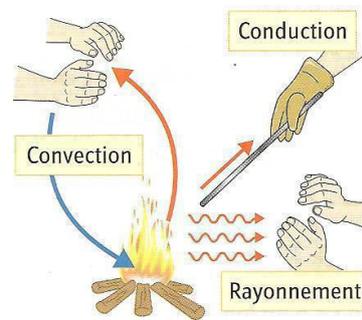


# GENERALITES SUR LES TRANSFERTS DE CHALEUR



KHALDI Souheyla

# Table des matières



<b>Objectifs</b>	3
<b>Introduction</b>	4
<b>I - Généralité</b>	5
1. Qu'est-ce que la chaleur ? .....	5
2. Exercice .....	5
3. Qu'est ce qu'un transfert de chaleur? .....	5
4. Quantité de chaleur, flux de chaleur et densité de chaleur .....	6
5. Température .....	6
5.1. Échelle de température .....	6
5.2. Champ de température .....	7
5.3. Gradient de température .....	8
6. Capacité thermique massique .....	8
<b>II - Formulation d'un problème de transfert de chaleur</b>	9
1. Bilan d'énergie .....	9
2. Expression des flux d'énergie .....	9
2.1. Modes de transfert de chaleur .....	9
2.2. Stockage d'énergie .....	13
2.3. Génération d'énergie .....	13
3. Exercice .....	14
4. Exercice .....	14
5. Exercice .....	15
6. Exercice .....	15

# Objectifs

## 1. *objectif du module*

A l'issue de ce cours, les étudiants devraient être capable de :

- Connaître les modes principaux de transferts de chaleur
- Mesurer les flux de chaleur dans différents systèmes (ailettes, échangeurs de Chaleur, isolation Thermique ...)
- Appliquer les principes de conservation et les lois constitutives adéquates.

## 2. *Savoirs et compétences prérequis*

Pour suivre efficacement ce cours, il est préférable de posséder des bases de thermodynamique ainsi que des bases de mathématiques.

# Introduction



La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. On distingue habituellement deux types d'énergie :

1) le travail noté  $W$  qui peut prendre diverses formes selon l'origine physique du transfert en jeu (électrique, magnétique, mécanique.....), et 2) la chaleur notée  $Q$ .

Dans le cadre de ce cours, nous nous limiterons de façon modeste, parmi les transferts énergétiques, à l'étude des transferts de chaleur ou transferts thermiques, selon un point de vue macroscopique. Nous serons ainsi amené à répondre à trois questions:

1. Qu'est ce qu'un transfert de chaleur?
2. Comment la chaleur est elle transférée?
3. Pourquoi est-ce important de l'étudier?

Les réponses apportées à ces trois questions nous permettrons de comprendre les mécanismes physiques en jeu dans les transferts de chaleur et d'apprécier l'importance de ces transferts de chaleur dans les problèmes industriels, environnementaux et économiques.

# Généralité

Qu'est-ce que la chaleur ?	5
Exercice	5
Qu'est ce qu'un transfert de chaleur?	5
Quantité de chaleur, flux de chaleur et densité de chaleur	6
Température	6
Capacité thermique massique	8

## 1. Qu'est-ce que la chaleur ?

La chaleur c'est une forme d'énergie, elle est causée par l'agitation, au sein de la matière, des molécules et des atomes. Donc " l'énergie thermique" ou bien la chaleur est l'énergie associée au mouvement désordonné des particules contenues dans une substance.

L'unité de la chaleur est le joule. D'autres unités d'énergie sont utilisées:

Joule (J)	kcal	British thermal unit (Btu)
	$1,239 \cdot 10^{-4}$	$9,478 \cdot 10^{-4}$
4184	1	3,966
1055	0,252	1

## 2. Exercice

La chaleur est une forme d'énergie donc son unité légale est:

- le watt
- le joule
- la calorie

## 3. Qu'est ce qu'un transfert de chaleur?

Un transfert de chaleur qu'il convient d'appeler transfert thermique ou transfert par chaleur est un transit d'énergie thermique d'un système à un autre à cause d'une différence de température.

Deux corps ayant la même température sont dits en « équilibre thermique ». Si leur température est différente, un transfert de chaleur se produit entre eux. Le deuxième principe de la thermodynamique admet que la chaleur (ou énergie thermique) ne peut passer que d'un corps chaud vers un corps froid, c'est-à-dire d'un corps à température donnée vers un autre à température plus basse.

## 4. Quantité de chaleur, flux de chaleur et densité de chaleur

La quantité de chaleur (notée :  $Q$ ) est la chaleur nécessaire pour porter la température d'un corps de la température  $T_1$  à  $T_2$  (en K ou en °C). C'est aussi l'énergie nécessaire pour effectuer un changement d'état (exemple : passage de l'état liquide à l'état gazeux). Note: il peut y avoir un changement d'état sans variation de température.

Le flux de chaleur  $\Phi$  représente le débit de chaleur, c'est à dire une quantité de chaleur transmise par unité de temps. Il a donc la dimension d'une puissance et se mesure en watts (W) dans le système SI.

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

En revanche, le flux de chaleur transférée par unité de surface est appelé "densité de chaleur  $\varphi$ ":

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

## 5. Température

Les particules qui composent la matière (molécules ou atomes) ne sont jamais au repos. Elles sont en vibration permanente et possèdent donc une certaine énergie cinétique. La température est une mesure indirecte du degré d'agitation microscopique des particules. Plus l'agitation est grande, plus la température est élevée. Si l'agitation cesse, c'est le zéro "absolu".

### 5.1. Échelle de température

Une échelle de température est une échelle de référence permettant de repérer quantitativement (c'est-à-dire à l'aide d'un nombre) la température d'un corps matériel, que celui-ci soit solide, liquide ou gazeux. Pour créer une échelle de température, les physiciens cherchent des intervalles de température entre deux points de référence : une situation "froide" et une situation "chaude".

Parmi toutes celles qui ont été inventées et utilisées, voici les trois échelles de température les plus utilisées dans le monde:

#### 5.1.1. Échelle Fahrenheit

Vers 1720, le physicien allemand Daniel Fahrenheit invente le thermomètre à mercure et définit son échelle de température. Il utilise une échelle de température prenant pour référence :

- Un mélange eau-glace-sel à l'équilibre pour le point bas
- l'ébullition de l'eau pour le point haut

Il a fixé le point de congélation de l'eau à 32 °F et le point d'ébullition à 212 °F.

### 5.1.2. Échelle Celsius

De son côté, en 1741, le physicien Anders Celsius choisi de prendre pour référence:

- L'ébullition de l'eau pour le point haut
- La congélation de l'eau pour le point bas

Il divise son échelle en 100 intervalles, qu'il appelle "degré Celsius" (°C), démarrant de zéro pour le point haut et 100 pour le point bas (pour lui, l'eau se transformait en glace à 100°C et bouillait à 0°C).

Ensuite, on a inversé son échelle pour obtenir celle qu'on utilise actuellement : l'eau se transforme en glace à 0°C et bout à 100°C.

### 5.1.3. Échelle Kelvin

A la fin du 19e, les lois de la thermodynamique font apparaître une idée nouvelle : il faut une échelle de température qui a une limite inférieure "théorique et absolue", infranchissable. Le physicien anglais Lord Kelvin suggère donc d'utiliser une échelle de température où le zéro serait un zéro en dessous duquel on ne peut pas descendre : le "zéro absolu".

Et les physiciens connaissent cette température infranchissable : c'est - 273,15 °C, la température à laquelle plus rien ne bouge dans les atomes. Il prend donc l'échelle de Celsius (en gardant le même intervalle pour chaque degré) et "décale simplement le "zéro" à -273,15 °C. On parle alors de "degré Kelvin" et on la note "K" (sans le ° devant).

### 5.1.4. Règles de conversion

- Entre Fahrenheit et Celsius

$$T(^{\circ}\text{F}) = 32 + T(^{\circ}\text{C}) \times 9/5$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = [ T(^{\circ}\text{F}) - 32 ] \times 5/9$$

- Entre Kelvin et Celsius

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

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

## 5.2. Champ de température

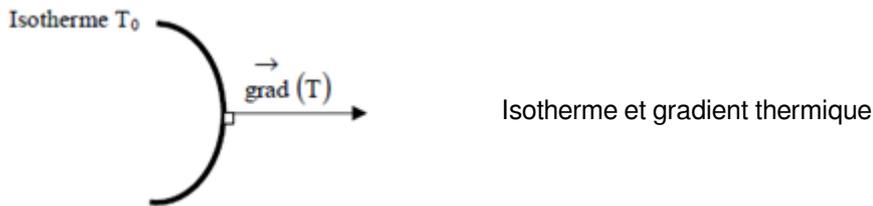
Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température :  $T = f(x,y,z,t)$ . La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un

scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Évolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

### 5.3. Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température



Avec :

$\vec{n}$  : vecteur unitaire de la normale et  $\partial T/\partial n$  : dérivée de la température le long de la normale

## 6. Capacité thermique massique

La capacité thermique massique d'une substance est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1K la température d'une masse de 1 kg de cette substance. Elle s'exprime en  $J.kg^{-1}.K^{-1}$

Pour l'eau liquide :  $C_p = 4187 J.kg^{-1}.K^{-1}$

$1 kcal.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1} = 1 Btu.lb^{-1}.^{\circ}F^{-1}$

$1 J.kg^{-1}.K^{-1} = 2,39.10^{-4} kcal.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

lb est le pound (ou livre) :

$1 kg = 2,20462262185 lb$

# Formulation d'un problème de transfert de chaleur

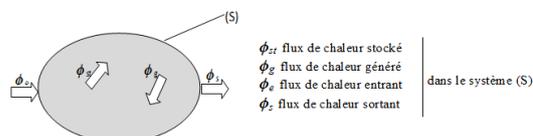


Bilan d'énergie	9
Expression des flux d'énergie	9
Exercice	14
Exercice	14
Exercice	15
Exercice	15

## 1. Bilan d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être :

Système et bilan énergétique



On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\phi_e + \phi_g = \phi_s + \phi_{st}$$

## 2. Expression des flux d'énergie

Il faut ensuite établir les expressions des différents flux d'énergie. En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, on obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système.

### 2.1. Modes de transfert de chaleur

Lorsque l'on met en présence deux corps de températures différentes, ils échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à atteindre un état d'équilibre qui se traduit par l'uniformisation de leurs

températures. Ces échanges thermiques sont de trois types:

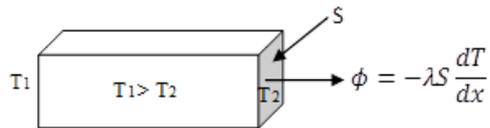
1. La conduction thermique ou diffusion thermique
  2. La convection
  3. Le rayonnement thermique
- Cf. "video transfert de chaleur"

### 2.1.1. Conduction

Ce transfert de chaleur est le seul que l'on puisse rencontrer dans les solides. La propagation de la chaleur s'effectue d'atome en atome, de proche en proche, par transmission d'énergie d'agitation thermique. En milieu solide les atomes, dont les positions d'équilibre sont fixes dans l'espace, transfèrent de la chaleur sans déplacement de matière.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de *Fourier*: le flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température

Schéma du transfert de chaleur conductif



$$\phi = -\lambda S \frac{dT}{dx}$$

$\phi$  : Puissance transférée (W)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m<sup>2</sup>)

x : Variable d'espace dans la direction du flux

Le signe (-) dans l'équation est dû au fait que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température.

$\lambda$  : Conductivité thermique du matériau, elle caractérise la propension d'un matériau à conduire la chaleur il s'exprime en W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Lorsqu'un matériau laisse facilement diffuser la chaleur on dit qu'il est *conducteur*. C'est le cas notamment des métaux dont la conductivité thermique est élevée. À l'inverse, un matériau tel que l'air au repos s'oppose au transfert de chaleur et est donc appelé *isolant*. Dans ce cas la conductivité thermique est faible.

On trouvera dans le tableau 1 les valeurs de la conductivité thermique  $\lambda$  de certains matériaux parmi les plus courants.

Matériau	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> )	Matériau	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> )
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

## 2.1.2. Convection

C'est, de façon générale, un transfert de chaleur entre deux phases de nature différente. Elle intervient, par exemple, à la surface de séparation entre un solide et un fluide (liquide ou gaz), ou aussi bien, à la surface libre entre un liquide et un gaz.

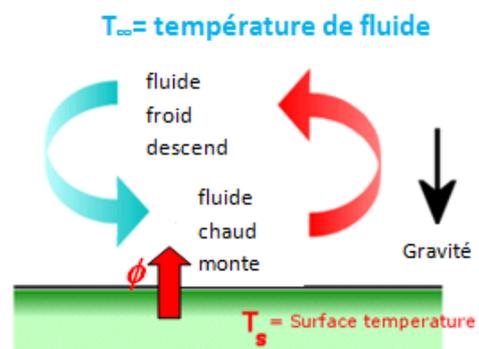
Le transfert de chaleur s'effectue en 2 phases :

- 1ère phase : la chaleur est échangée par conduction entre la surface solide et une mince couche de fluide (appelée "film"), au voisinage de la surface.
- 2ème phase : le fluide du film est déplacé dans la masse du fluide ; ce déplacement du fluide est, soit naturel (variation de la masse volumique du film chauffé ou refroidi, par rapport celle du fluide en masse), soit artificiel (action d'une pompe, d'un agitateur). On parle alors soit de convection naturelle, soit de convection forcée.

Donc, le transfert de chaleur par convection est provoqué par le déplacement d'un fluide, qui transporte avec lui l'énergie qu'il contient.

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 transmis est donné par la relation dite loi de *Newton* :

mécanisme de la convection



$$\phi = hS (T_s - T_\infty)$$

$\phi$  : Puissance transférée (W)

S : Surface traversée (m<sup>2</sup>)

T<sub>s</sub> : Température de la surface (K)

T<sub>∞</sub> : Température moyenne du fluide (K)

h : Coefficient moyen de transfert convectif (W/m<sup>2</sup>K)

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.

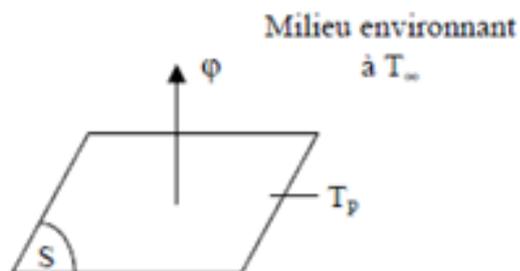
### 2.1.3. Rayonnement thermique

Tous les corps quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux, de température absolue T>0 K, émettent des ondes électromagnétiques ; on dit qu'ils émettent "un rayonnement thermique". En plus, au processus d'émission de rayonnement thermique s'ajoute un processus d'absorption des radiations électromagnétiques provenant de l'environnement de ces corps. Leur état thermique est alors régi par le bilan des processus d'émission et d'absorption.

Le rayonnement thermique correspond à un transfert de chaleur ne nécessitant aucun support matériel, c'est ainsi que la terre est "chauffée" par le rayonnement thermique du soleil qui s'est propagé dans le vide, de la surface solaire, qui l'a émis, jusqu'à la terre qui l'absorbe.

Le flux de chaleur échangé entre la surface S et l'environnement est donné par loi de *Stefan-Boltzmann* :

transfert de chaleur par rayonnement



$$\phi = \sigma \varepsilon S (T_s^4 - T_\infty^4)$$

$\phi$ : Puissance transférée (W)

$\sigma$  : constante de Stefan Boltzmann = 5.67\*10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>

S : Surface traversée (m<sup>2</sup>)

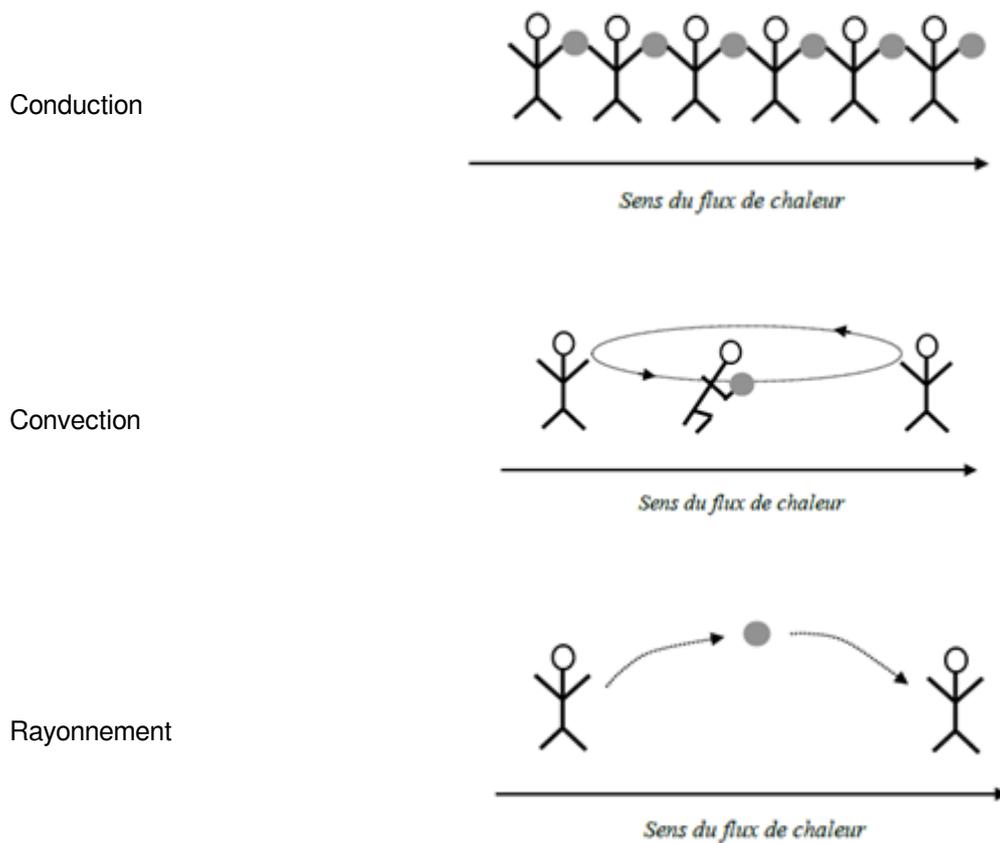
T<sub>s</sub> : Température de la surface (K)

T<sub>∞</sub> : Température du milieu environnant la surface (K)

$\varepsilon$  : Émissivité de la surface

## Complément

On peut schématiquement représenter les transferts de chaleur comme décrit ci-dessous (Figure 1) :



## 2.2. Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où :

$$\phi_{st} = m C_p \frac{dT}{dt}$$

$\phi_{st}$  : Puissance de chaleur stocké (W)

m : Masse (kg)

$C_p$  : Chaleur spécifique (J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>)

T : Température (°C)

t : Temps (s)

## 2.3. Génération d'énergie

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est

convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme :

$$\phi_g = q \cdot V$$

$\phi_g$  : Puissance de chaleur générée (W)

$q$  : Densité volumique d'énergie générée (W m<sup>-3</sup>)

$V$  : Volume (m<sup>3</sup>)

Les processus dégageant ou absorbant de l'énergie sont:

- L'effet Joule
- Une réaction chimique exothermique ou endothermique
- Une réaction nucléaire
- Un changement de phase

### 3. Exercice

Le transfert de chaleur qui s'effectue de proche en proche sans déplacement de matière est le mode de transfert par:

- conduction
- convection
- Rayonnement

### 4. Exercice

Le transfert de chaleur qui s'effectue à travers l'espace au moyen d'ondes électromagnétiques est le mode de transfert par:

- conduction
- convection
- rayonnement

## 5. Exercice

Le transfert de chaleur dans un fluide qui s'effectue par le mouvement de ce fluide est le mode de transfert par:

- conduction
- convection
- rayonnement

## 6. Exercice

Parmi les 3 matériaux suivants, lequel est le meilleur conducteur de la chaleur ?

- bois
- plastique
- métal