

Chapitre II: Transfert de la chaleur

1. Généralités :

Les opérations impliquant des transferts thermiques se rencontrent dans presque toutes les usines alimentaires où les aliments sont exposés à l'échange thermique plusieurs fois durant chauffage, le refroidissement, la réfrigération, la friture et/ou le blanchiment.

Le transfert d'énergie sous forme de chaleur est obtenu chaque fois qu'un gradient de température existera au sein d'un système ou lorsque deux systèmes, à températures différentes, seront mis en contact par l'intermédiaire d'une surface d'échange S .

La température et la chaleur sont des notions fondamentales en transferts thermiques :

- La température, T caractérise l'état d'un corps. Elle s'exprime en Kelvin (K) ou en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

- La chaleur, Q exprime une énergie échangée et a comme unité le Joule (J).

- Le flux de chaleur correspond à la quantité de chaleur Q échangée pendant une durée t ,

soit $\dot{Q} = \frac{Q}{t}$. Les flux de chaleur \dot{Q} s'expriment en Watts. On peut également raisonner en

densité de flux de chaleur \dot{q} , qui représente le flux de chaleur par unité de surface $\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S}$.

2. Modes de transmission de la chaleur :

On distingue trois modes de transmission de la chaleur : conduction, convection et rayonnement. Le chauffage par rayonnement est le mode le moins utilisé dans l'industrie alimentaire mais devient de plus en plus utilisé avec les micro-ondes et le chauffage infra-rouge.

2.1. Transfert de chaleur par conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur sans déplacement apparent de la matière sous l'effet d'un gradient de température. C'est le seul mode de transfert intervenant au sein des milieux solides. Le transfert de chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts :

-une transmission par la vibration des atomes

-une transmission par les électrons libres.

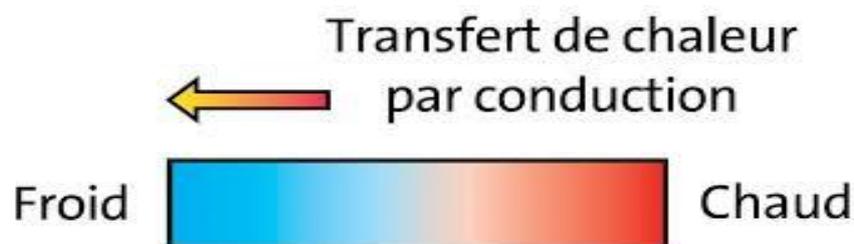


Figure n°03 : Transfert de chaleur par conduction

2.1.1 Loi de Fourier

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : le flux de chaleur transféré dans une direction donnée est proportionnel au gradient de température dans cette direction.

La loi de **Fourier** s'écrit donc :

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

où :

\dot{Q} : flux de chaleur, W

λ : conductivité thermique, W/(m.K)

A : Surface d'échange, m²

$\frac{dT}{dx}$: gradient de température en x, K/m

Remarque:

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

L'équation (1) indique que le flux de chaleur est :

proportionnel au gradient de la température

augmente avec la conductivité λ

se fait dans la direction des températures décroissantes

Les conductivités de quelques aliments, solvants, métaux et autres matériaux sont reportées dans le tableau suivant.

2.1.2 Notion de résistance thermique

La loi de Fourier présente une certaine analogie avec la loi d'Ohm où le gradient du potentiel électrique joue le rôle du gradient de température et le flux de chaleur celui du courant électrique. On peut donc établir les correspondances suivantes :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}}$$

L'équation 1 peut donc s'écrire :

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx} = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{A \Delta T}{\left(\frac{1}{\lambda}\right) \Delta x} = \frac{A \Delta T}{R_{th}} \quad (3)$$

Ou :

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (4)$$

Où \dot{q} est la densité de flux de chaleur en (W/m²) et R_{th} est la résistance thermique en (m².K/W).

Tableau n°09 : Conductivités thermiques de certains aliments et autres matériaux.

| Matériau | Conductivité thermique (W/(m.K)) | Température (° C) |
|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Aliments | | |
| Jus de pomme | 0.56 | 20 |
| Avocat | 0.43 | 28 |
| Pain | 0.16 | 25 |
| Carotte | 0.56 | 40 |
| Lait | 0.56 | 20 |
| Huile d'olive | 0.17 | 20 |
| Orange | 0.41 | 15 |
| Pêche | 0.58 | 28 |
| Eau | 0.57 | 20 |
| Gaz | | |
| Air | 0.024 | 0 |
| Air | 0.031 | 100 |
| Dioxyde de carbone | 0.015 | 0 |
| Azote | 0.024 | 0 |
| Métaux | | |
| Aluminium | 220 | 0 |
| Cuivre | 388 | 0 |
| Inox | 17-21 | 20 |
| Autres matériaux | | |
| Brique | 0.69 | 20 |
| Béton | 0.87 | 20 |
| Mousse de polystyrène | 0.036 | 0 |

Tableau n°10 : Notion de résistance thermique - Analogie électrique/thermique.

| | |
|---------------------------------|---|
| Différence de potentiel, U | Gradient de température, ΔT |
| Intensité du courant, I | Flux de chaleur, \dot{Q} |
| Résistance électrique, R_{el} | Résistance thermique, R_{th} |
| Loi d'Ohm, $U = RI$ | Par analogie avec l'électricité, $\Delta T = R_{th}\dot{Q}$ |

2.2. Transfert de chaleur par convection

La convection se réfère aux transferts thermiques qui s'appuient sur un milieu matériel avec mouvement de la matière. Par conséquent, ce mode de transfert concerne exclusivement les fluides : liquides et gaz. Le mouvement du fluide peut résulter des variations de masse volumique de ce même fluide en raison des différences de températures induites par le transfert de chaleur entre le fluide et la paroi, on parle alors de **convection naturelle** ou **libre**. Si le mouvement du fluide est causé par l'action de forces extérieures (pompes, agitateurs mécaniques, ventilateurs), il s'agira de **convection forcée**. Cette dernière est généralement accompagnée par de la convection libre.

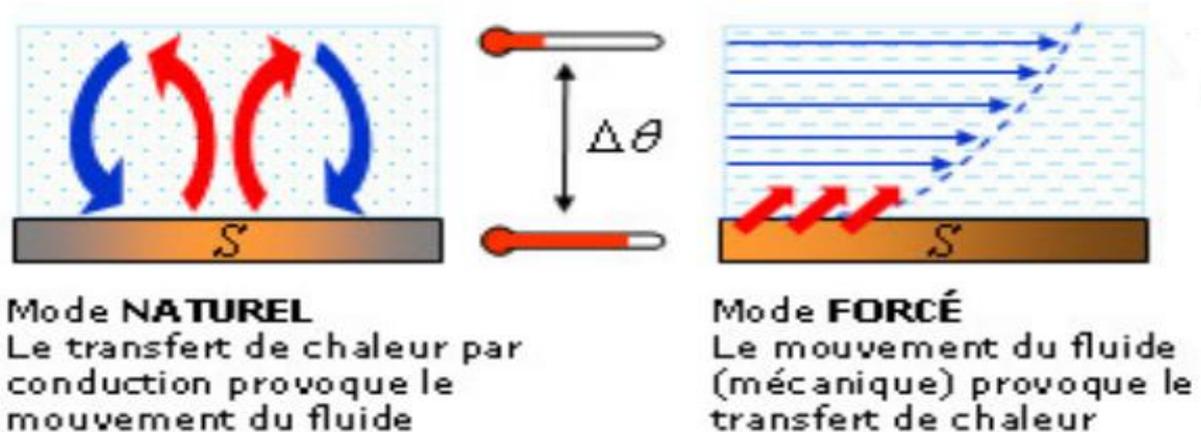


Figure n°04 : Les deux modes de transfert de chaleur par convection.

Le flux de chaleur transmis par convection, entre une paroi à température T_1 et un fluide à température T_2 , est donné par l'équation suivante :

$$\dot{Q} = h_c A (T_1 - T_s) \quad \text{ou} \quad \dot{Q} = \frac{A(T_1 - T_s)}{R_s} \quad (5)$$

où :

\dot{Q} : flux de chaleur, W

h_c : coefficient de transfert de chaleur par convection, W/(m².K)

R_s : Résistance thermique de la surface $R_s = \frac{1}{h_c}$, (m².K)/W

A : Surface d'échange, m²

T_1 : Température du fluide, (°C) ou (K)

T_s : Température à la surface ou à la paroi, (°C) ou (K)

À la différence de la conductivité thermique, qui dépend uniquement de la particularité du matériau, le coefficient de transfert de chaleur dépend de la vitesse de circulation du fluide, les propriétés du fluide, les caractéristiques de surface du solide ainsi que la géométrie de la situation.

2.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement 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.

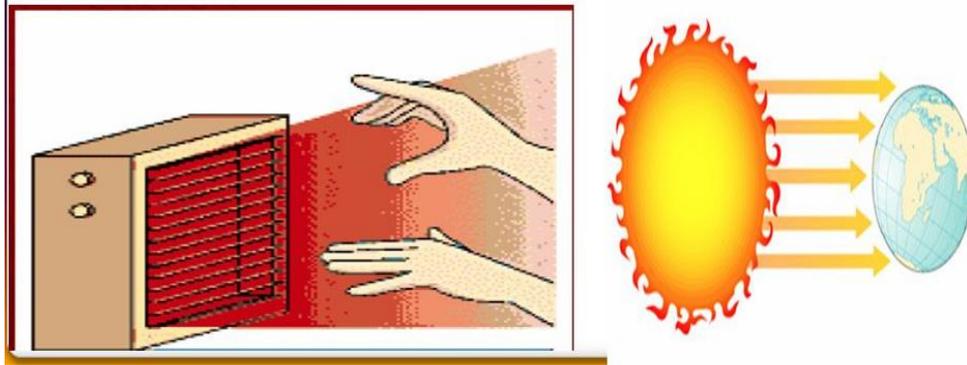


Figure n°05 : Transfert de chaleur par rayonnement

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-Boltzman :

$$\dot{Q} = \sigma A T^4 \quad (6)$$

où :

\dot{Q} : énergie émise, W

σ : constante de Stefan-Boltzman, $5,669 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

T : Température absolue, K

Dans le cas de surfaces réelles, le concept de corps gris est utilisé et l'équation 6 devient :

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A T^4 \quad (7)$$

où ϵ est l'émissivité du corps gris.

L'énergie transmise nette à l'aliment est :

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (8)$$

où T_1 est la température du corps émetteur et T_2 est la température de l'aliment.