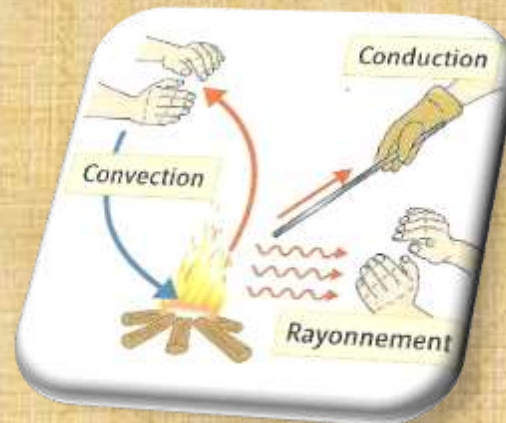
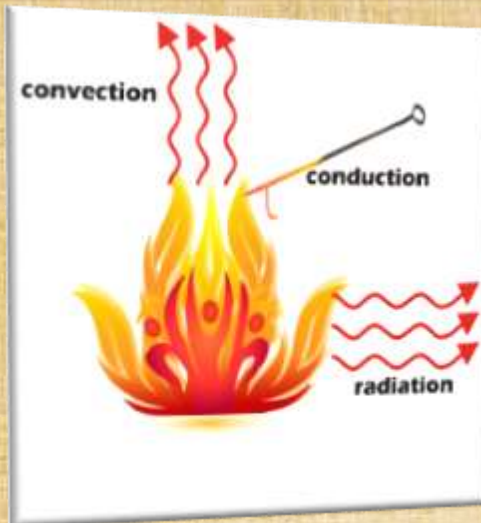




Dr. ZENASNI Mohamed Amine

# Transferts de chaleur et de matière



# Introduction

La transformation des matières premières d'origine agricole en produits finis alimentaires peut être analysée de différentes manières.

La première consiste à aborder ces diverses transformations par filière, en établissant pour chacune d'elle une monographie des différentes opérations réalisées.

Cette vision des choses est rapidement redondante, dans la mesure où l'on retrouve les mêmes opérations unitaires dans différentes filières.

- Les transferts de chaleur ont un rôle prépondérant dans les opérations élémentaires de pasteurisation, de stérilisation ou de concentration ;
- Les transferts de matière régissent principalement les opérations d'extraction par diffusion.

# Introduction

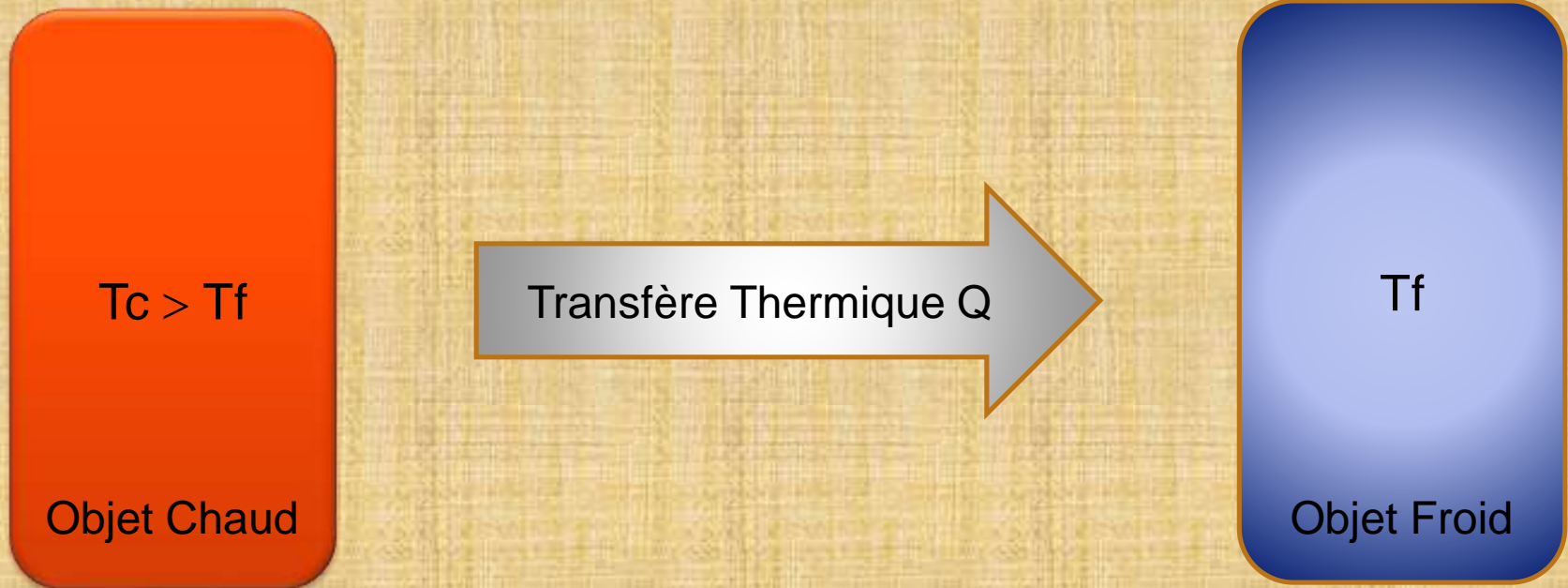
Les multiples procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur, soit parce que c'est le but recherché (fours, coulée, échangeurs, thermoformage, induction, lits fluidisés, trempe, refroidissement), soit parce que ceux ci interviennent d'une manière inévitable (chocs thermiques, pertes de chaleurs, rayonnement).

Des connaissances de base en ce domaine sont donc nécessaires à l'ingénieur de production ou de développement pour

- comprendre les phénomènes physiques qu'il observe;
- maîtriser les procédés et donc la qualité des produits.

# Introduction

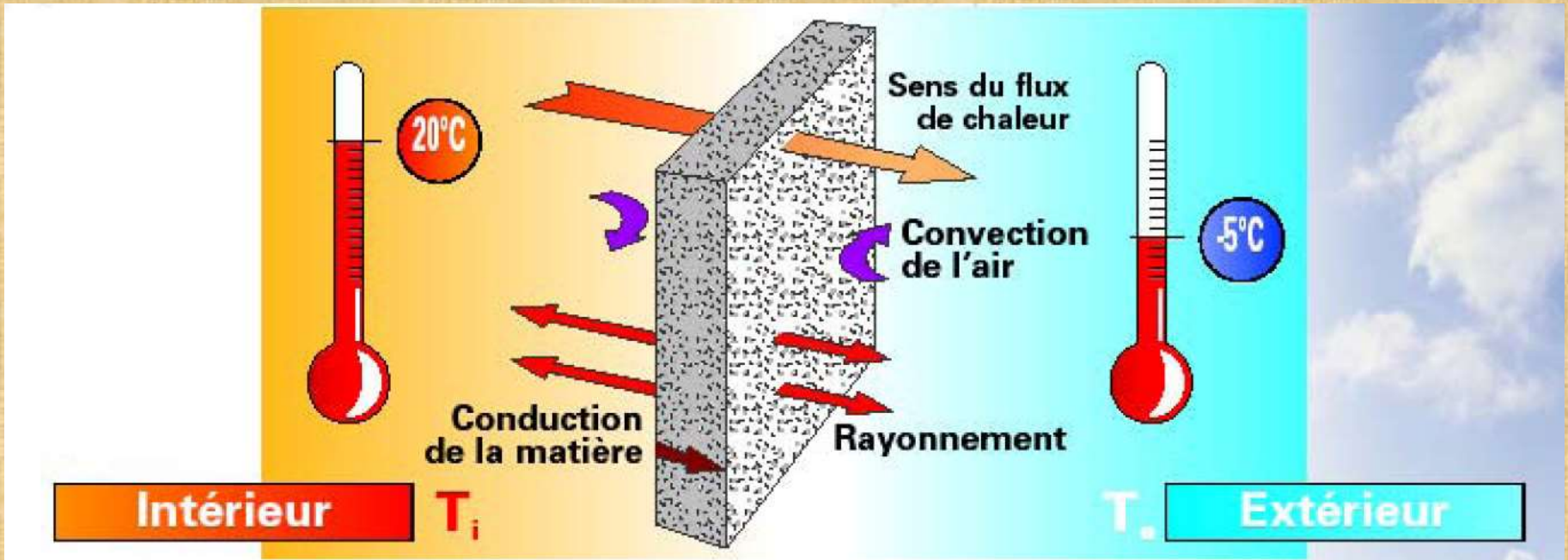
Le deuxième principe de la thermodynamique admet que la chaleur (ou énergie thermique) ne peut passer que d'un corps chaud vers un corps froid, c'est-à-dire d'un corps à température donnée vers un autre à température plus basse.



L'énergie thermique  $Q$  ne se transmet spontanément que dans un sens

Le transfert thermique est un transfert d'énergie irréversible

# Flux de chaleur surfacique



La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur crée un écoulement d'énergie, **le flux de chaleur** :  
 **$\varphi$  (phi)**




Le flux de chaleur exprime pour chaque m<sup>2</sup> de paroi l'énergie écoulee par unité de temps.  $\varphi$  s'exprime en **W/m<sup>2</sup>**.  
 $\varphi$  est la somme des transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement

# Différents modes de transfert thermique

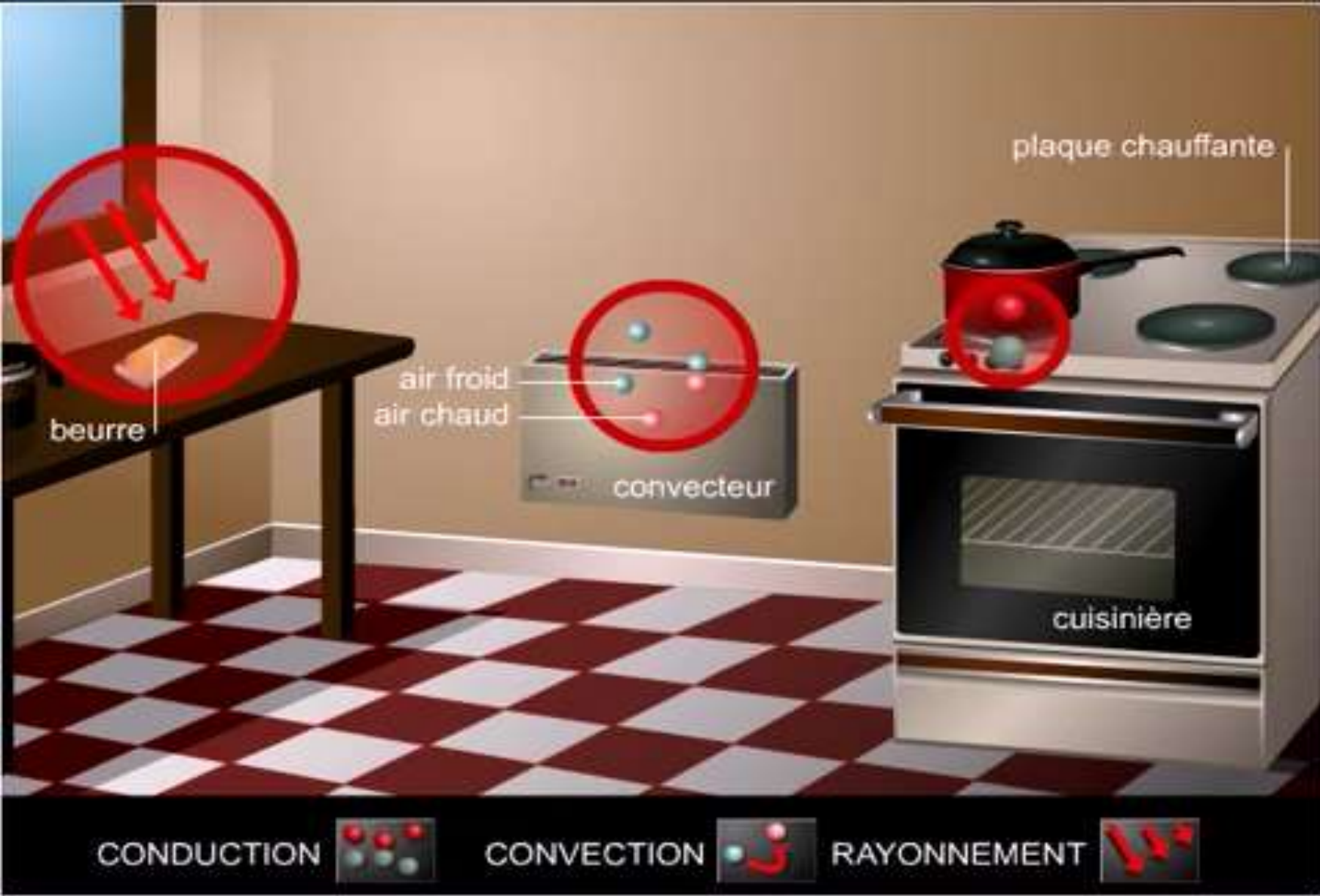
Le chapitre "Phénomènes de Transfert" a pour objet d'étudier la manière dont s'effectue cet échange. Le transfert de chaleur se produit suivant deux modes semblables:

- soit par contact: c'est la **conduction** thermique;
- soit à distance: c'est le **rayonnement** thermique.
- On considère un troisième mode de transfert d'énergie calorifique qui est la **convection** (échange de chaleur entre un fluide et un solide).

# Différents modes de transfert thermique

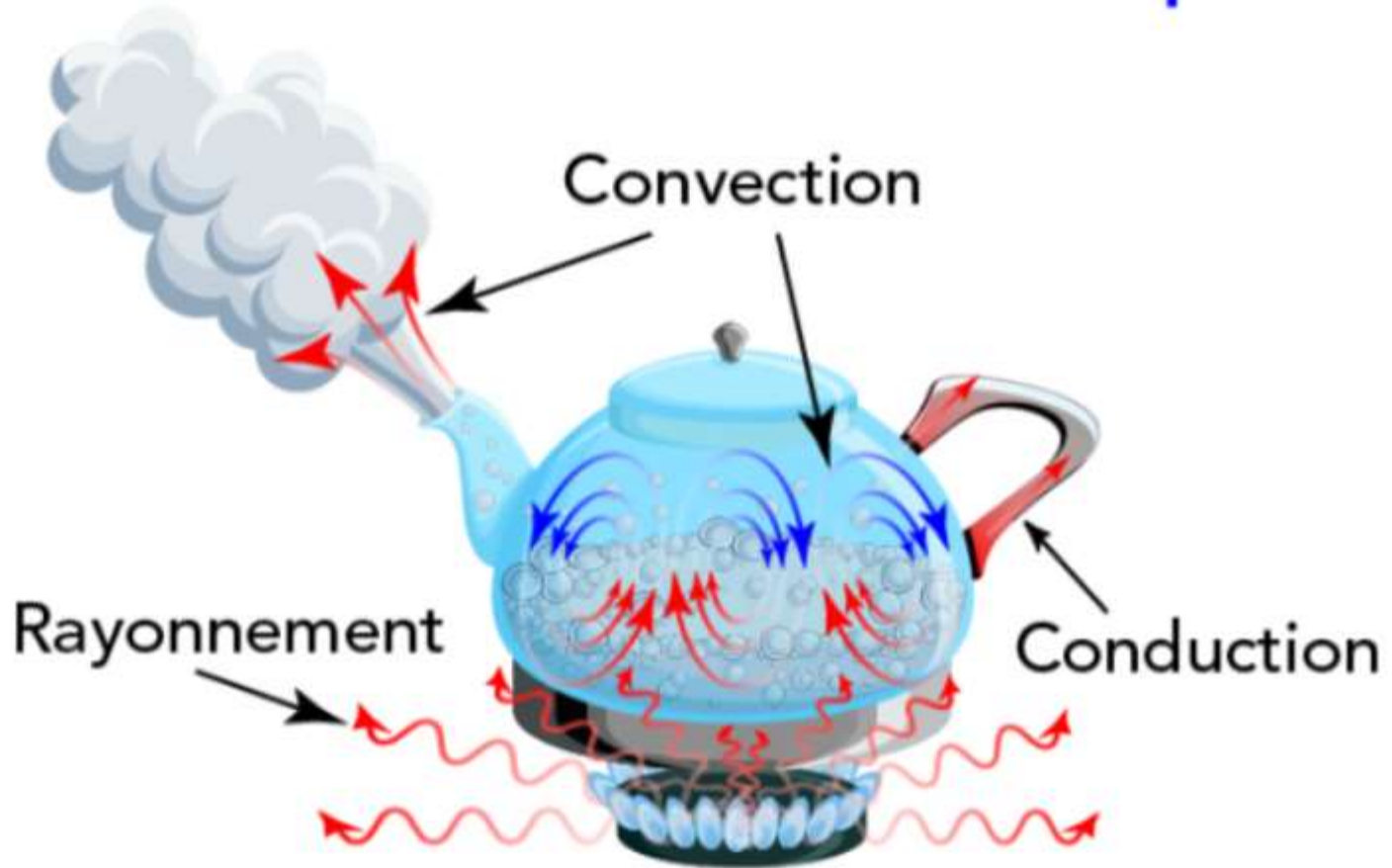
Type de transfert	Image	Caractéristiques	Exemple
<b>Conduction</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Entre molécules adjacentes.</li><li>➤ Contact direct.</li><li>➤ Pas de mouvement de matière</li></ul>	Fer à repasser
<b>Convection</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Transfert d'énergie par transfert de matière fluide chauffée</li><li>➤ Le mouvement de matière à l'intérieur de l'aliment distribue la chaleur</li><li>➤ Le mouvement est naturel ou artificiel</li></ul>	Sèche-cheveux
<b>Rayonnement</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Transfert de chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques</li></ul>	Rayons du Soleil

# Différents modes de transfert thermique

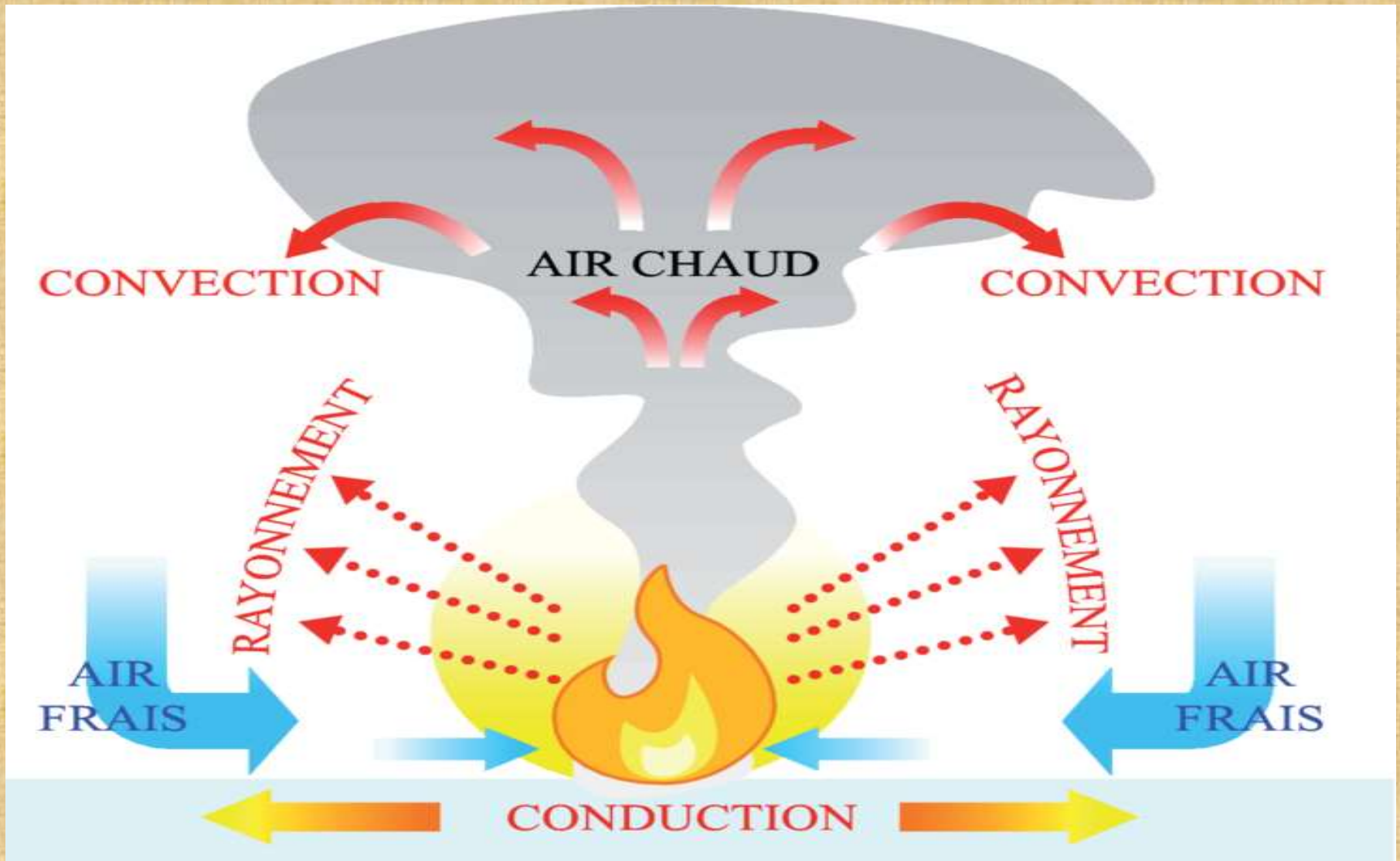


# Différents modes de transfert thermique

## Modes de transfert thermique



# Différents modes de transfert thermique



# Différents modes de transfert thermique

Ces trois modes de transfert peuvent coexister.

Le rayonnement peut être considéré comme dominant dans les cas de très hautes températures, car il est proportionnel à la puissance 4 de la température absolue.

Cependant, dans la majorité des cas en industrie alimentaire, les températures mises en œuvre (entre  $-20\text{ °C}$  et  $+150\text{ °C}$ ) sont faibles et le rayonnement peut être négligé par rapport aux deux autres modes de transfert.

# Procédés unitaires courants incluant le transfert de chaleur comme opération unitaire

## Chaleur

- Blanchiment
- Stérilisation
- Cuisson
- Pasteurisation
- Séchage
- Évaporation

## Chaleur en 1<sup>er</sup>

- Cuisson-extrusion
- Distillation

## Froid

- Réfrigération
- Congélation

## Froid en 1<sup>er</sup>

- Lyophilisation

# Chauffage

## Objectifs du chauffage

### Acceptabilité gustative & digestibilité

- Griller, rôtir, cuire au four (chaleur sèche)
- Frire
- Bouillir

### Conservation & sécurité sanitaire

- Blanchiment
- Pasteurisation
- Stérilisation

# Chauffage

## Changements induits par le chauffage

### Désirables

- Destruction des microorganismes
- Inactivation des enzymes
- Amélioration de la couleur, de l'arôme, du goût, de la texture
- Amélioration de la digestibilité

### Indésirables

- Dégradation des nutriments
- Dégradation des attributs sensoriels

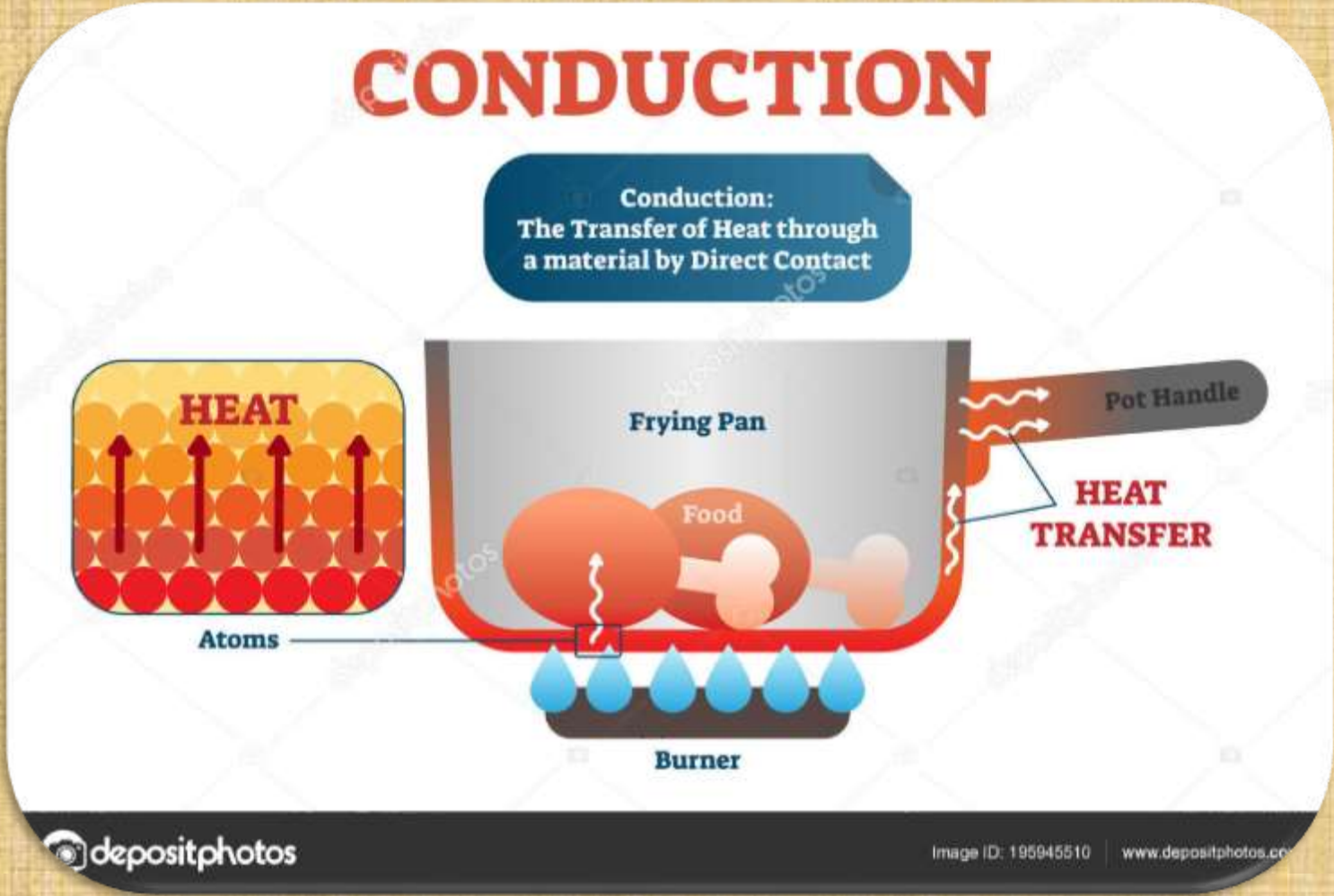
# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique

- La conduction est le phénomène par lequel la chaleur se transmet d'une région à haute température vers une autre à basse température à l'intérieur d'un milieu solide (liquide ou gazeux sous certaines conditions) ou entre différents milieux mis en contact.
- Résultat de la différence d'énergie entre deux milieux en contact
- La conduction s'effectue sans mouvement de matière.

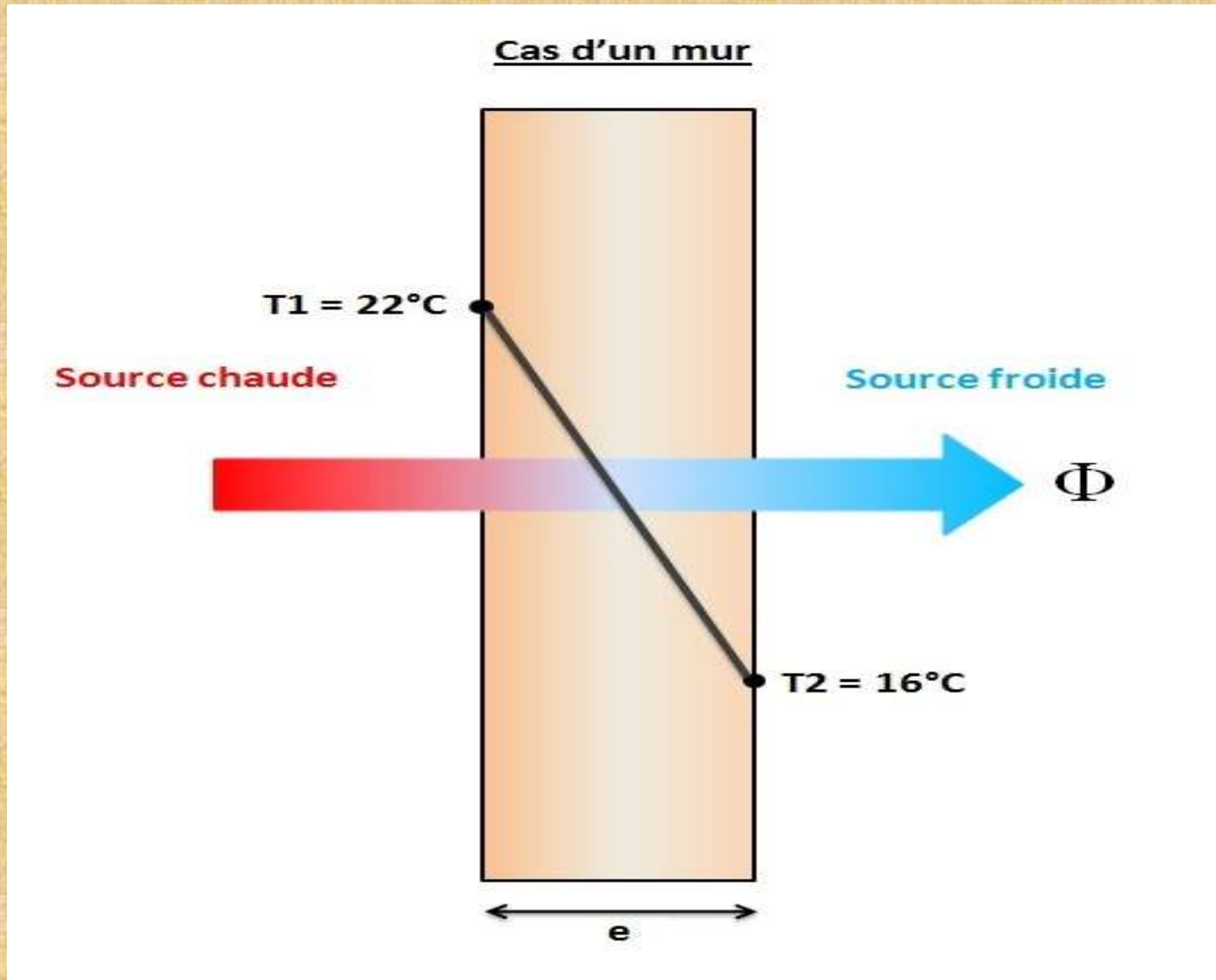
# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique



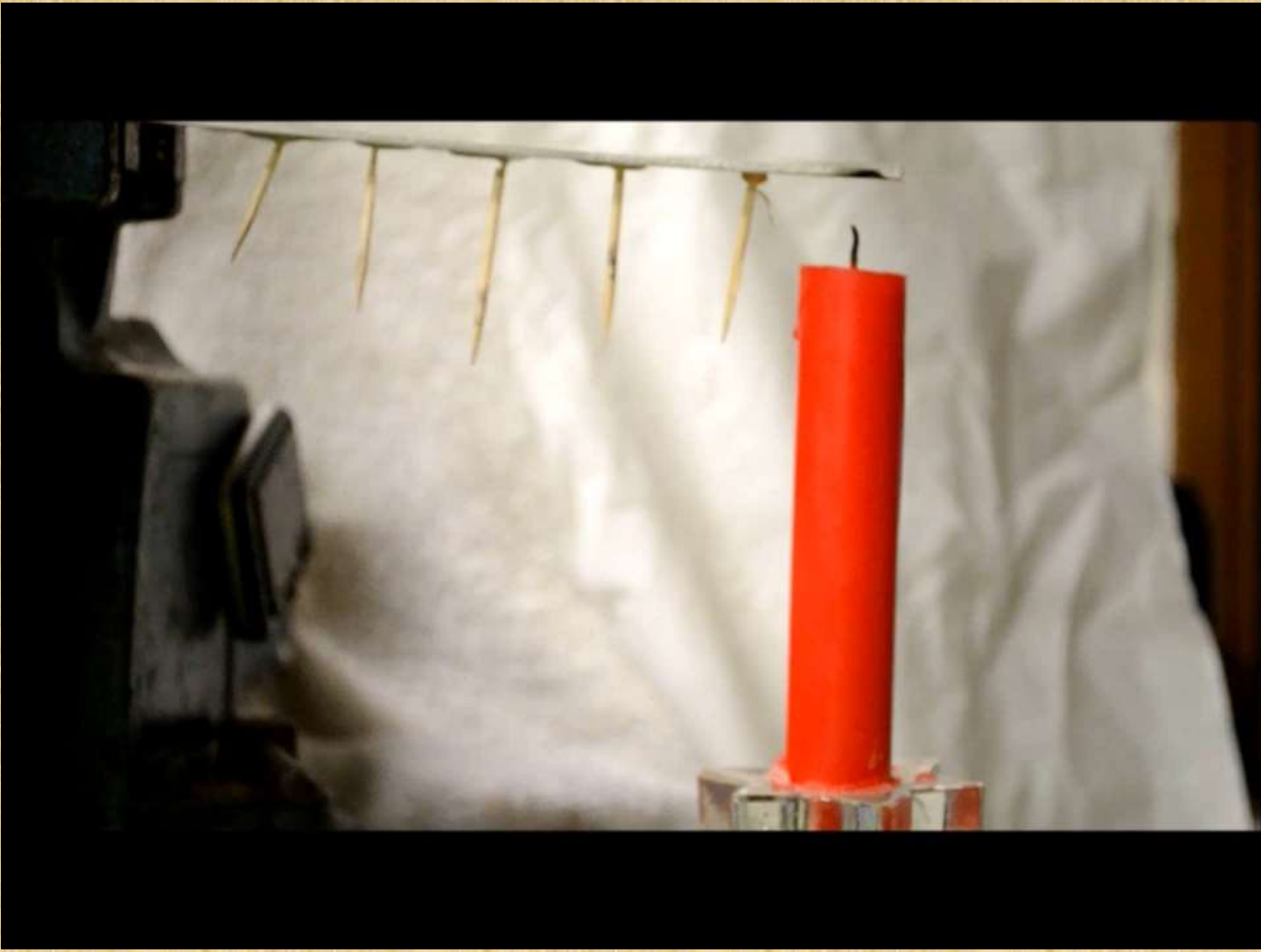
# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique



# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique



# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique



# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique

### Loi de Fourier

La relation fondamentale de la transmission de la chaleur par conduction a été proposée par FOURIER en 1822.

Pour bien comprendre cette loi, il faut au préalable définir un certain nombre de grandeurs physiques.

Joseph Fourier  
1768-1830



# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique

### Loi de Fourier

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : En tout point d'un milieu isotrope, **la densité de flux thermique est proportionnelle au gradient de la température.**

La présence, dans un milieu matériel sans mouvement macroscopique, d'une inhomogénéité de température fait apparaître un transfert thermique par conduction qui possède les propriétés suivantes :

- **Le transfert a lieu des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides**
- **Il est proportionnel à la surface à travers laquelle on évalue la puissance diffusée ainsi qu'à la durée du transfert**
- **Il augmente de manière linéaire avec le gradient de la température**

# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique

### Loi de Fourier

$$\vec{J} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T$$

➤ J : Flux par unité de surface      Unité :  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $J > 0$ )

➤  $\lambda$  : Conductivité thermique      Unité :  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$        $\lambda_{\text{or}} = 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$   
 $\lambda_{\text{air}} = 0.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

➤ T : Température      Unité : K

❖ Pour une surface S, le flux transféré (puissance thermique) est par :

$$\Phi = J \cdot S$$

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

$\Phi$  : Puissance thermique.

Unité : W

Q : Chaleur transférée.

Unité : J

# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique

### Loi de Fourier

Quelques conductivités thermiques : ( $\lambda$  en  $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

- **Gaz** ( $\lambda$  de 0,006 à 0,18) : mauvais conducteurs
- **Liquides non métalliques** ( $\lambda$  de 0,1 à 1) : conducteurs moyens (eau) - **Solides métalliques** ( $\lambda$  de 10 à 400) : excellents conducteurs (cuivre, acier)
- **Matériaux non métalliques** ( $\lambda$  de 0,004 à 4) : conducteurs moyens (verre, béton, bois) ou mauvais conducteurs (laine de verre, polystyrène expansé)

# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique

### Conduction en régime permanent

Lorsque dans un système, la répartition des températures évolue en fonction du temps, on dit que le régime d'écoulement de la chaleur est variable ; au contraire, si la configuration du champ thermique est indépendante du temps, on dit que le régime est permanent.

L'écoulement unidirectionnel de la chaleur en régime permanent constitue la modélisation la plus simplifiée, mais correspond cependant à une approche satisfaisante pour de nombreux cas réels.

Nous traiterons deux cas :

- Mur homogène à faces parallèles (mur simple)
- Murs multiples

# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique

✓ Cas d'un mur simple.

### Loi de Fourier

Hypothèses :

- Pas de source interne de chaleur
- Toute la surface à la même température
- Régime permanent et propagation unidirectionnelle

• Loi de Fourier

$$J = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$J = \frac{\lambda}{e} \cdot (T_{P1} - T_{P2})$$

⇒

$$T_{p1} - T_{p2} = \frac{e}{\lambda} \cdot J$$

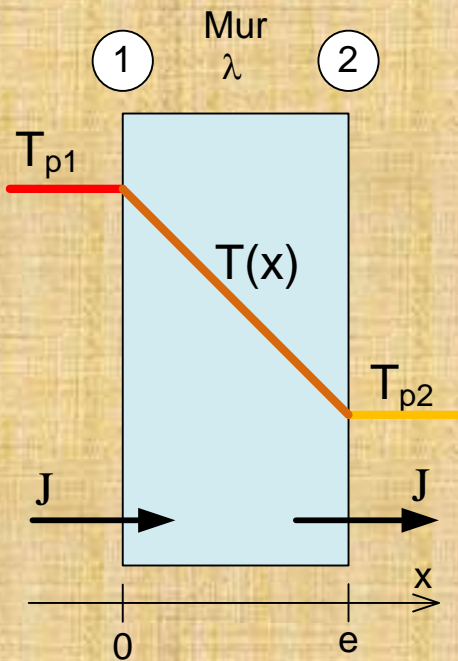
On définit la résistance thermique par :

Unité :  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda}$$

Puissance thermique :

$$\Phi = \frac{S}{R_{th}} \cdot (T_{P1} - T_{P2})$$



# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique

	Unité	Intitulé	Formule
<b>e</b>	mètre	Épaisseur de l'élément	
<b><math>\lambda</math></b>	W/(m.K)	Conductivité thermique Plus est faible, plus le matériau est isolant	
<b>R</b>	(m <sup>2</sup> .K)/W	Résistance thermique Plus R est grand, plus la paroi est isolante	<b><math>R = e / \lambda</math></b>

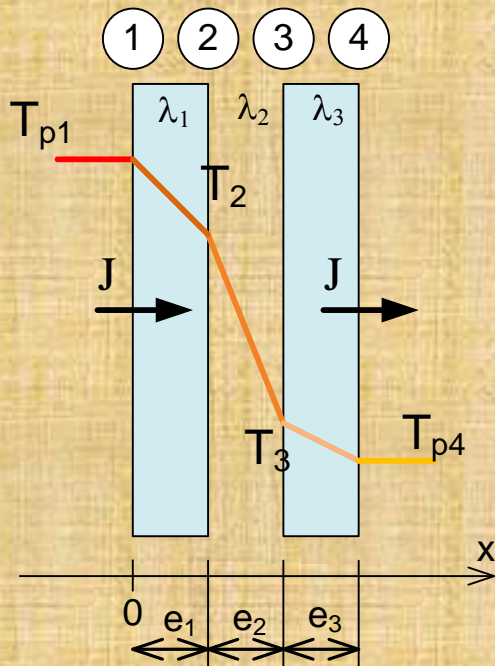
# Différents modes de transfert thermique

## Conduction thermique

### ✓ Cas de murs « multiples ». Loi de Fourier

Hypothèses :

- Pas de source interne de chaleur
- Toute la surface à la même température
- Régime permanent et propagation unidirectionnelle



• Loi de Fourier

$$J = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$T_{p1} - T_2 = \frac{e_1}{\lambda_1} \cdot J$$

$$T_2 - T_3 = \frac{e_2}{\lambda_2} \cdot J$$

$$T_3 - T_{p4} = \frac{e_3}{\lambda_3} \cdot J$$

$$T_{p1} - T_{p4} = \left( \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} \right) \cdot J$$

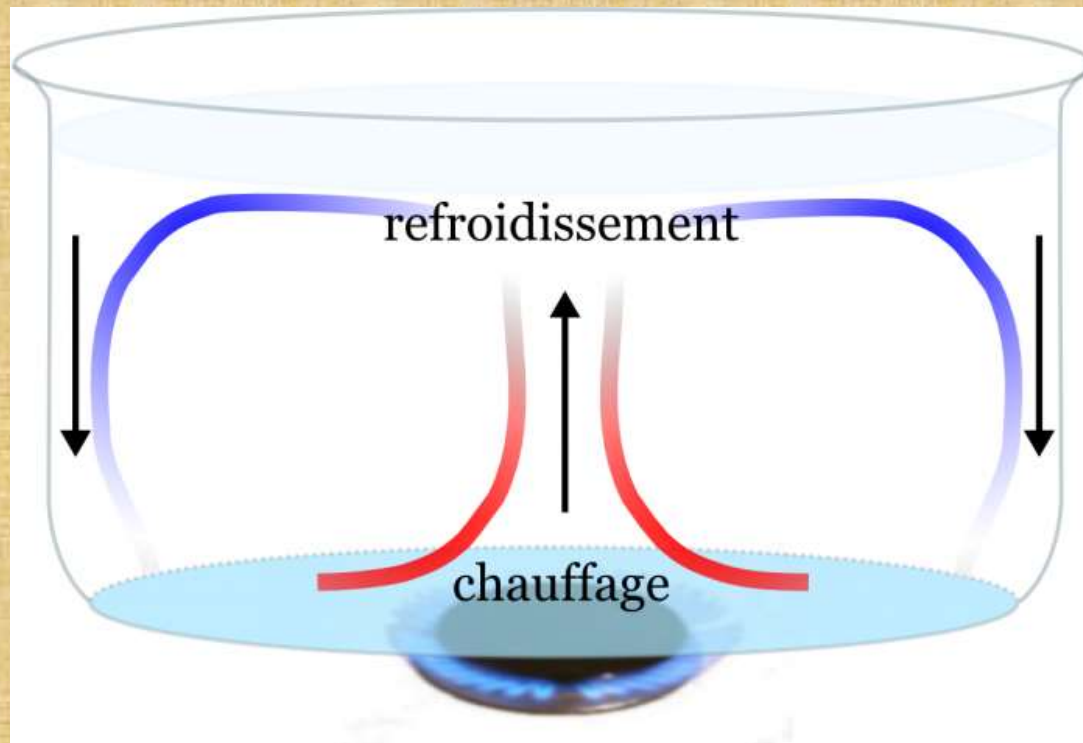
$$T_{p1} - T_{p4} = (R_{th1} + R_{th2} + R_{th3}) \cdot J$$

# Différents modes de transfert thermique

## Convection thermique

Lors de la convection les mouvements se produisent en général de manière spontanée sous l'effet d'une différence de température entre des zones d'un fluide.

En effet, la densité d'une substance dépend de sa température : un gaz ou un liquide possède une densité d'autant plus faible que sa température est élevée.



# Différents modes de transfert thermique

## Convection thermique

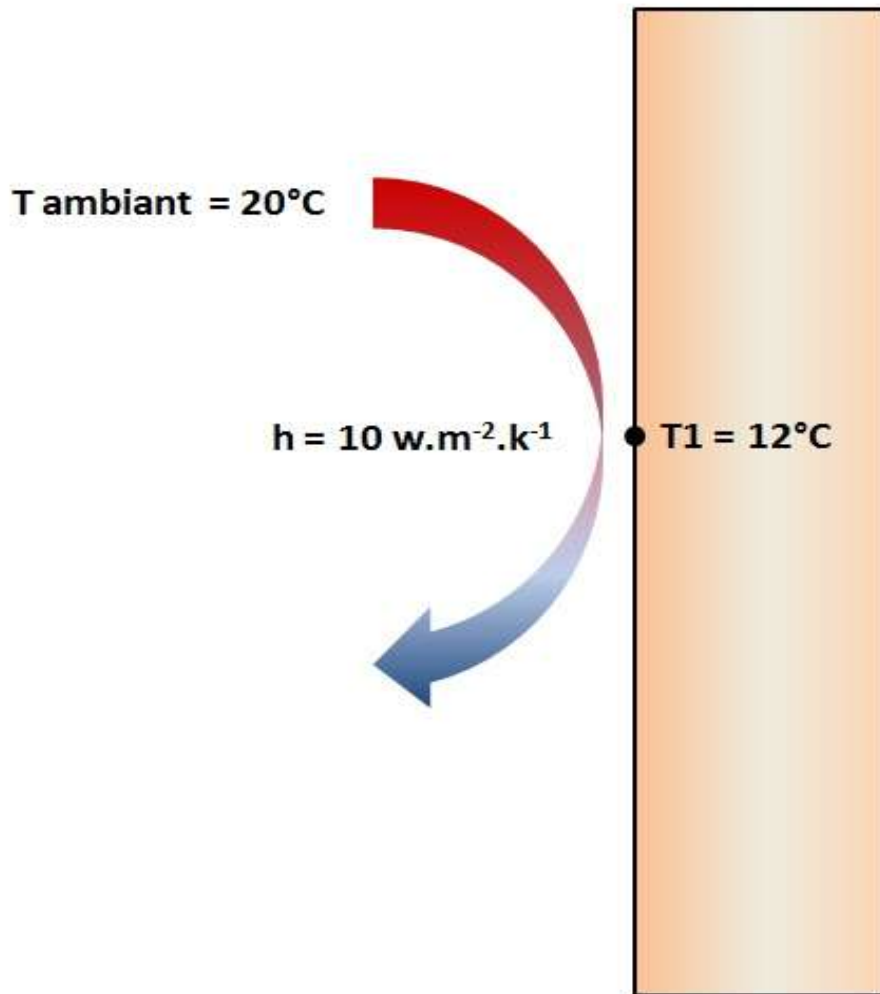
Par conséquent, un fluide chaud a donc tendance à s'élever et un fluide froid à descendre ce qui provoque des courants ascendants ou descendants que l'on retrouve par exemple dans l'air ou dans l'eau.

Au cours de ces mouvements, les fluides chauds transmettent de la chaleur aux fluides plus froids.

# Différents modes de transfert thermique

## Convection thermique

Cas d'un mur

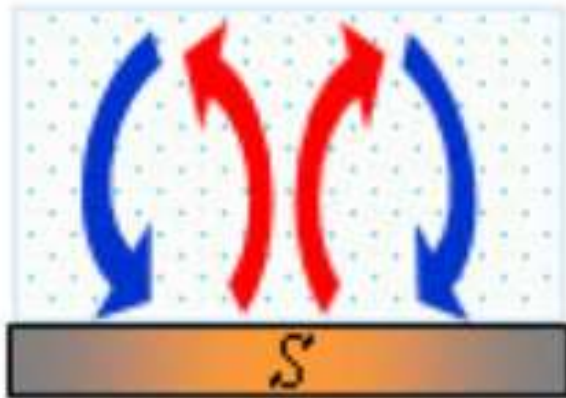


Ce transfert de chaleur provient du mouvement macroscopique d'un fluide (liquide ou gaz).

**Exemple** : entre une paroi d'un mur et l'air ambiant.

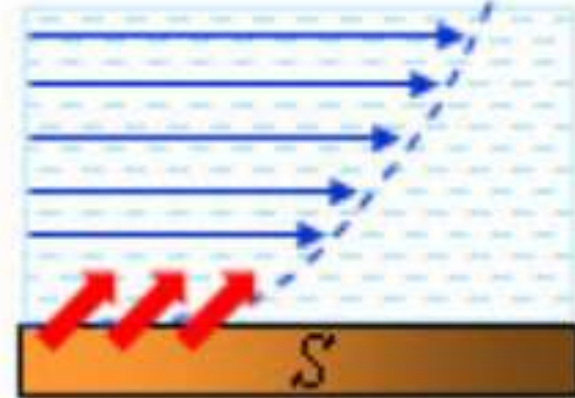
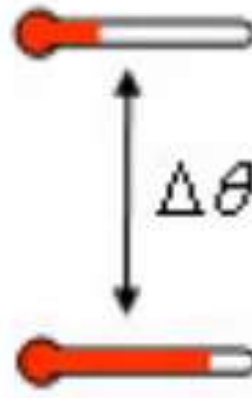
# Différents modes de transfert thermique

## Convection thermique



### Mode **NATUREL**

Le transfert de chaleur par conduction provoque le mouvement du fluide



### Mode **FORCÉ**

Le mouvement du fluide (mécanique) provoque le transfert de chaleur

# Différents modes de transfert thermique

## Convection thermique

### Loi de Newton

#### Etude globale.

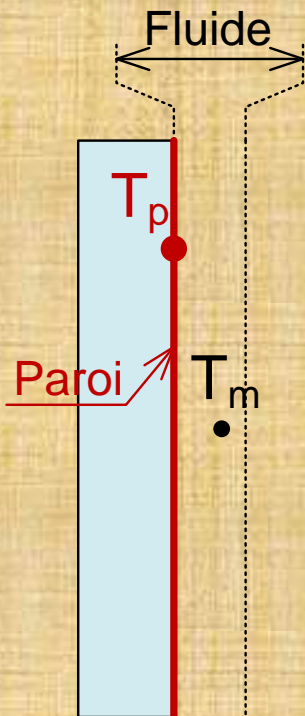
Phénomène complexe liant mécanique des fluides et transferts thermiques

On définit un coefficient d'échange thermique :  $h$

Unité :  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

$h_{\text{air calme}} : 3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

$h_{\text{vapeur d'eau chaude}} : 5 \cdot 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$



Loi de Newton

$$|T_p - T_m| = h \cdot J = \frac{h}{S} \cdot \Phi$$

$T_m$  : température moyenne du fluide au voisinage de la paroi

$T_p$  : température de la paroi

# Différents modes de transfert thermique

## Convection thermique

### Loi de Newton

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection  $h$  est fonction de la nature du fluide de la température du fluide de la vitesse de déplacement du fluide des caractéristiques géométriques de la surface de contact

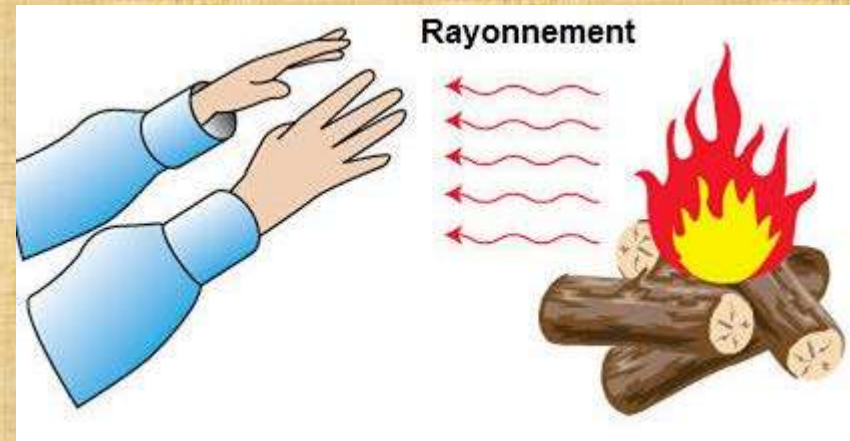
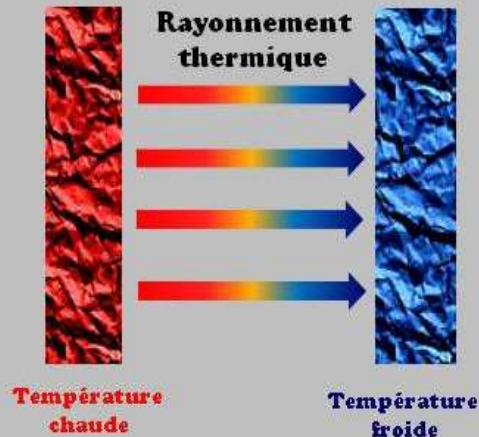
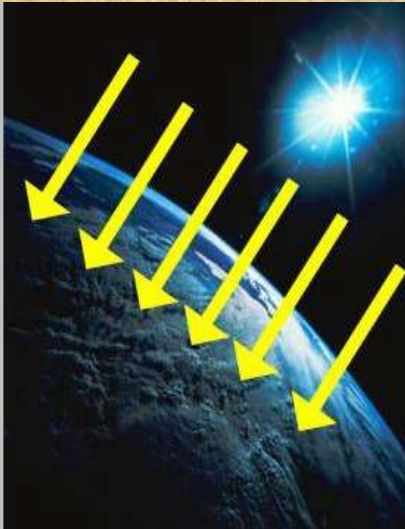
Configuration	$h$ ( $Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )
<u>Convection naturelle</u>	
Plaque verticale de hauteur 0,3 m dans l'air	4,5
Cylindre horizontal de diamètre 5 cm dans l'air	6,5
Cylindre horizontal de diamètre 2 cm dans l'eau	890
<u>Convection forcée</u>	
Courant d'air à 2 m/s sur une plaque carrée de 2 m de côté	12
Courant d'air à 35 m/s sur une plaque carrée de 0,75 m de côté	75
Eau à 0,5 kg/s dans un tube de diamètre 2,5 cm	3500
Courant d'air à 50 m/s perpendiculaire à un tube de diamètre 5 cm	180
<u>Ebullition de l'eau</u>	
Dans un récipient	2500-35000
En écoulement dans un tube	5000-100000
<u>Condensation de l'eau sous 1 atm</u>	
Sur une surface verticale	1000-11000
A l'extérieur de tubes horizontaux	10000-25000

# Différents modes de transfert thermique

## Rayonnement

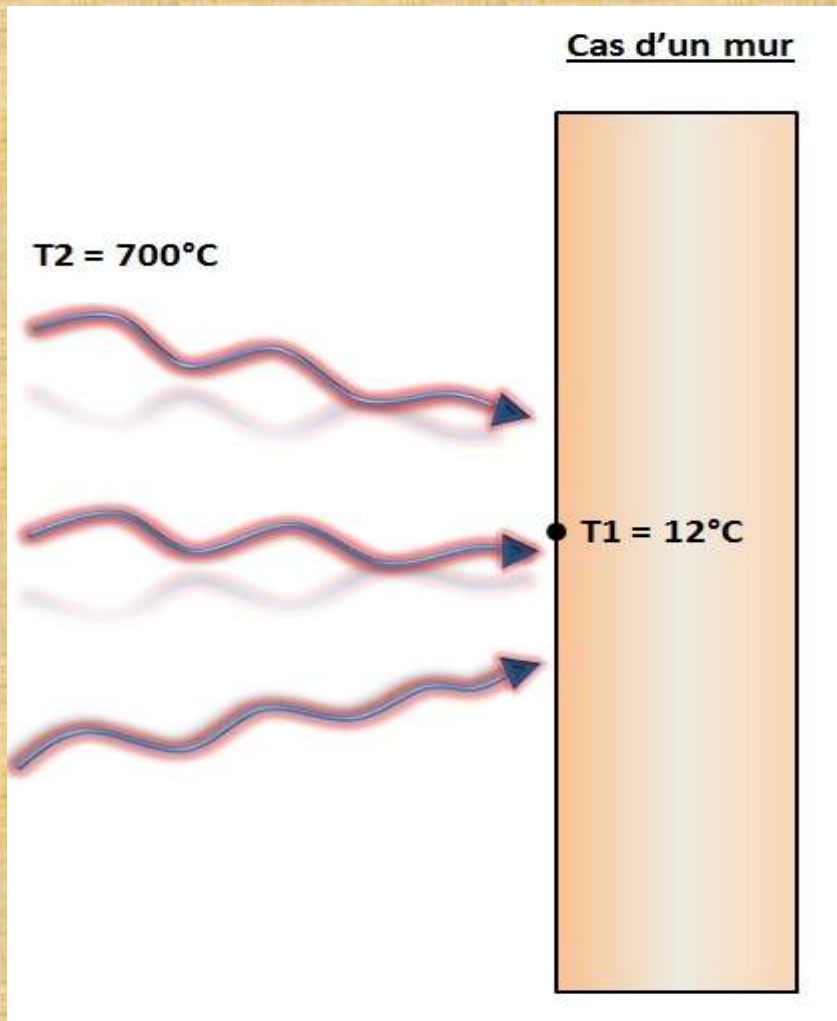
Le rayonnement est un mécanisme appliqué à beaucoup de phénomènes qui concernent le transfert d'énergie par transmission d'onde électromagnétique.

Le rayonnement thermique diffère de la conduction et la convection.



# Différents modes de transfert thermique

## Rayonnement



Spontanément ou au cours d'interactions mutuelles, les atomes, molécules et électrons libres des corps peuvent perdre une partie de leur énergie cinétique par émission d'un rayonnement électromagnétique.

Réciproquement, lorsqu'un rayonnement est reçu à la surface d'un corps, une partie est absorbée par le corps et se retrouve dans l'énergie cinétique de ses composants, c'est à dire sous forme de chaleur. **Le rayonnement thermique n'exige pas de support matériel pour se propager.** C'est le seul moyen d'échanger entre deux corps dans le vide.

# Différents modes de transfert thermique

## Rayonnement

- Flux d'une source :  $\Phi$  Puissance émise par la source. Unité : W  
⇒ Source de puissance émise par une source.

- Emittance d'une source (monochromatique :  $\lambda$ ) :

$$\Rightarrow M_{\lambda} = \frac{d\Phi_{\lambda}}{dS} \quad \text{Unité : W}\cdot\text{m}^{-2}$$

- Transfert de chaleur par rayonnement :

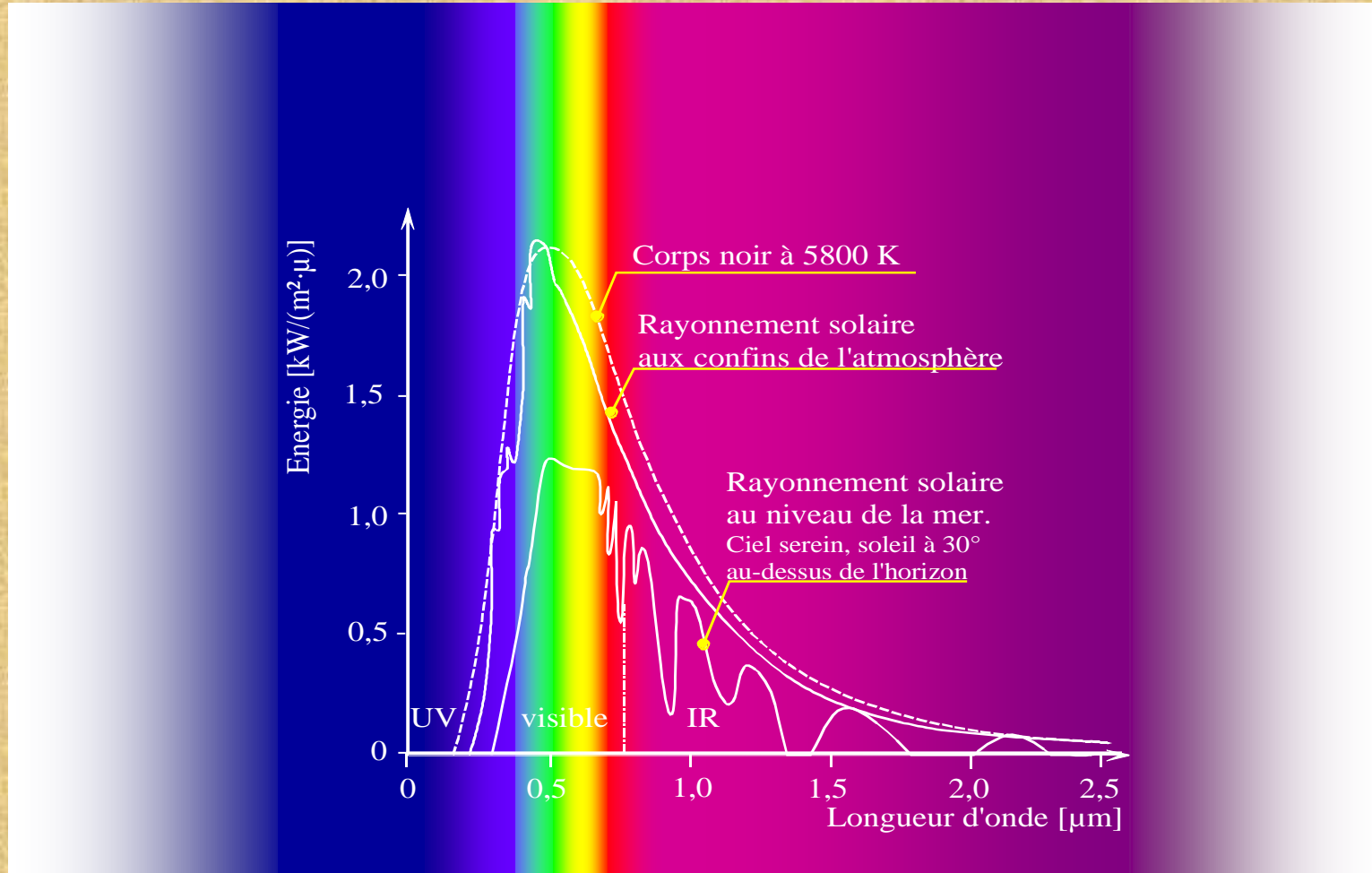
$$\Rightarrow M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{Unité : W}\cdot\text{m}^{-2}$$

- constante de **Stefan-Boltzmann** :  $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
- $\varepsilon$  : émissivité (facteur d'absorption ou d'émission de la surface émettrice)  
coefficient sans unité (1 pour un corps noir)
- $T$  : température du corps (K)

# Différents modes de transfert thermique

## Rayonnement

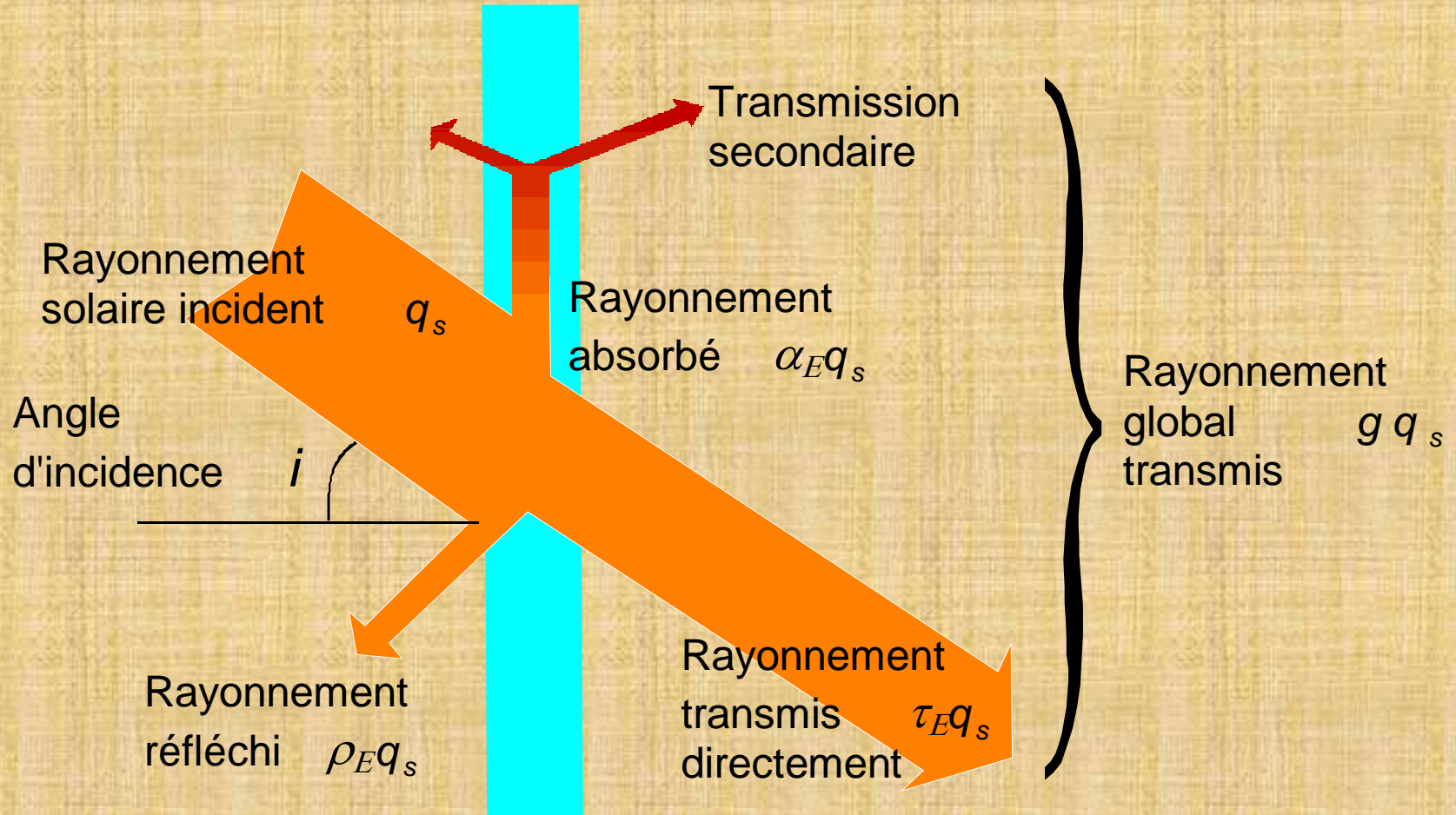
➤ Le rayonnement solaire.



# Différents modes de transfert thermique

## Rayonnement

➤ Le rayonnement solaire sur un vitrage.

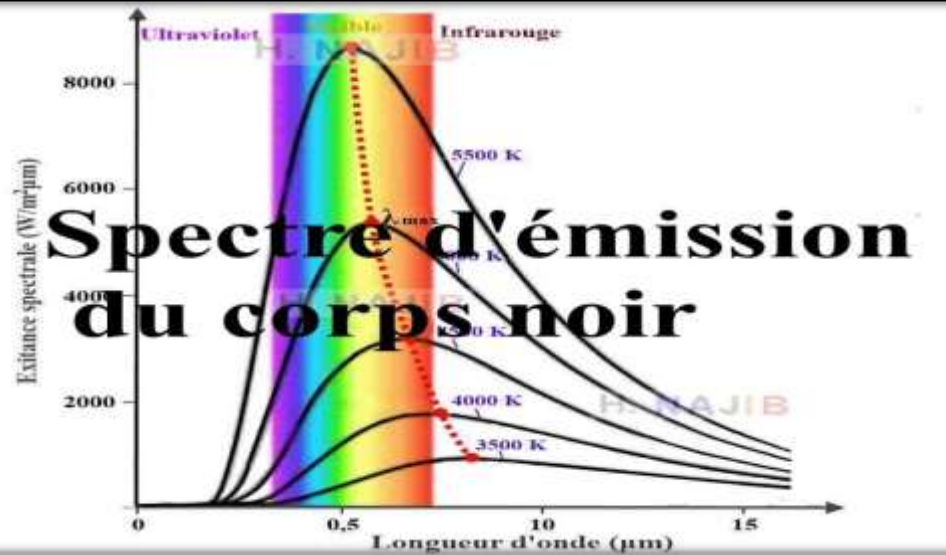


# Différents modes de transfert thermique

## Rayonnement

### Lois du rayonnement du corps noir

Le corps noir est un corps de référence défini comme étant **un corps absorbant intégralement tout rayonnement reçu** (il ne réfléchit rien) et émettant la plus grande quantité de rayonnement, ceci à toute longueur d'onde : c'est un émetteur-récepteur idéal.

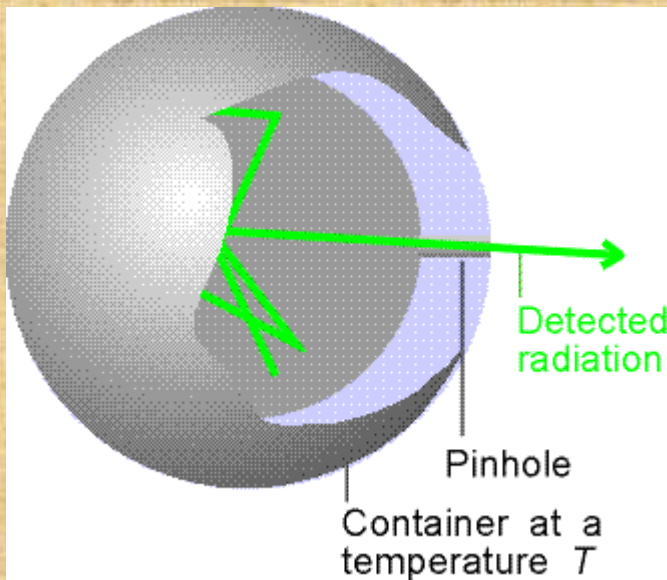


# Différents modes de transfert thermique

## Rayonnement

### Lois du rayonnement du corps noir

**Corps noir=corps idéal qui absorbe et émet des radiations de toutes les fréquences**



**Idéalisation de:**

- **Plaque chauffante**
- **Four**
- **Astre**

# Différents modes de transfert thermique

## Rayonnement

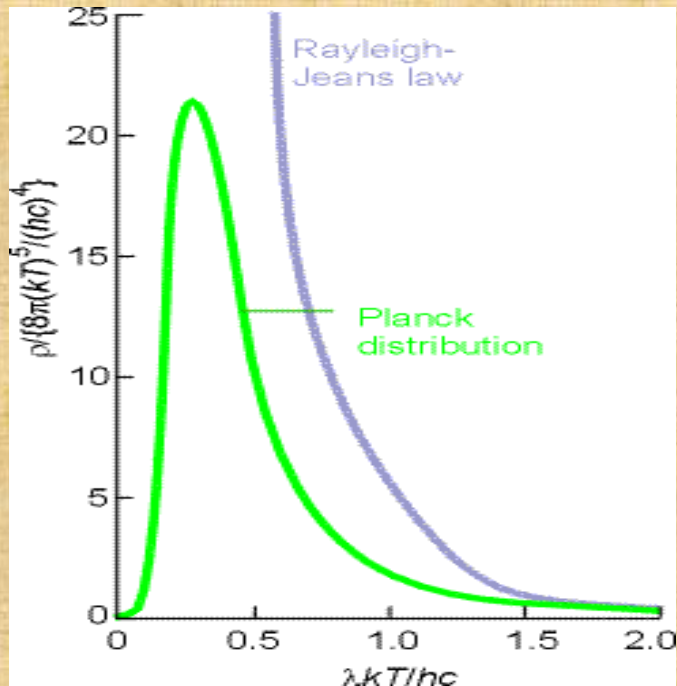
### Lois du rayonnement du corps noir

#### Planck et l'effet du corps noir

Distribution de Planck (1900)

- Hypothèse: énergie des modes de la cavité est quantifiée selon

divergence dans l'UV disparaît



$$E = nh\nu$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\rho(n, T) = \frac{(8 \pi hc)}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \right)}$$

# Equipements procédés thermiques

## Echange de chaleur séquentiel

- Fours, étuves, autoclaves
- Réfrigérateurs, congélateurs

## Echange de chaleur continu

- Echangeurs à plaques
- Echangeurs tubulaires
- Echangeurs à surface raclée
- Convoyeurs

# Equipements procédés thermiques

## Autoclaves



# Equipements procédés thermiques

## Etuves



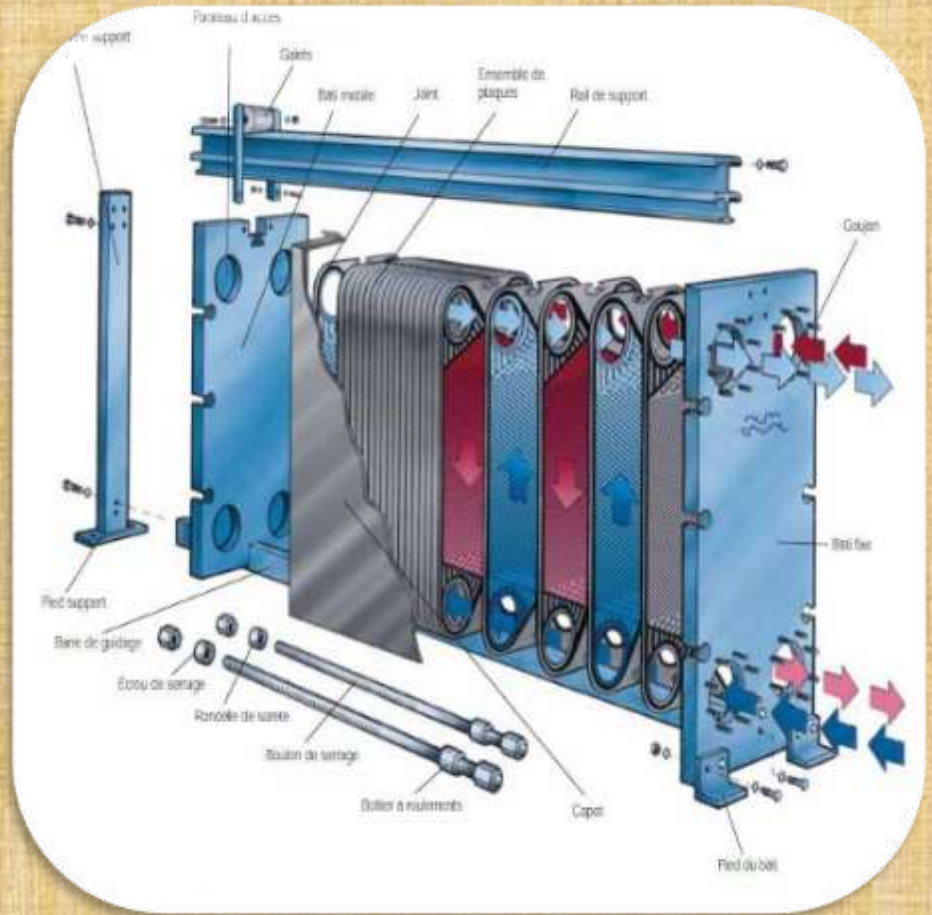
# Equipements procédés thermiques

## Fours



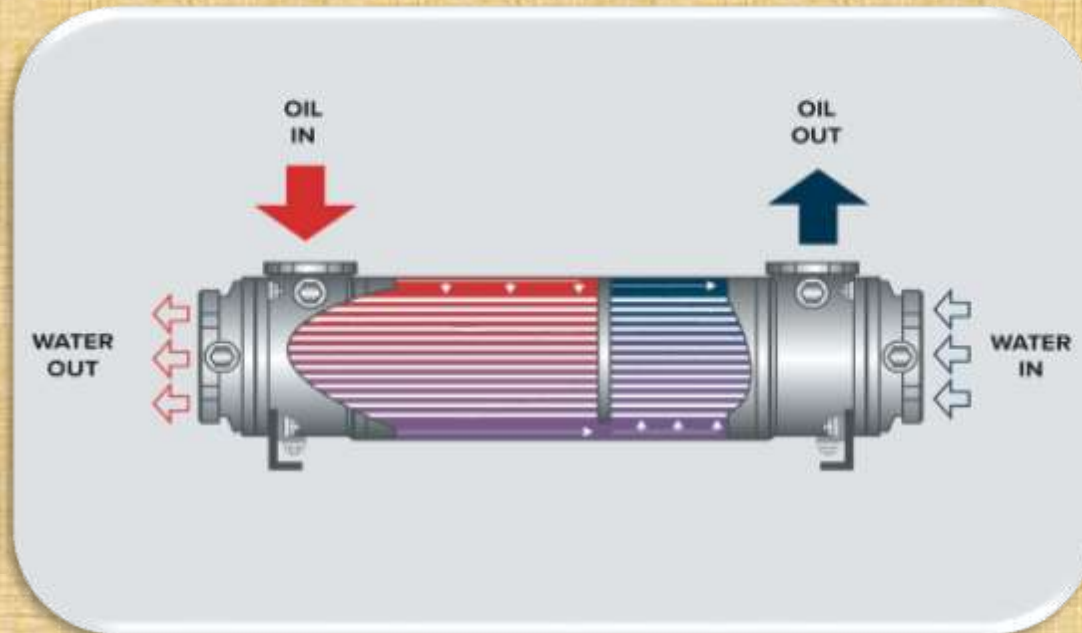
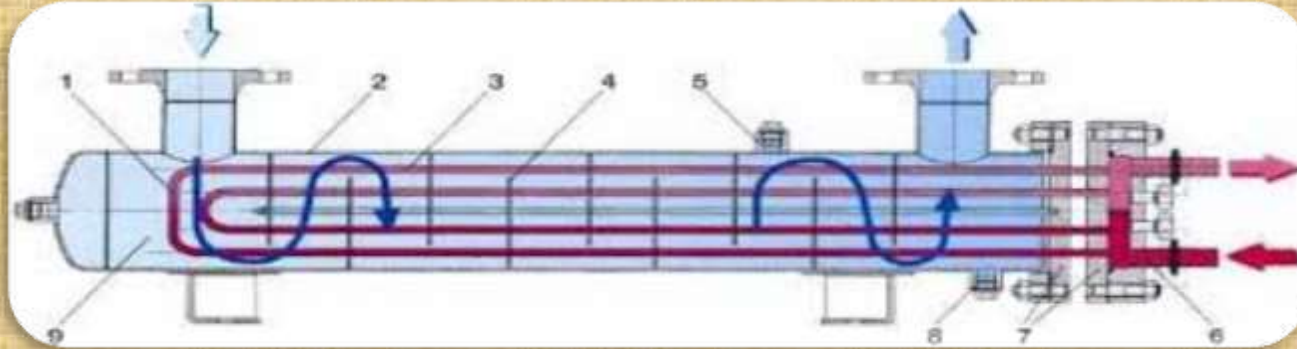
# Equipements procédés thermiques

## Echangeurs à plaques



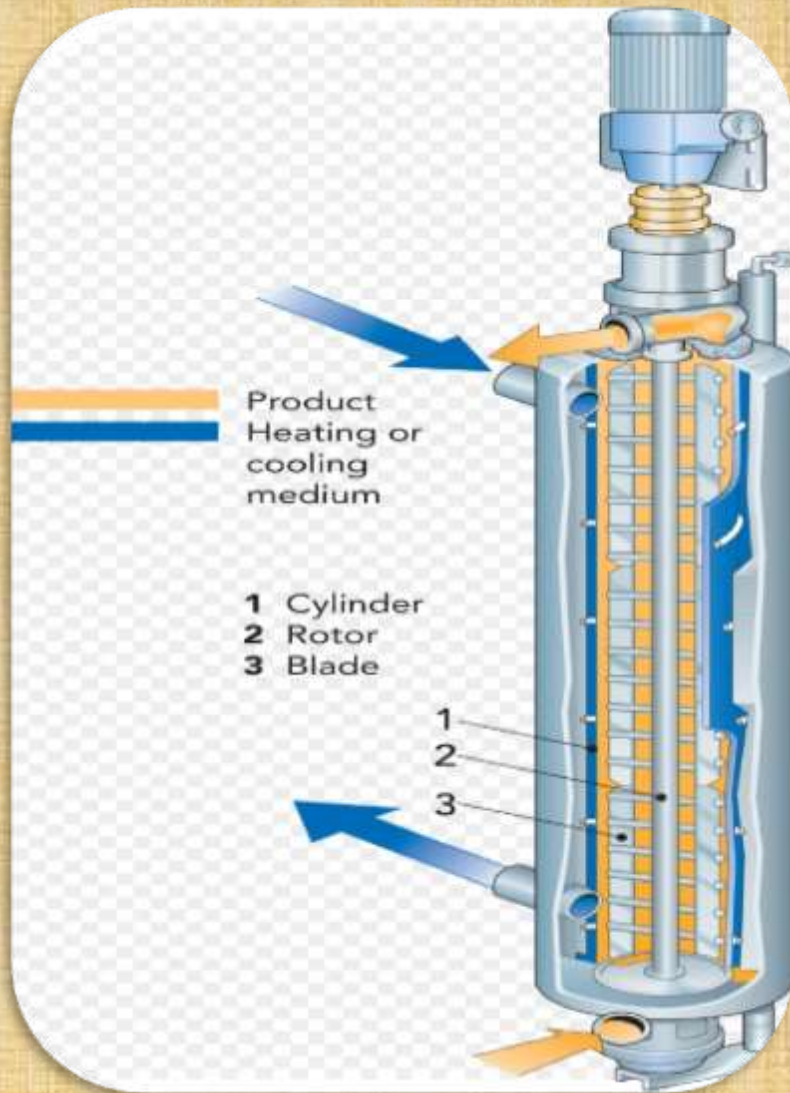
# Equipements procédés thermiques

## Echangeurs tubulaires



# Equipements procédés thermiques

## Echangeurs à surface raclée



# Equipements procédés thermiques

## Convoyeurs



# Transfert de la matière

Le transfert de matière (ou transfert de masse) joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base mises en œuvre au cours de la **transformation des aliments ou de produits biologiques** (séchage, salage, sucrage, absorption, adsorption, cristallisation, extraction, distillation, ...).

Au cours de ces opérations, le transfert de matière est classiquement **le facteur limitant la vitesse du procédé**, même si le transfert de chaleur et le flux du produit peuvent aussi être en cause.

Le transfert de matière a aussi un rôle très important lors de l'**emballage des produits** et de leur **entreposage** : transfert d'humidité, de gaz, de composés de saveur à travers le matériau d'emballage.

**Le transfert de matière consiste en la migration de composés à l'intérieur d'une phase ou entre des phases.**

Cette migration résulte d'un changement dans l'équilibre d'un système causé par une/des différences de potentiel(s) : différence de concentration d'une espèce d'un point à un autre, différence de température et/ou différence de pression.



# Transfert de la matière

Toute différence de potentiel entraîne une évolution spontanée vers l'uniformité : **une différence de concentration d'un composé entre deux points d'un système entraîne donc un transfert de matière jusqu'à atteindre l'uniformité de concentration.**



De manière analogue, une différence de température entraîne un transfert de chaleur jusqu'à uniformité des températures.

# Transfert de la matière

le cnam

Génie  
des procédés

Transfert de matière entre phases :  
les prémisses de l'extraction liquide/liquide

# Transfert de la matière

## Quantité et flux de matière

Le transfert de matière peut être caractérisé par différentes grandeurs :

- le taux de transfert de matière, qui correspond à la quantité de matière transférée par unité de temps :

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

- le flux de matière, qui correspond à la quantité de matière transférée par unité de temps et de surface (normale à la direction du transfert) :

où :

m : quantité de matière transférée (kg ou mol)

$$N = \frac{m}{S \cdot t}$$

t : temps (s)

Q : taux de transfert de la matière (kg.s<sup>-1</sup> ou mol.s<sup>-1</sup>)

N : flux de matière (kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> ou mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)

## Transfert de la matière

Il existe deux modes principaux de transfert de matière :

➤ Diffusion

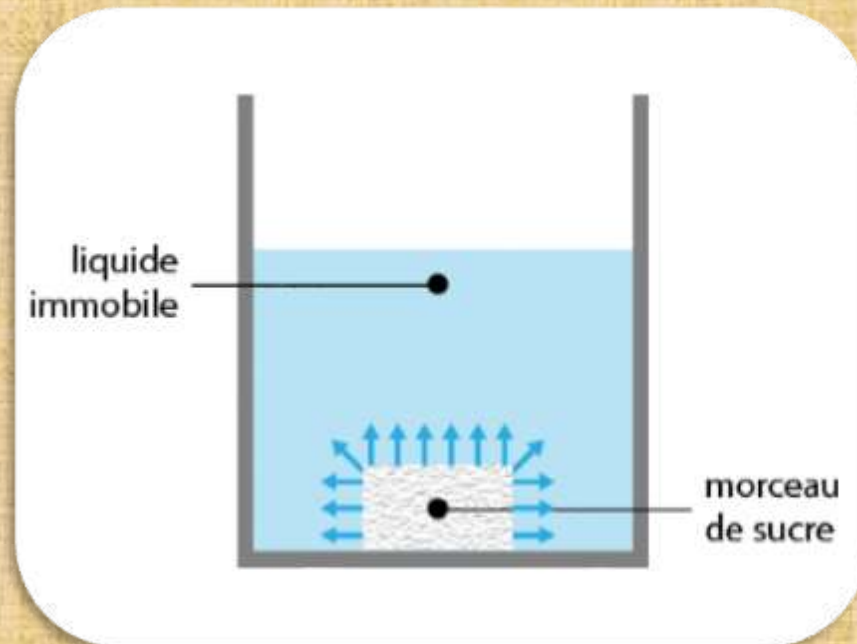
➤ Convection.

# Transfert de la matière

## Diffusion

La diffusion est un processus lent : les molécules migrent dans un solide ou dans un fluide considéré comme immobile (écoulement laminaire).

**Exemple** : diffusion des molécules de sucre, dispersion par agitation moléculaire suivant des trajectoires aléatoires entre les molécules d'eau.

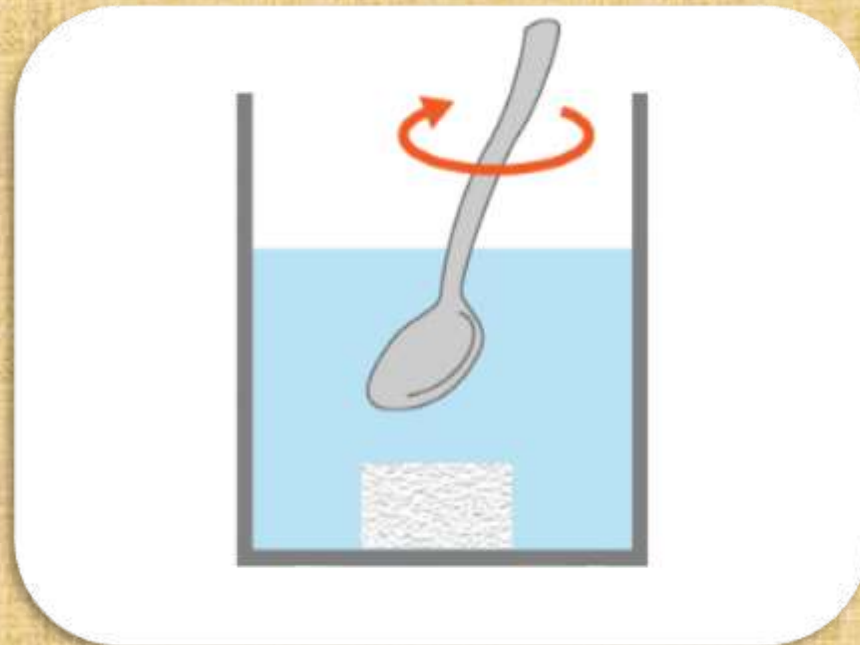


# Transfert de la matière

## Convection

La convection est un processus rapide : les molécules sont entraînées dans un courant de fluide naturel ou forcé (convection naturelle ou forcée).

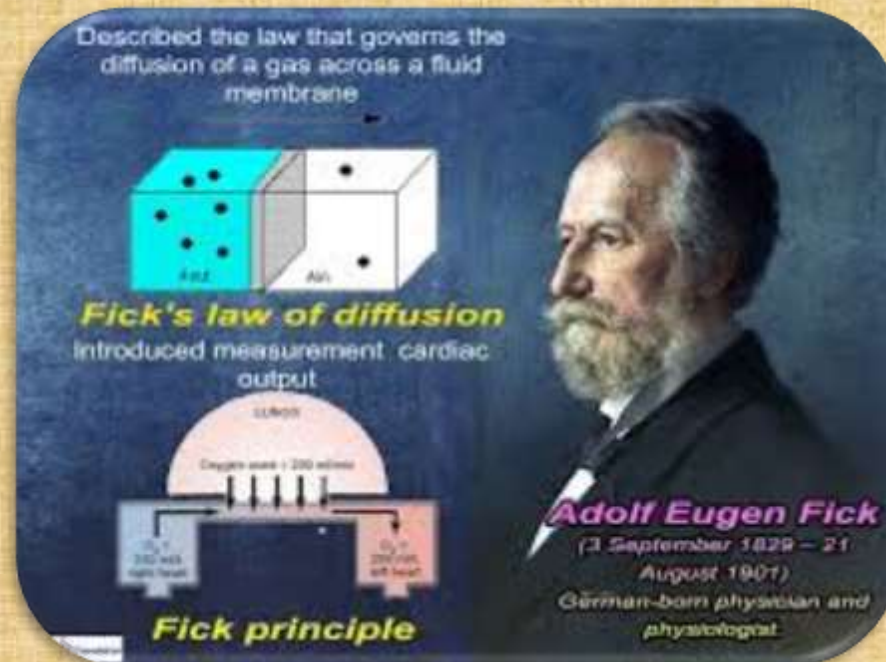
**Exemple** : l'agitation avec une cuillère est une convection forcée.



# Transfert de la matière

## Loi de Fick (diffusion)

La **loi de Fick** décrit la diffusion de la **matière** dans un milieu binaire. Elle a été établie par Adolf **Fick** en 1855. Reliant le flux de **matière** au gradient de concentration, elle est analogue à l'équation de la chaleur introduite par Joseph Fourier en 1822.



# Transfert de la matière

## 1ère loi de Fick (diffusion)

Formule générale - écriture vectorielle (flux suivant les 3 directions de l'espace) :

$$\vec{J}_i = -D_{AB} \cdot \vec{\text{grad}}C_A$$

Formule pour un flux unidirectionnel (ici suivant l'axe y) :

$$J_A = -D_{AB} \cdot \frac{dC_A}{dy} = -D_{AB} \cdot \frac{\Delta C_A}{\Delta y}$$

$J_A$  : flux de diffusion du composé A ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  ou  $\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )

$D_{AB}$  : coefficient de diffusion (ou diffusivité) du composé A dans le milieu B ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )

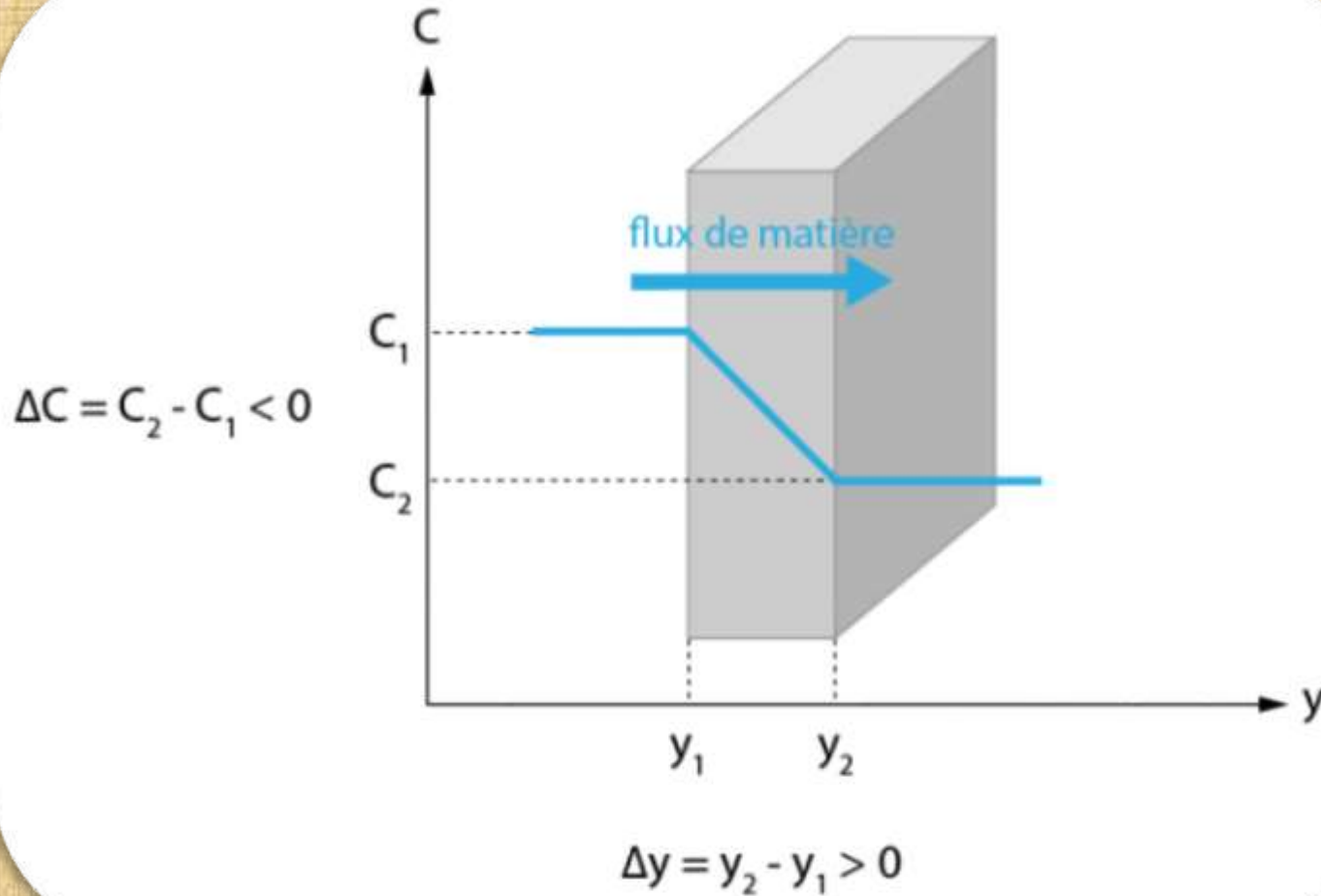
$C_A$  : concentration en composé A ( $\text{kg.m}^{-3}$  ou  $\text{mol.m}^{-3}$ )

$\Delta C_A$  : variation de concentration en composé A ( $\text{kg.m}^{-3}$  ou  $\text{mol.m}^{-3}$ )

$\Delta y$  : distance de transfert ou épaisseur (m)

# Transfert de la matière

## 1ère loi de Fick (diffusion)



## Transfert de la matière

### 1ère loi de Fick (diffusion)

La 1ère loi de Fick pour le calcul d'un flux diffusif assume que **la diffusion de matière résulte uniquement d'un gradient de concentration.**

En réalité, la diffusion peut aussi résulter d'un gradient de température, de pression ou d'une force externe.

Cependant, dans la plupart des cas, ces effets sont négligeables et la force motrice dominante est le gradient de concentration.

# Transfert de la matière

## Coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion est défini pour un composé dans un milieu :  
**D(ij)** est le coefficient de diffusion du composé **i** dans le milieu **j**.

Il dépend de la pression et de la température.

Les coefficients de diffusion peuvent être trouvés dans la littérature ou calculés à l'aide de corrélations.

### En phase gazeuse

➤ Corrélation de Fuller et al (1969)

$$D = 2,42 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ pour vapeur d'eau / air à } 20^\circ\text{C}$$

$$D = 1,47 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ pour CO}_2 \text{ / air à } 20^\circ\text{C}$$

$$D = 2,02 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ pour O}_2 \text{ / air à } 20^\circ\text{C}$$

# Transfert de la matière

## Coefficient de diffusion

### En phase liquide

Corrélations :

- Wilke et Chang (1955)
- Hayduk et Laudi (1974) (eau comme solvant)
- Perkins et Geankoplis (1969) (pour mélange de liquides)

$$D = 9,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ pour H}^+ / \text{H}_2\text{O à } 25^\circ\text{C}$$

$$D = 4,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ pour sucre / H}_2\text{O à } 20^\circ\text{C}$$

# Transfert de la matière

## 2ème loi de Fick (diffusion + convection)

La 2ème loi de Fick prend en compte le transport par le mouvement moyen du fluide.

$$\vec{v}_A = \vec{v}_{dA} + \vec{v}$$

où :

$v_A$  : vitesse de déplacement de A (m.s<sup>-1</sup>)

$v_{dA}$  : vitesse de diffusion de A (m.s<sup>-1</sup>)

$v$  : vitesse moyenne de l'écoulement (m.s<sup>-1</sup>)

Le flux global de composé A ( $N_A$ ) résulte de la somme du flux diffusif ( $J_A$ ) et du flux par transport convectif ( $T_A$ ) :

$$\vec{N}_A = \vec{J}_A + \vec{T}_A$$

avec :  $\vec{T}_A = C_A \cdot \vec{v}$

où :

$N_A$  : flux global du composé A (kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> ou mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)

$J_A$  : flux de diffusion du composé A (kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> ou mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)

$T_A$  : flux par transport convectif du composé A (kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> ou mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)

$C_A$  : concentration molaire ou massique de A dans le mélange (kg.m<sup>-3</sup> ou mol.m<sup>-3</sup>)

## *Le phénomène de diffusion*

# Transfert de la matière

Diffusion Osmosis Dialysis