loin de la surface du Solide	°C
$V_\infty$ :	Vitesse du fluide loin de la paroi	m/s
S :	Aire de la surface de contact solide/fluide	m <sup>2</sup>

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer  $h$  qui dépend d'un nombre important de paramètres : Caractéristiques du fluide, de l'écoulement, de la température, de la forme de la surface d'échange .....

Le coefficient d'échange de chaleur par convection  $h$  est une fonction complexe de l'écoulement du fluide, des propriétés thermiques du milieu fluide et de la géométrie du système. Bien que la relation (I-1) soit utilisée pour déterminer le flux de chaleur par convection entre une surface et un fluide en contact, cette relation est impuissante à expliquer le mécanisme de l'écoulement de chaleur par convection.

Les calculs de convection ont donc pour objet principal de fournir des expressions de  $h$  (ou directement  $\varphi$ ) en fonction des principaux paramètres dynamique et thermique du l'écoulement.

Le nombre élevé de paramètres mis en jeu (vitesse, temps, géométrie,...) constitue bien sur une source de difficulté. Mais il ne faudrait pas en déduire que la convection est une discipline inabordable. Dans ce qui suit on va essayer de surmonter les difficultés et de viser deux objectifs : Compréhension du mécanismes physiques de transfert de chaleur et présentation didactique des méthodes de calculs.

**Exemple:** ordre de grandeur du coefficient  $h$  de transfert de chaleur par convection pour différentes configurations

**Convection Naturelle**

Dans un gaz	$2 \rightarrow 10 \text{ } \text{wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Dans un liquide	$100 \rightarrow 1000 \text{ } \text{wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

**Convection forcée**

Dans un gaz	$10 \rightarrow 200 \text{ } \text{wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Dans un liquide	$100 \rightarrow 5000 \text{ } \text{wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

**I.- 4. Évaluation des coefficients d'échange de chaleur par convection :**

Il existe quatre méthodes générales pour déterminer les coefficients d'échange de chaleurs par convection.

- 1- Résolution analytique (solutions mathématiques exactes) des équations aux dérivées partielles décrivant le mouvement.
- 2- Les études approchées de la couche limite par les méthodes d'intégration.
- 3- L'analyse dimensionnelle combinée avec les expériences.
- 4- Résolution numérique des équations aux dérivées partielles basée sur une méthode de discrétisation du domaine physique, un algorithme et une méthode de résolution.

Toutes ces techniques ont contribué à notre compréhension de transfert de chaleur par convection. Cependant, une seule méthode ne peut résoudre tous les problèmes, car chacune d'elles possède des limites qui restreignent l'étendue de son application.

Toutes ces méthodes exigent à des degrés divers la connaissance des équations fondamentales ou équations de conservation (voir annexe A).

Dans le cadre de ce cours, on s'intéresse à la 2<sup>ième</sup> et la 3<sup>ième</sup> méthode.

\*\*\*\*\*