

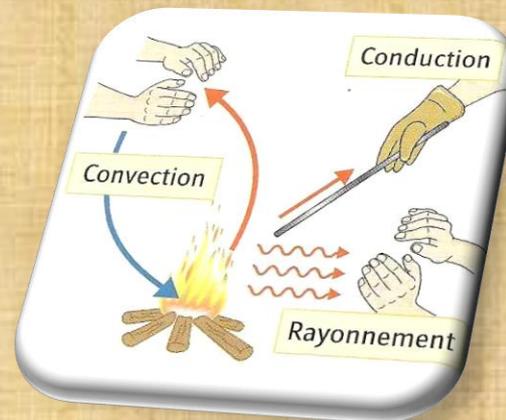
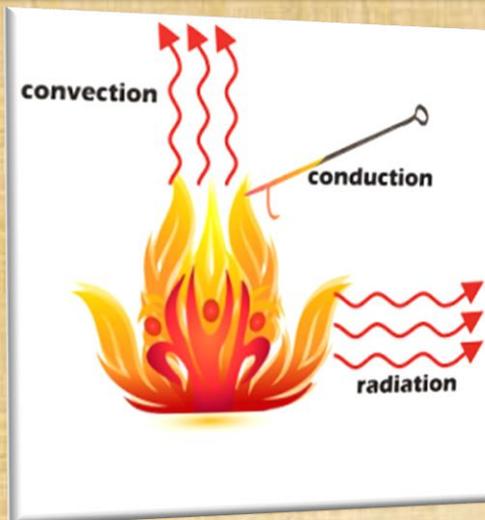


Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, Algérie
Faculté de SNV - Département de Biologie
Master 1 (SAAQ)



Dr. MEROUFEL Bahia

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

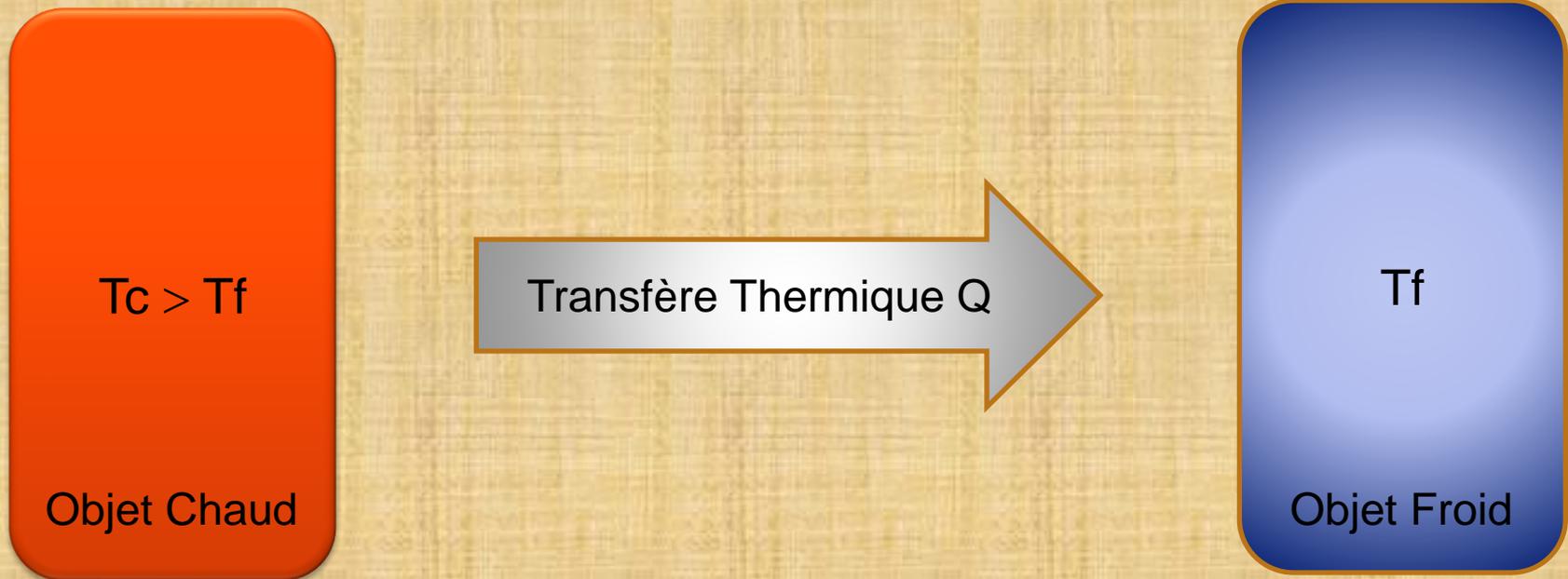
Les multiples procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur, soit parce que c'est le but recherché (fours, coulée, échangeurs, thermoformage, induction, lits fluidisés, trempe, refroidissement), soit parce que ceux ci interviennent d'une manière inévitable (chocs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

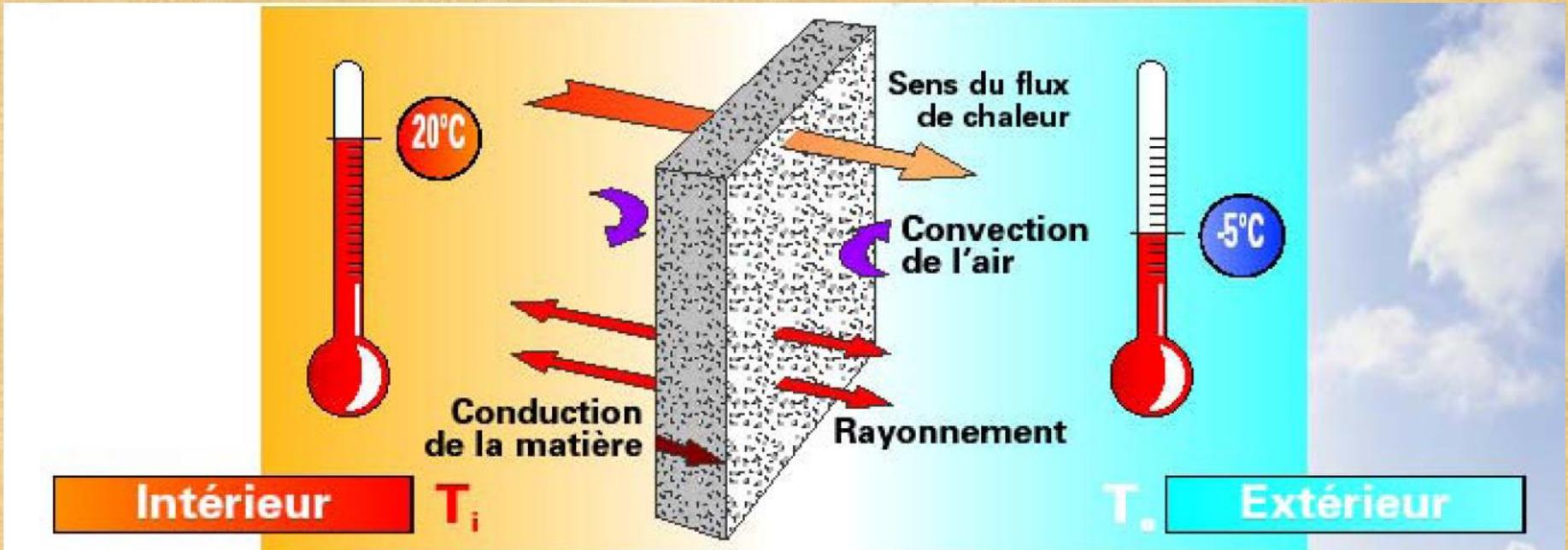
Le deuxième principe de la thermodynamique admet que la chaleur (ou énergie thermique) ne peut passer que d'un corps chaud vers un corps froid, c'est-à-dire d'un corps à température donnée vers un autre à température plus basse.



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** :
 φ (phi)

Le flux de chaleur exprime pour chaque m² de paroi l'énergie écoulee par unité de temps. φ s'exprime en **W/m²**.
 φ est la somme des transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement

Différents modes de transfert thermique

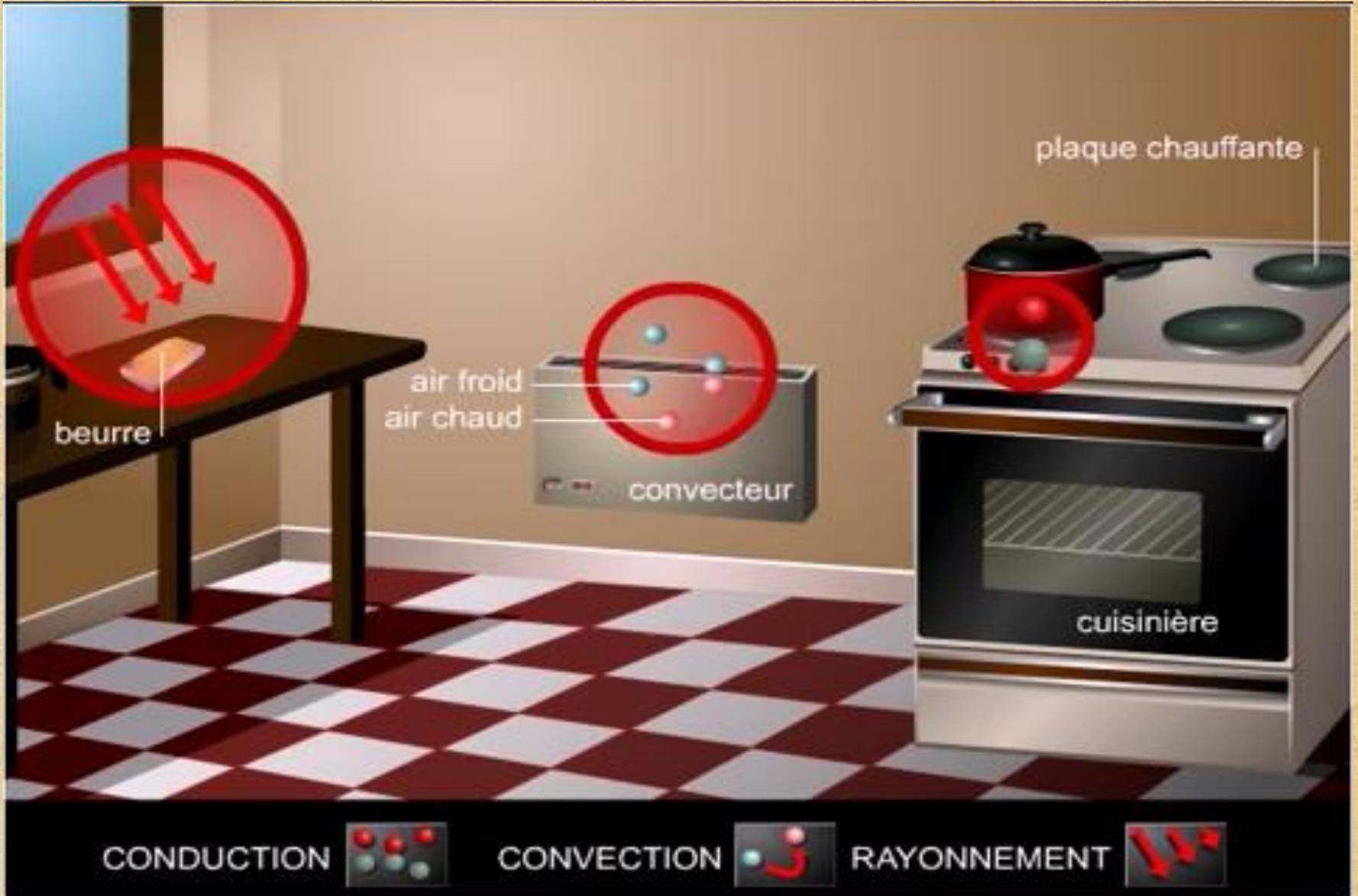
Le chapitre "Phénomènes de Transfert" a pour objet d'étudier la manière dont s'effectue cet échange. Le transfert de chaleur se produit suivant deux modes semblables:

- 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

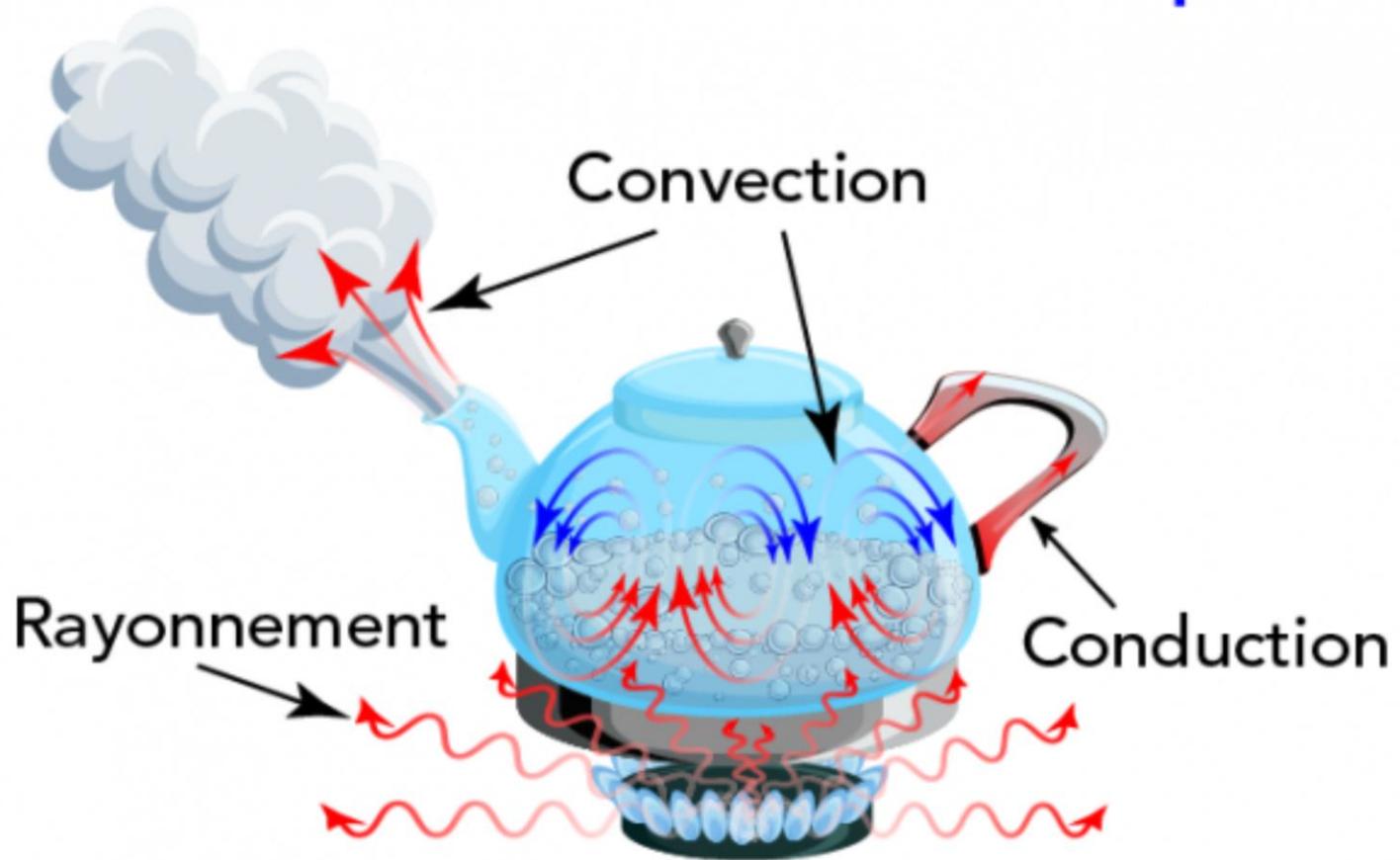
Type de transfert	Image	Caractéristiques	Exemple
Conduction		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Entre molécules adjacentes. ➤ Contact direct. ➤ Pas de mouvement de matière 	Fer à repasser
Convection		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transfert d'énergie par transfert de matière fluide chauffée ➤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

Différents modes de transfert thermique

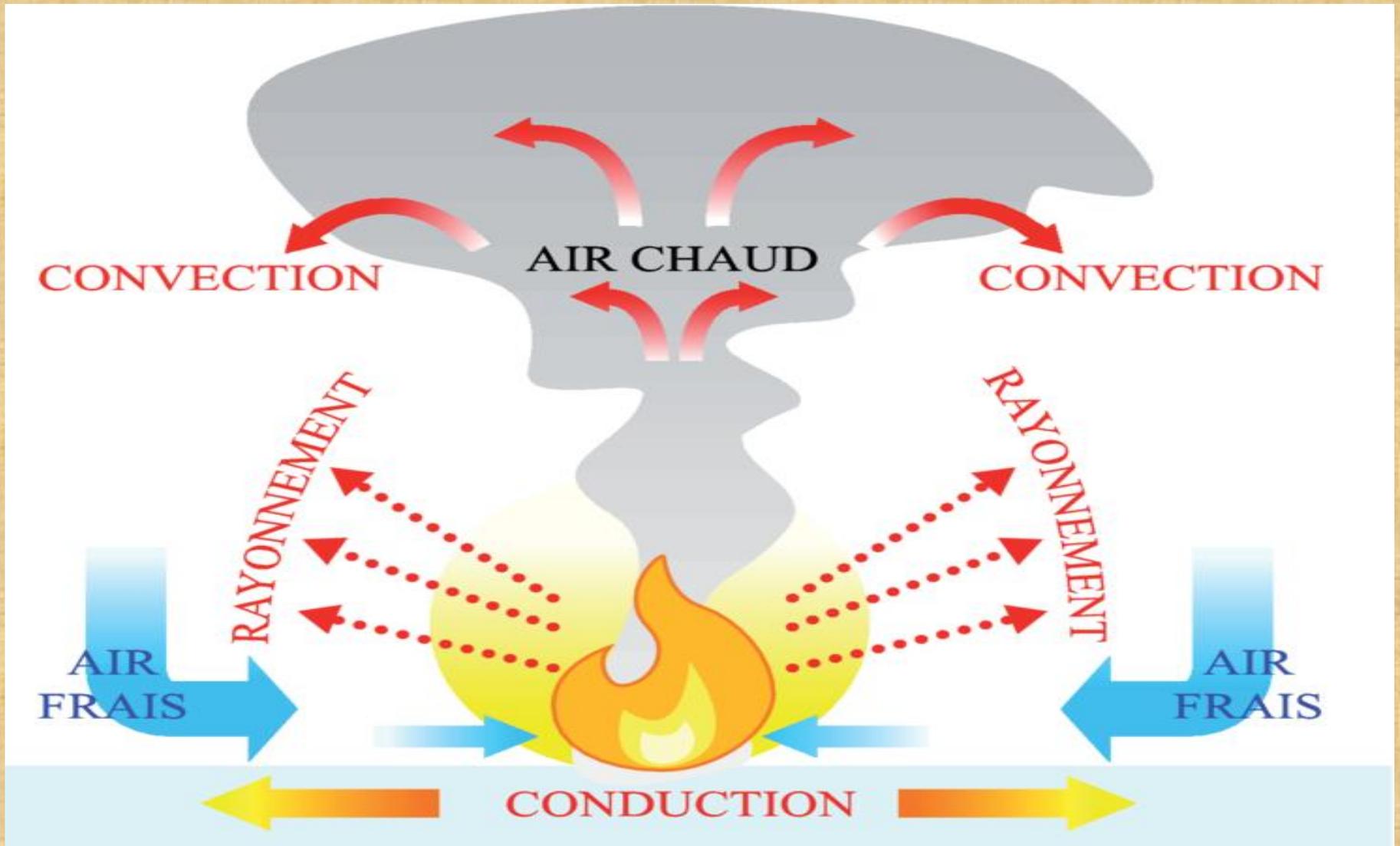


Différents modes de transfert thermique

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 °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
- Evaporation

Chaleur en 1^{er}

- Cuisson-extrusion
- Distillation

Froid

- Réfrigération
- Congélation

Froid en 1^{er}

- 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

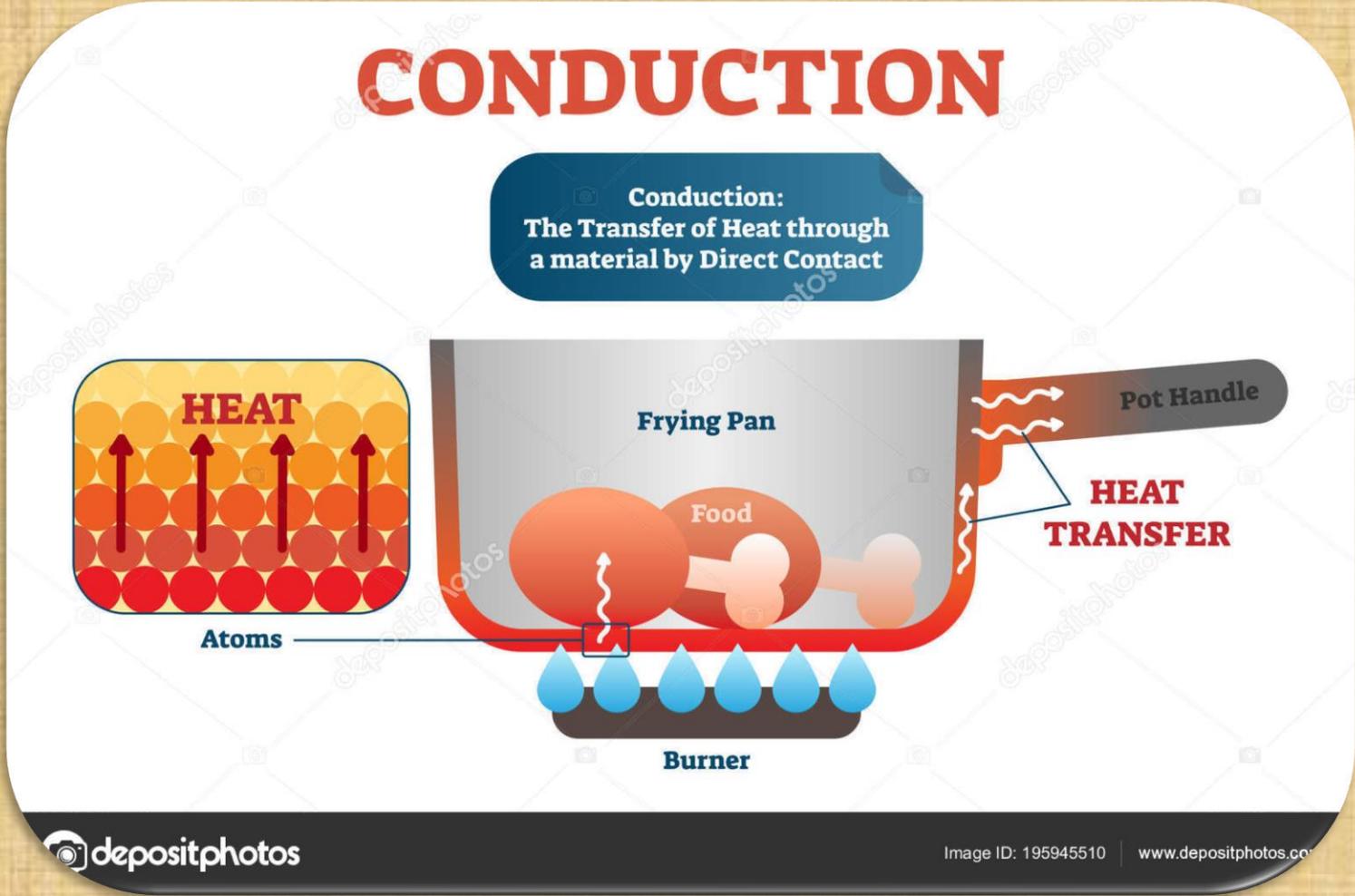
Différents modes de transfert thermique

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.

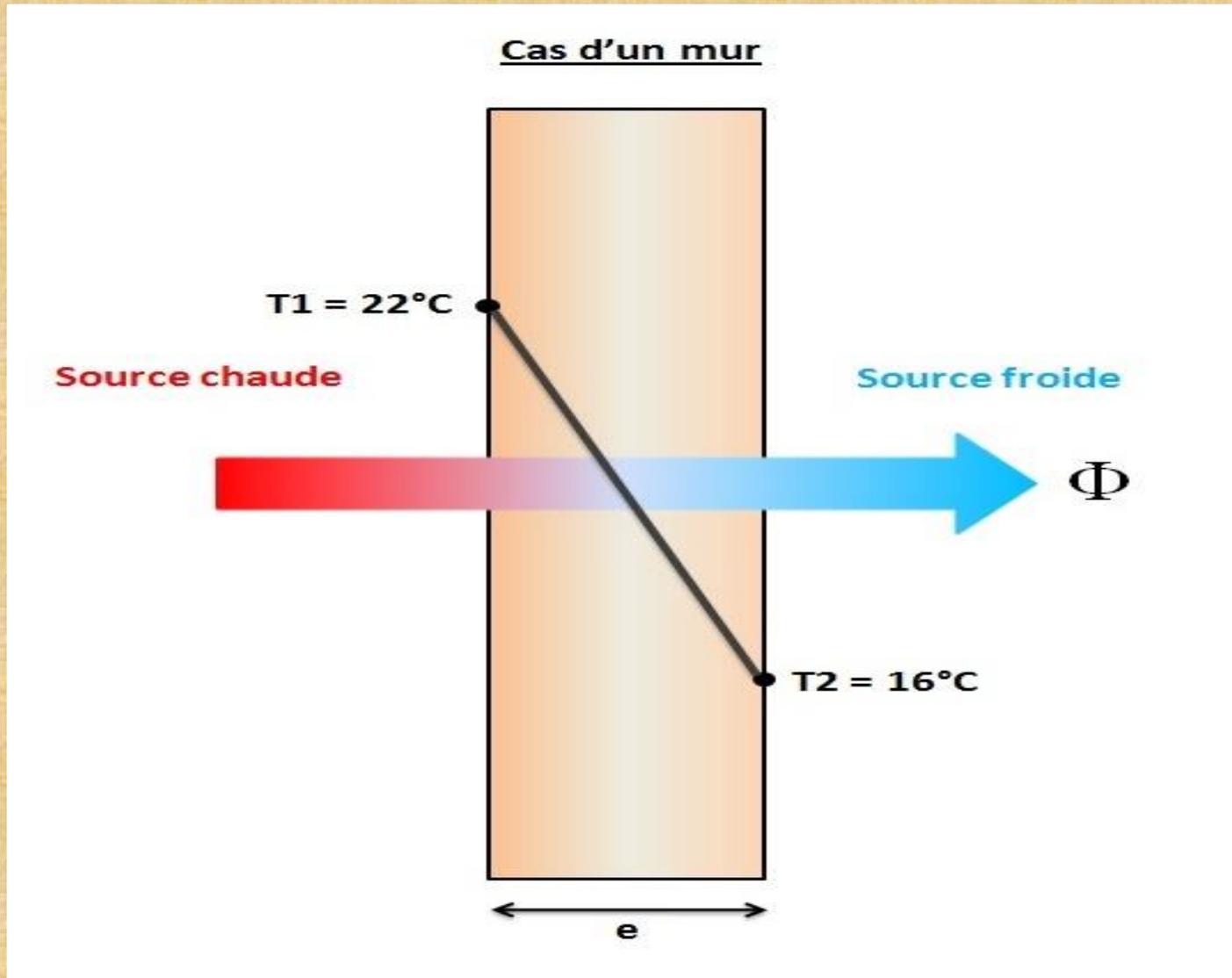
Différents modes de transfert thermique

Conduction thermique



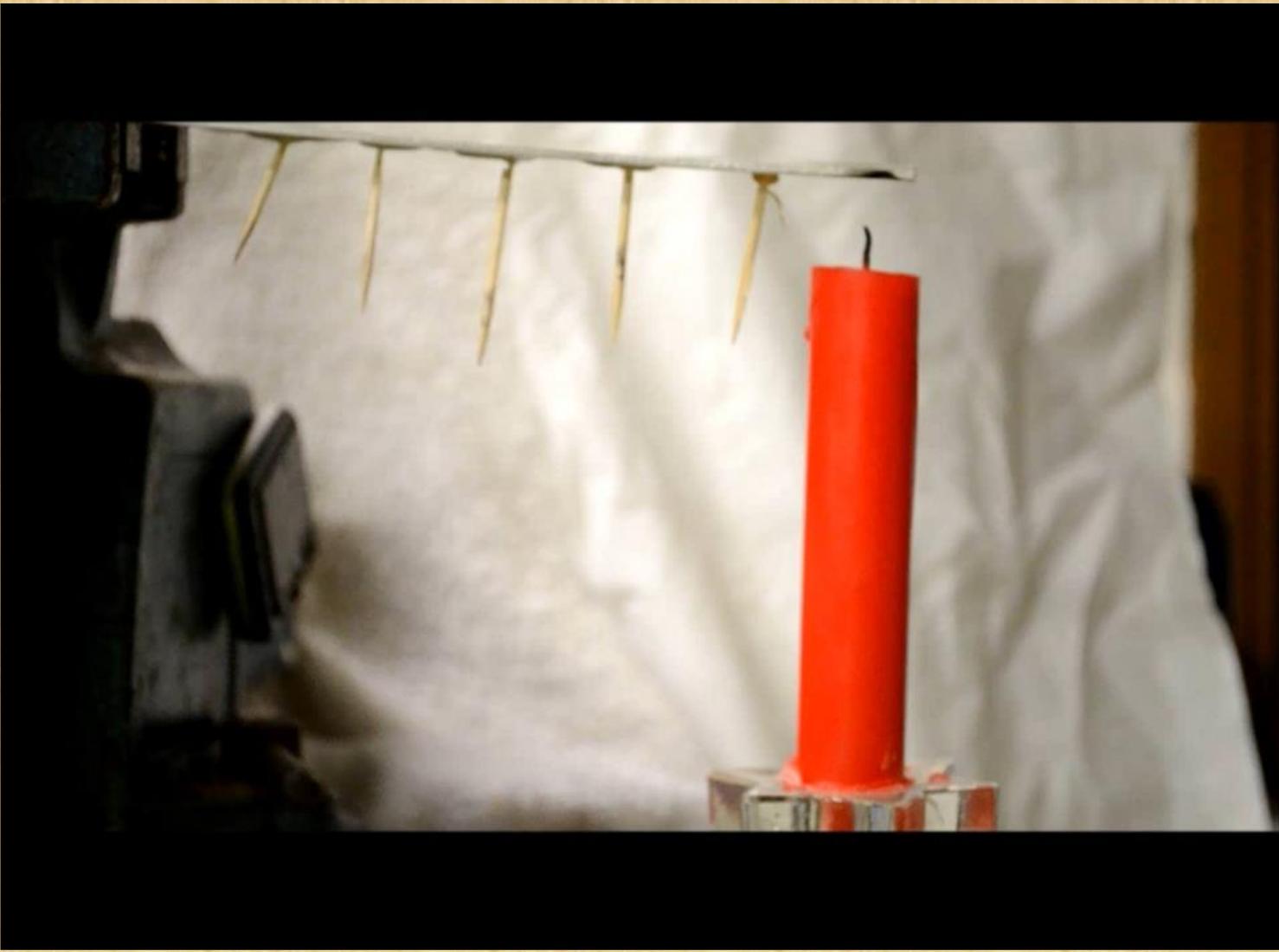
Différents modes de transfert thermique

Conduction thermique



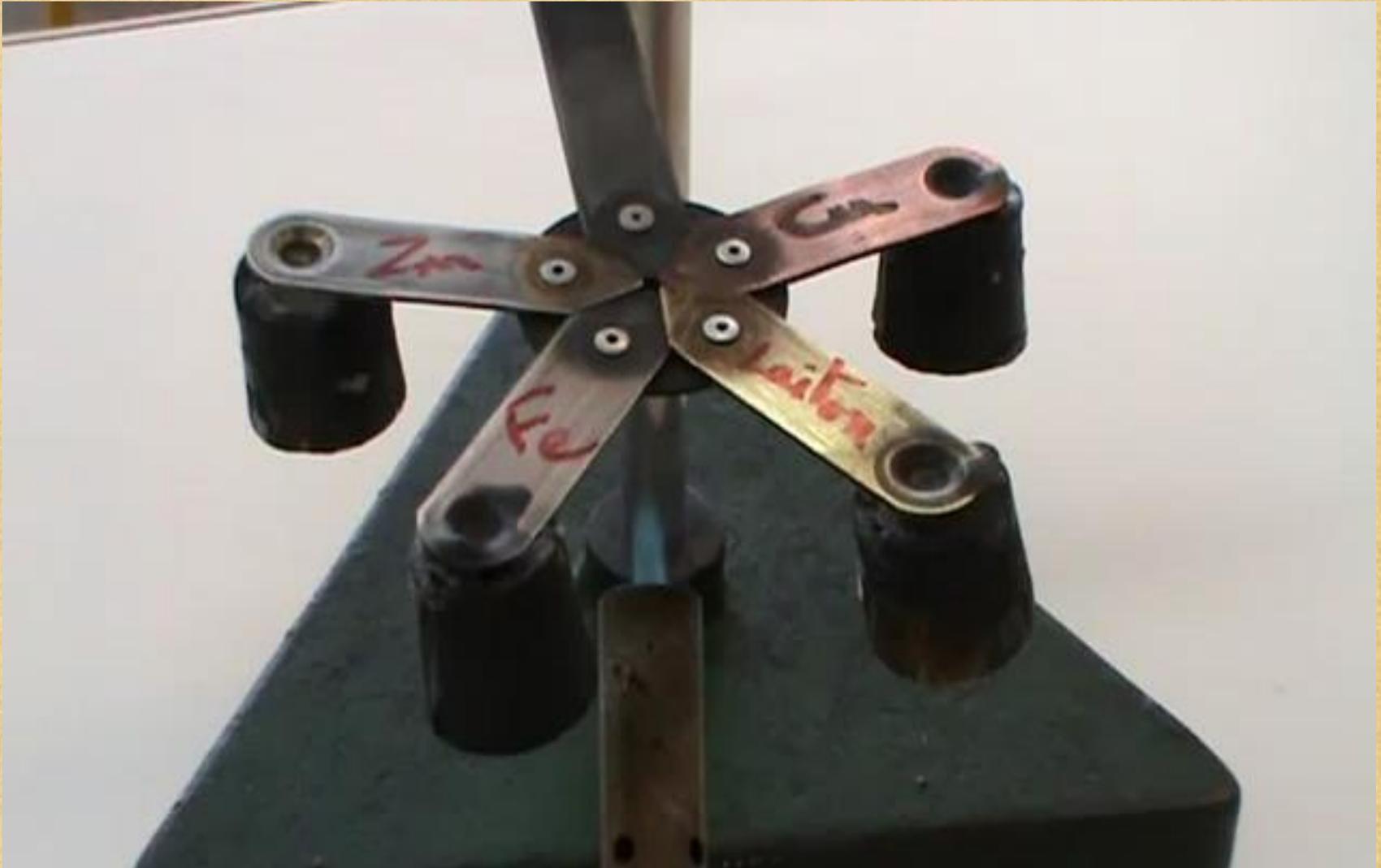
Différents modes de transfert thermique

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 : $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($J > 0$)

➤ λ : 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 :

$$\Phi = J \cdot S$$

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

Φ : Puissance thermique.

Unité : W

Q : Chaleur transférée.

Unité : J

Différents modes de transfert thermique

Conduction thermique

Loi de Fourier

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

- **Gaz** (λ de 0,006 à 0,18) : mauvais conducteurs
- **Liquides non métalliques** (λ de 0,1 à 1) : conducteurs moyens (eau) - **Solides métalliques** (λ de 10 à 400) : excellents conducteurs (cuivre, acier)
- **Matériaux non métalliques** (λ 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

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

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

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

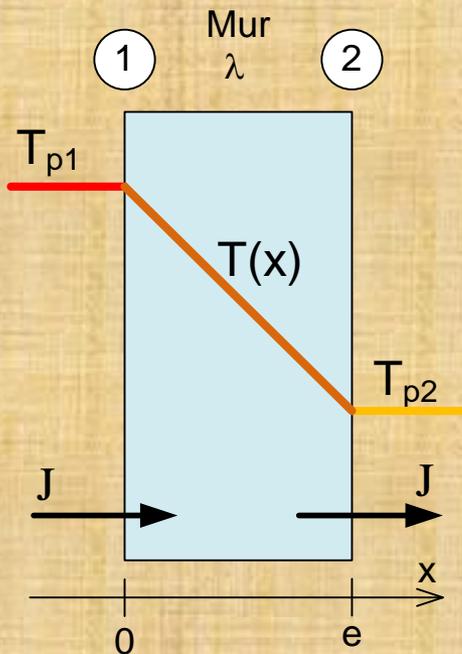
On définit la résistance thermique par :

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
e	mètre	Épaisseur de l'élément	
λ	W/(m.K)	Conductivité thermique Plus est faible, plus le matériau est isolant	
R	(m ² .K)/W	Résistance thermique Plus R est grand, plus la paroi est isolante	$R = e / \lambda$

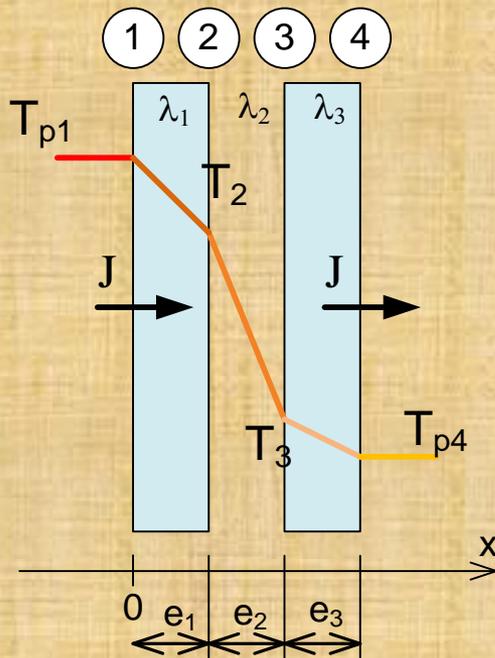
Différents modes de transfert thermique

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

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

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

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

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

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

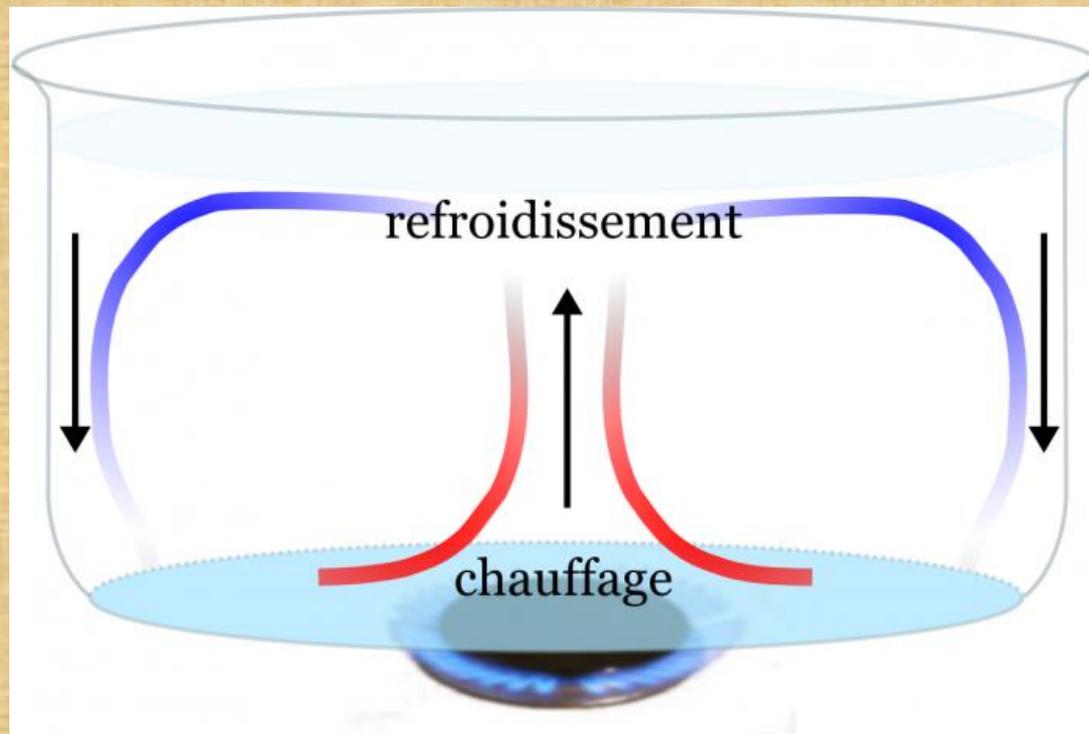
$$T_{p1} - T_{p4} = (R_{th1} + R_{th2} + R_{th3}) \cdot J$$

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.

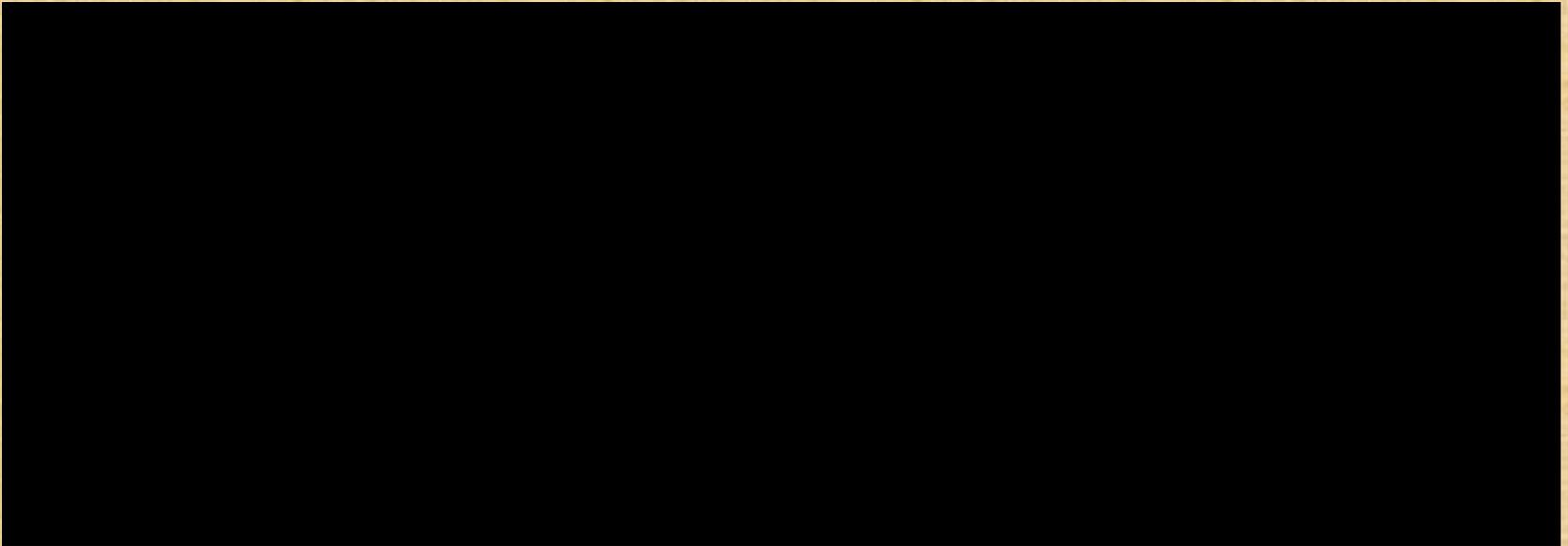


Différents modes de transfert thermique

Convection thermique

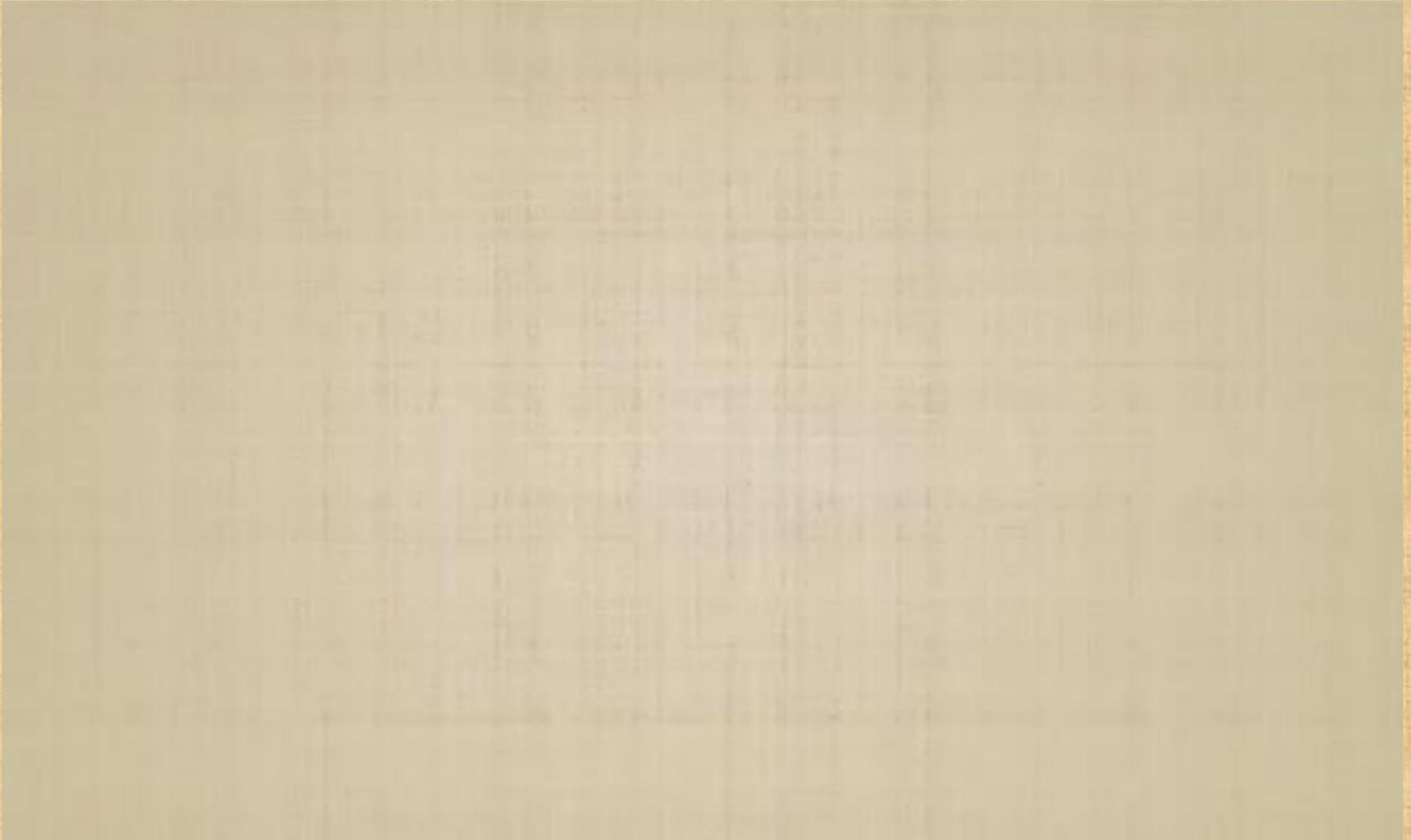
Par conséquent, un fluide chaud a donc tendance à s'élever et un fluide froid à descendre ce qui provoque des courants ascendants ou descendants que l'on retrouve par exemple dans l'air ou dans l'eau.

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



Différents modes de transfert thermique

Convection thermique



Différents modes de transfert thermique

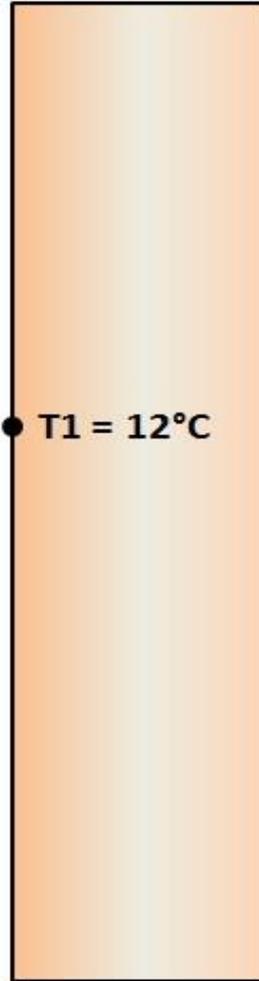
Convection thermique

Cas d'un mur

$T_{\text{ambient}} = 20^{\circ}\text{C}$

$h = 10 \text{ w.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$

● $T_1 = 12^{\circ}\text{C}$

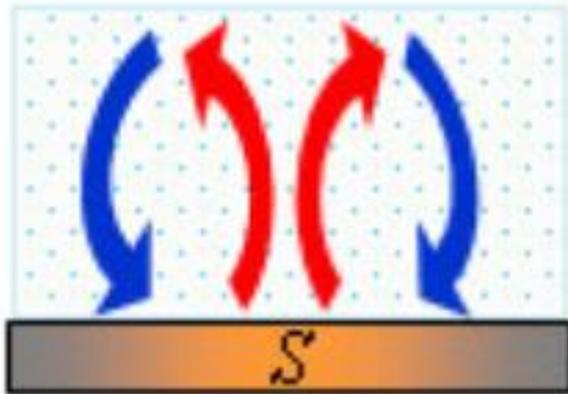


Ce transfert de chaleur provient du mouvement macroscopique d'un fluide (liquide ou gaz).

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

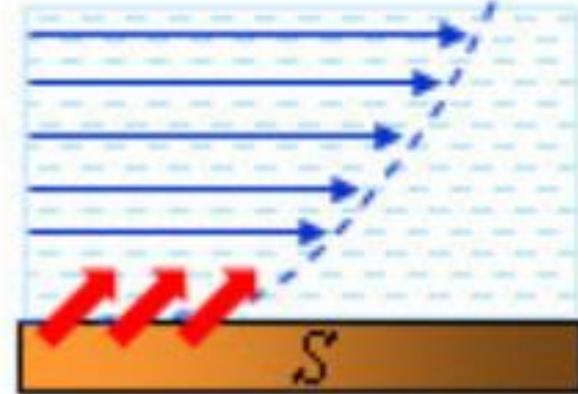
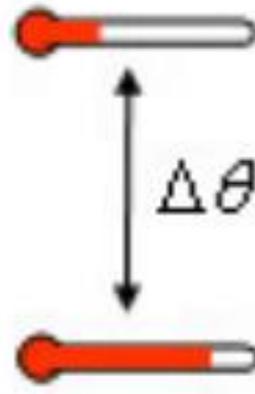
Différents modes de transfert thermique

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.

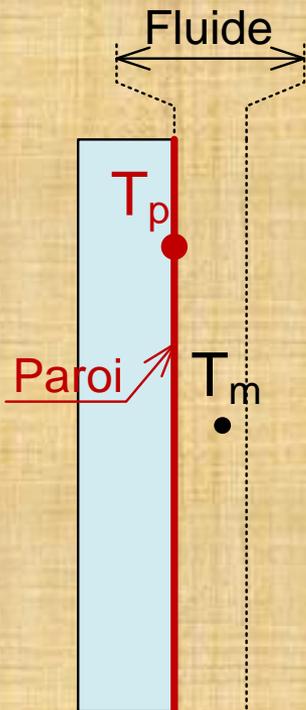
Phénomène complexe liant mécanique des fluides et transferts thermiques

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

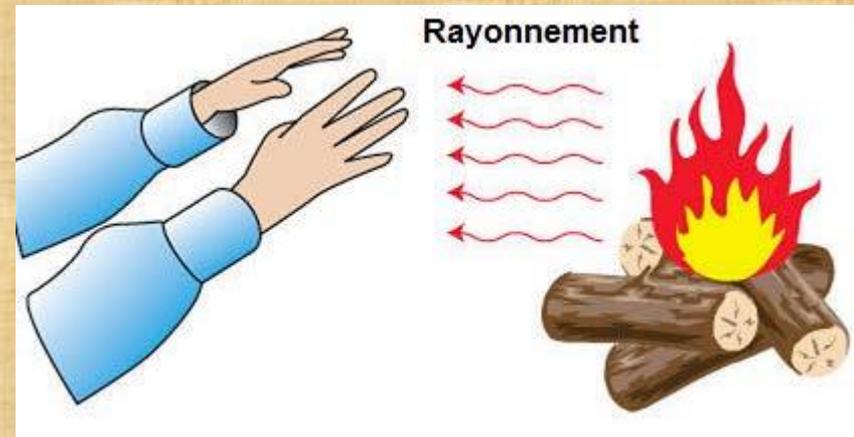
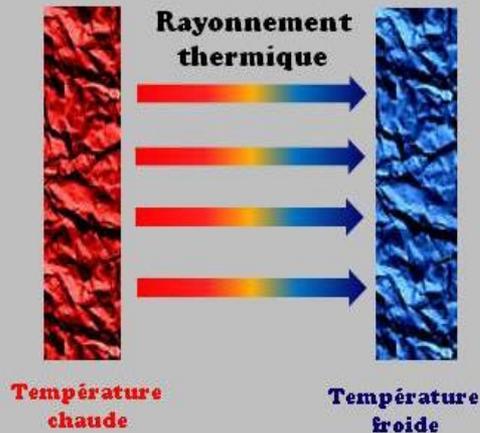
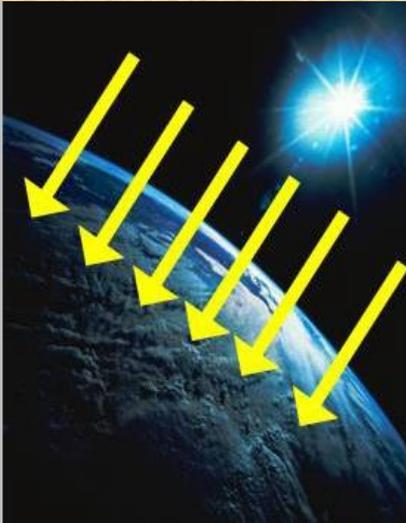
Configuration	h ($Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$)
<u>Convection naturelle</u>	
Plaque verticale de hauteur 0,3 m dans l'air	4,5
Cylindre horizontal de diamètre 5 cm dans l'air	6,5
Cylindre horizontal de diamètre 2 cm dans l'eau	890
<u>Convection forcée</u>	
Courant d'air à 2 m/s sur une plaque carrée 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

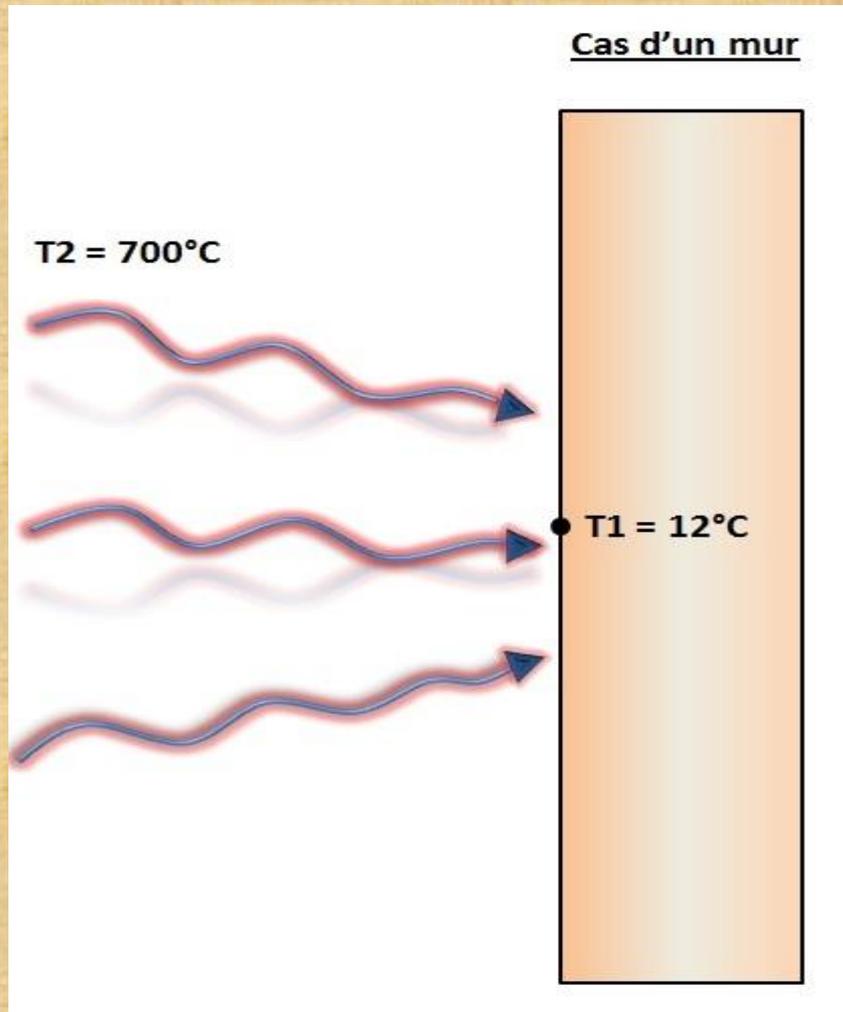
Le rayonnement est un mécanisme appliqué à beaucoup de phénomènes qui concernent le transfert d'énergie par transmission d'onde électromagnétique.

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 : Φ Puissance émise par la source. Unité : W
⇒ Source de puissance émise par une source.

- Emittance d'une source (monochromatique : λ) :

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

- 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** : $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$

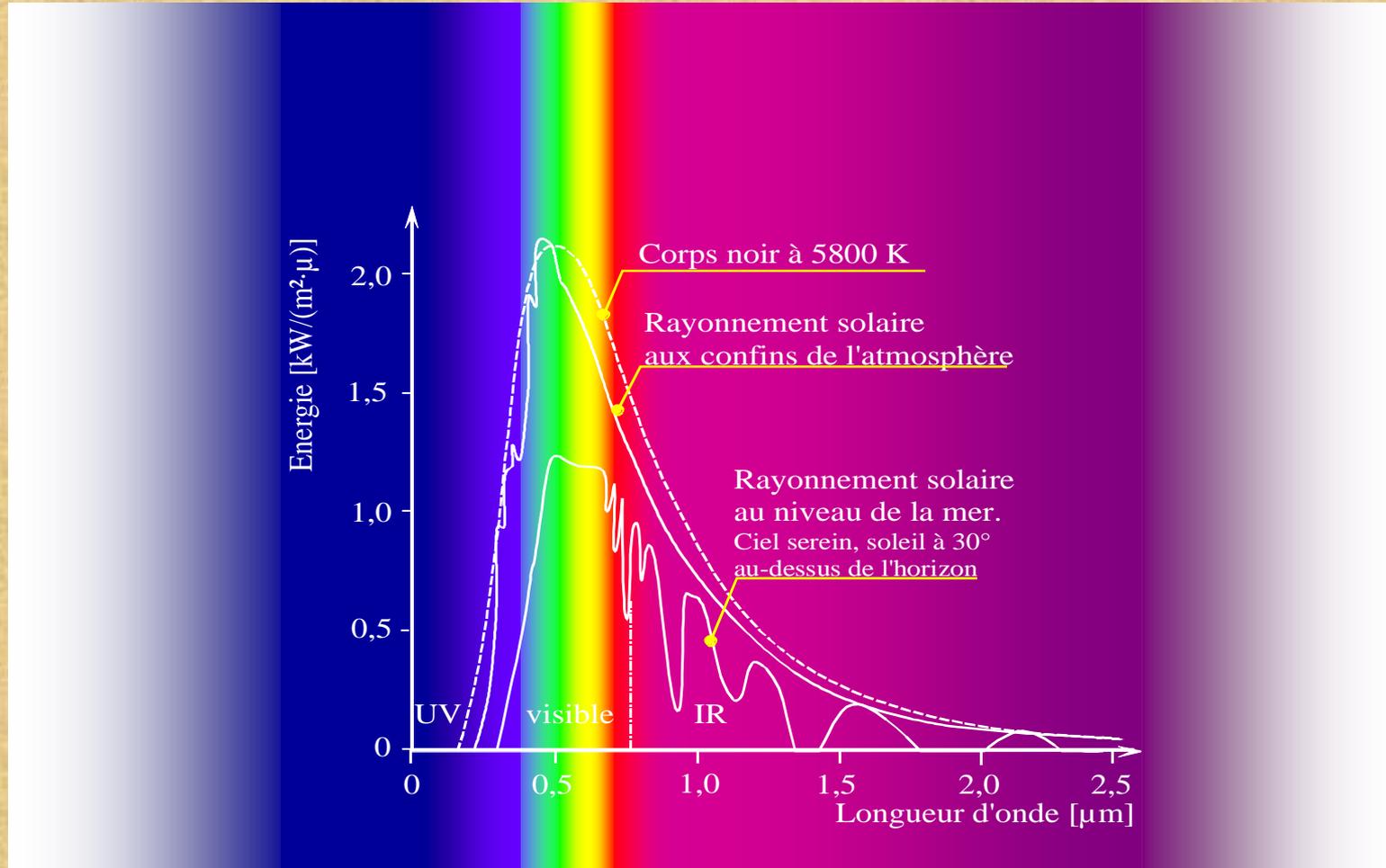
- ε : émissivité (facteur d'absorption ou d'émission de la surface émettrice)
coefficient sans unité (1 pour un corps noir)

- T : température du corps (K)

Différents modes de transfert thermique

Rayonnement

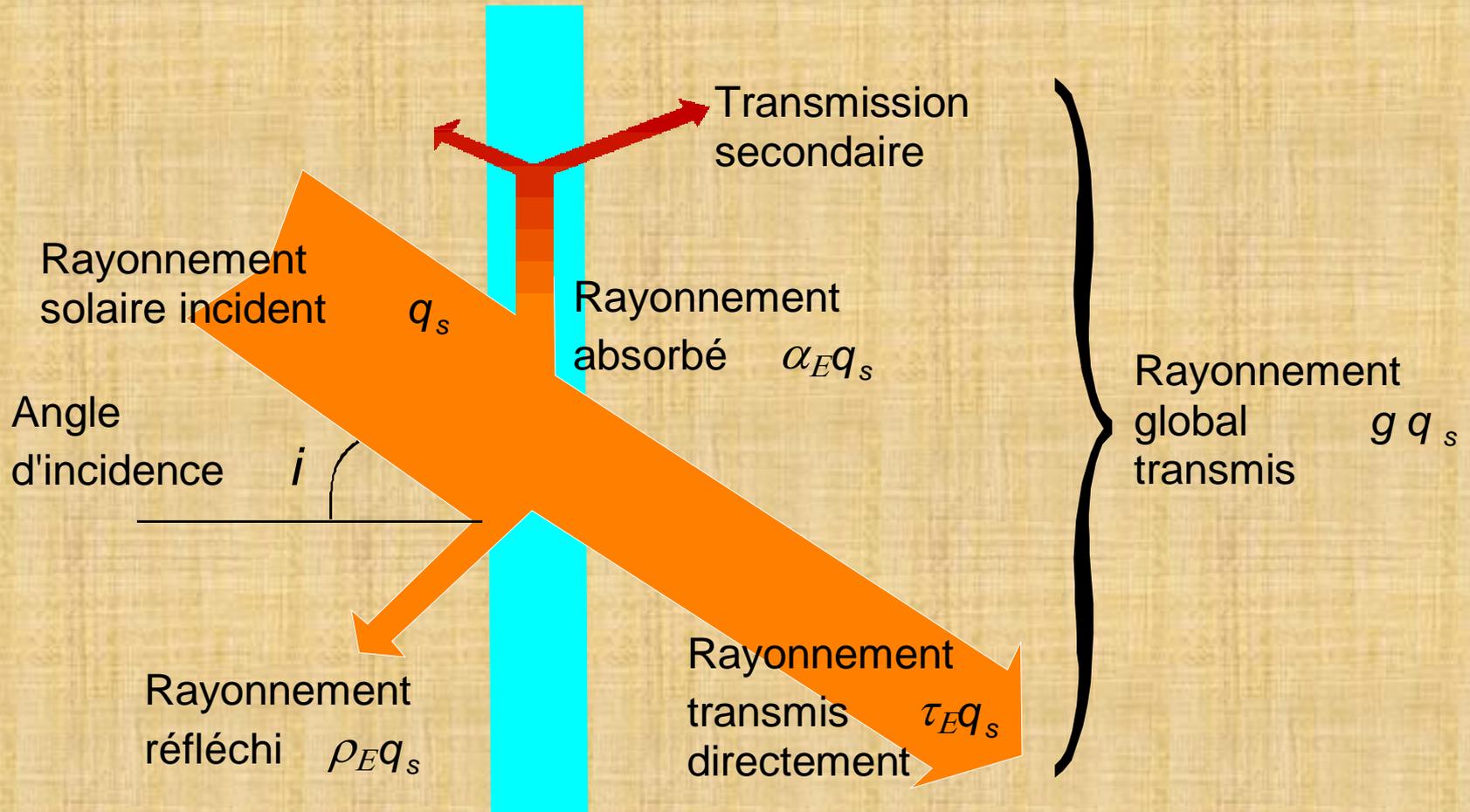
➤ Le rayonnement solaire.



Différents modes de transfert thermique

Rayonnement

➤ Le rayonnement solaire sur un vitrage.

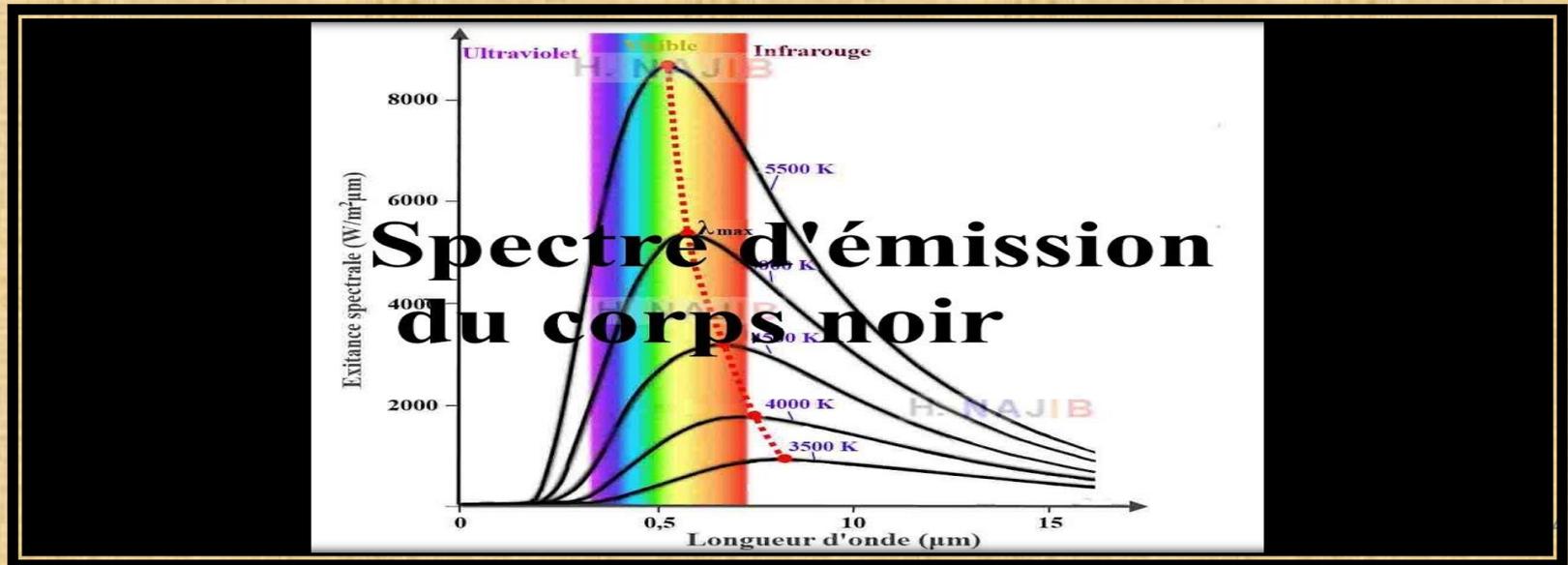


Différents modes de transfert thermique

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.

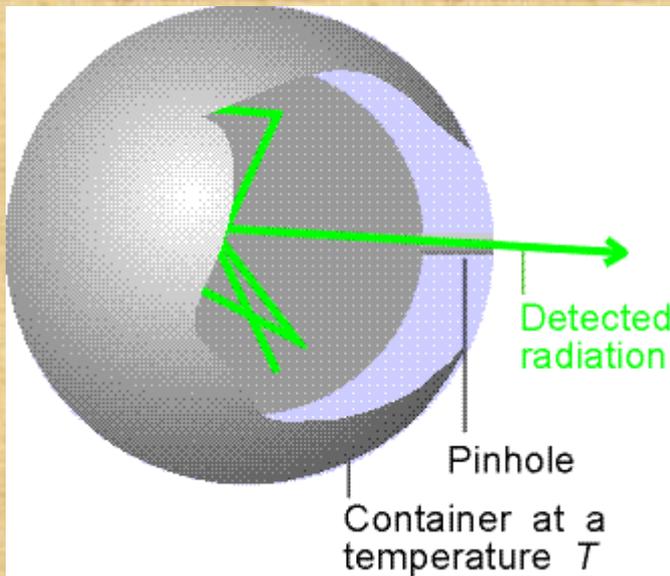


Différents modes de transfert thermique

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

Un physicien allemand, Max Planck (1858-1947) a démontré à l'aide d'une relation mathématique complexe que l'émission des radiations émises par un corps dépend de la température. Sa loi est basée sur le comportement d'un corps noir idéal.

En fait, la loi de Planck nous renseigne sur **l'intensité de la lumière en fonction de la longueur d'onde et de la température**. En captant le rayonnement émis par un corps, il est possible d'en déduire la température. Bien que le corps noir soit un corps idéal qui n'existe pas dans la réalité, le comportement des corps réels peut s'approcher plus ou moins de celui d'un corps noir, ce qui permet d'utiliser la loi de Planck pour mesurer la température d'un corps.

Différents modes de transfert thermique

Rayonnement

Lois du rayonnement du corps noir

Planck et l'effet du corps noir

Plus la température d'un corps est élevée, plus la longueur d'onde émise par la couleur est courte. Il en découle alors des radiations de grande intensité.

La loi de Planck est utile lorsqu'il s'avère impossible de déterminer la température d'un corps par des mesures expérimentales. C'est entre autre le cas lorsqu'on veut déterminer la température des corps célestes (des étoiles par exemple).

Différents modes de transfert thermique

Rayonnement

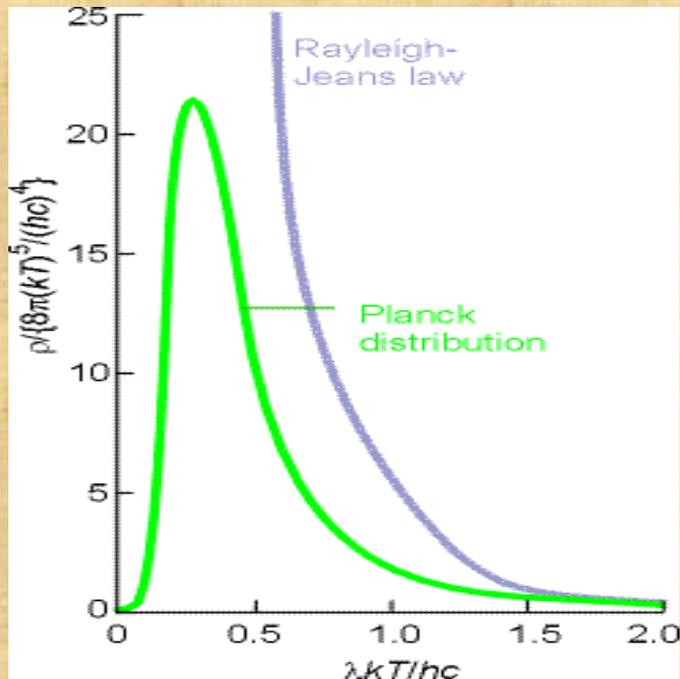
Lois du rayonnement du corps noir

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



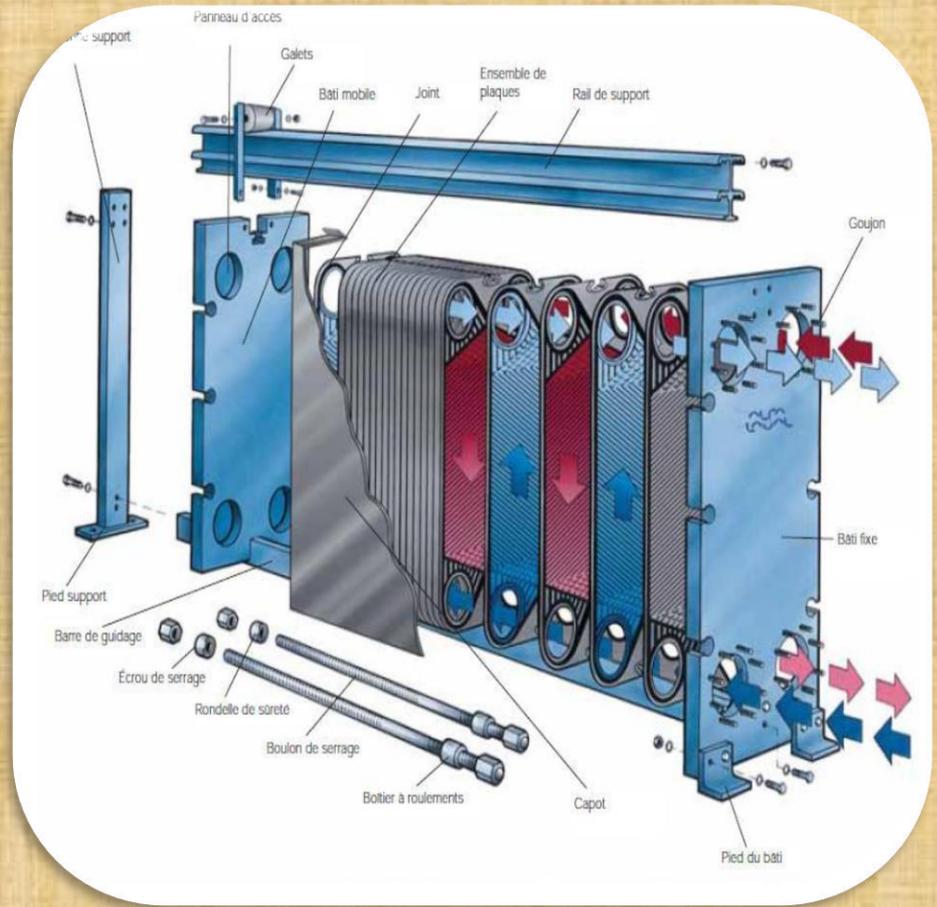
Equipements procédés thermiques

Fours



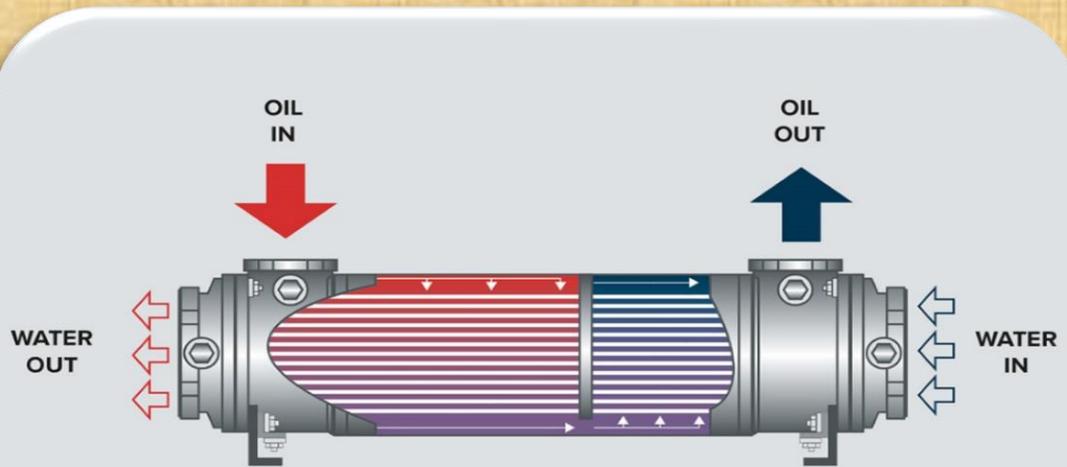
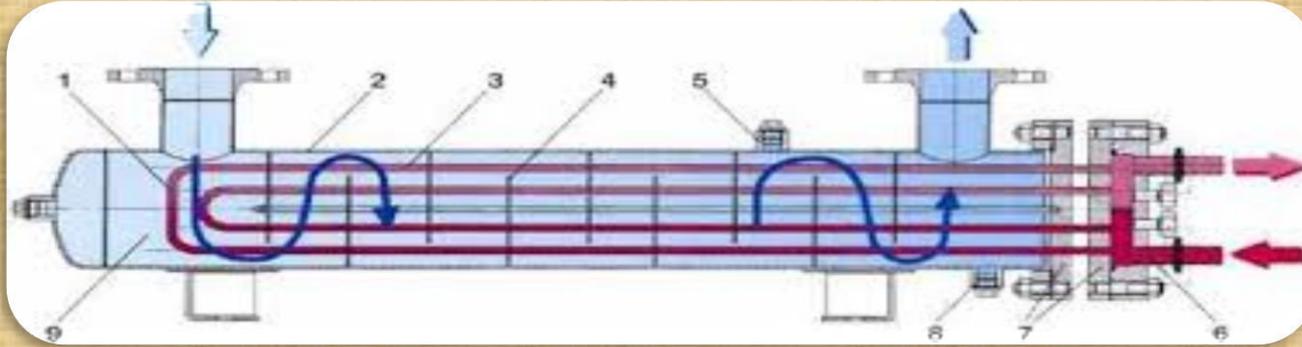
Equipements procédés thermiques

Echangeurs à plaques



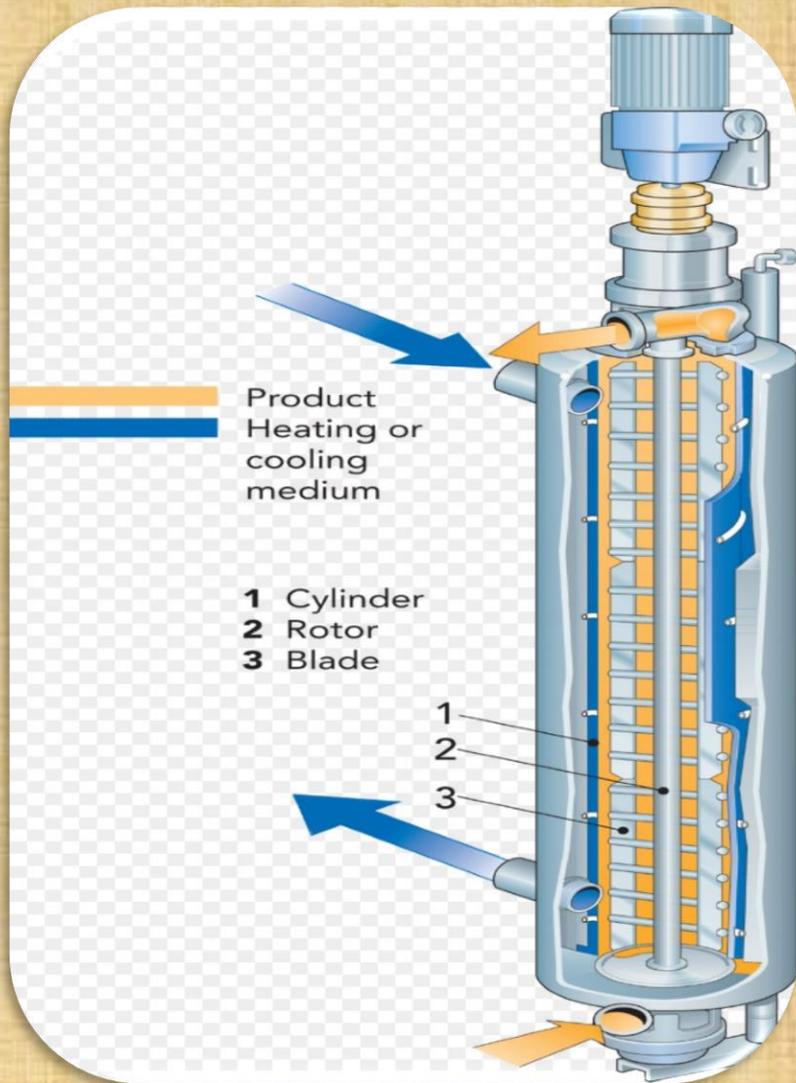
Equipements procédés thermiques

Echangeurs tubulaires



Equipements procédés thermiques

Echangeurs à surface raclée



Equipements procédés thermiques

Convoyeurs



alamy stock photo

PX2370
www.alamy.com

Transfert de la matière

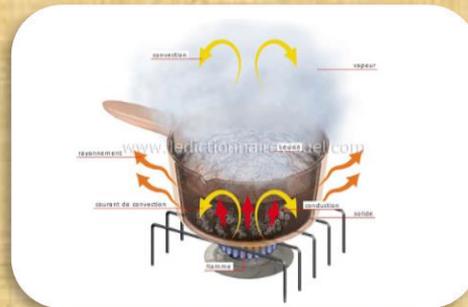
Le transfert de matière (ou transfert de masse) joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base mises en œuvre au cours de la **transformation des aliments ou de produits biologiques** (séchage, salage, sucrage, absorption, adsorption, cristallisation, extraction, distillation, ...).

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⁻¹ ou mol.s⁻¹)

N : flux de matière (kg.m⁻².s⁻¹ ou mol.m⁻².s⁻¹)

Transfert de la matière

Il existe deux modes principaux de transfert de matière :

➤ Diffusion

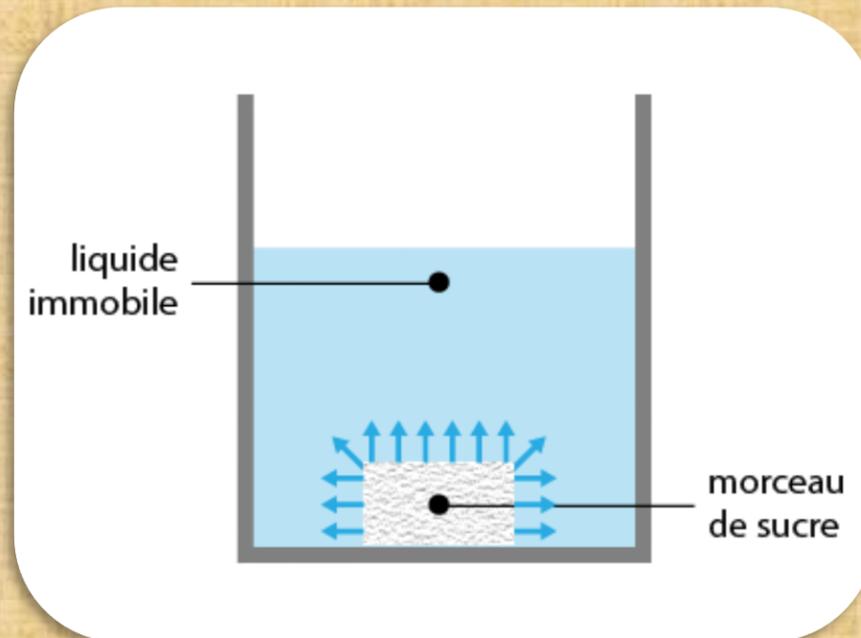
➤ Convection.

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.

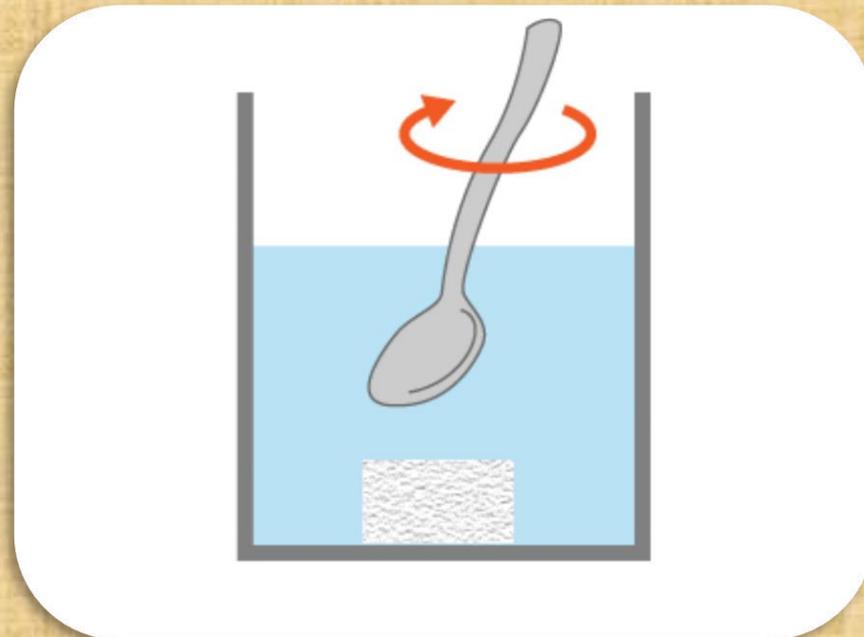


Transfert de la matière

Convection

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

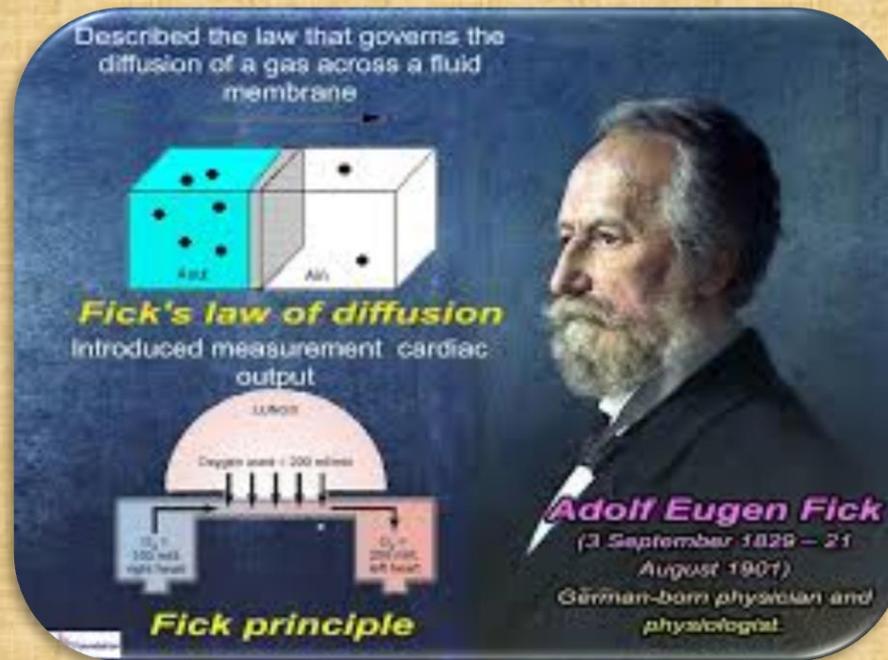
Exemple : l'agitation avec une cuillère est une convection forcée.



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 ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

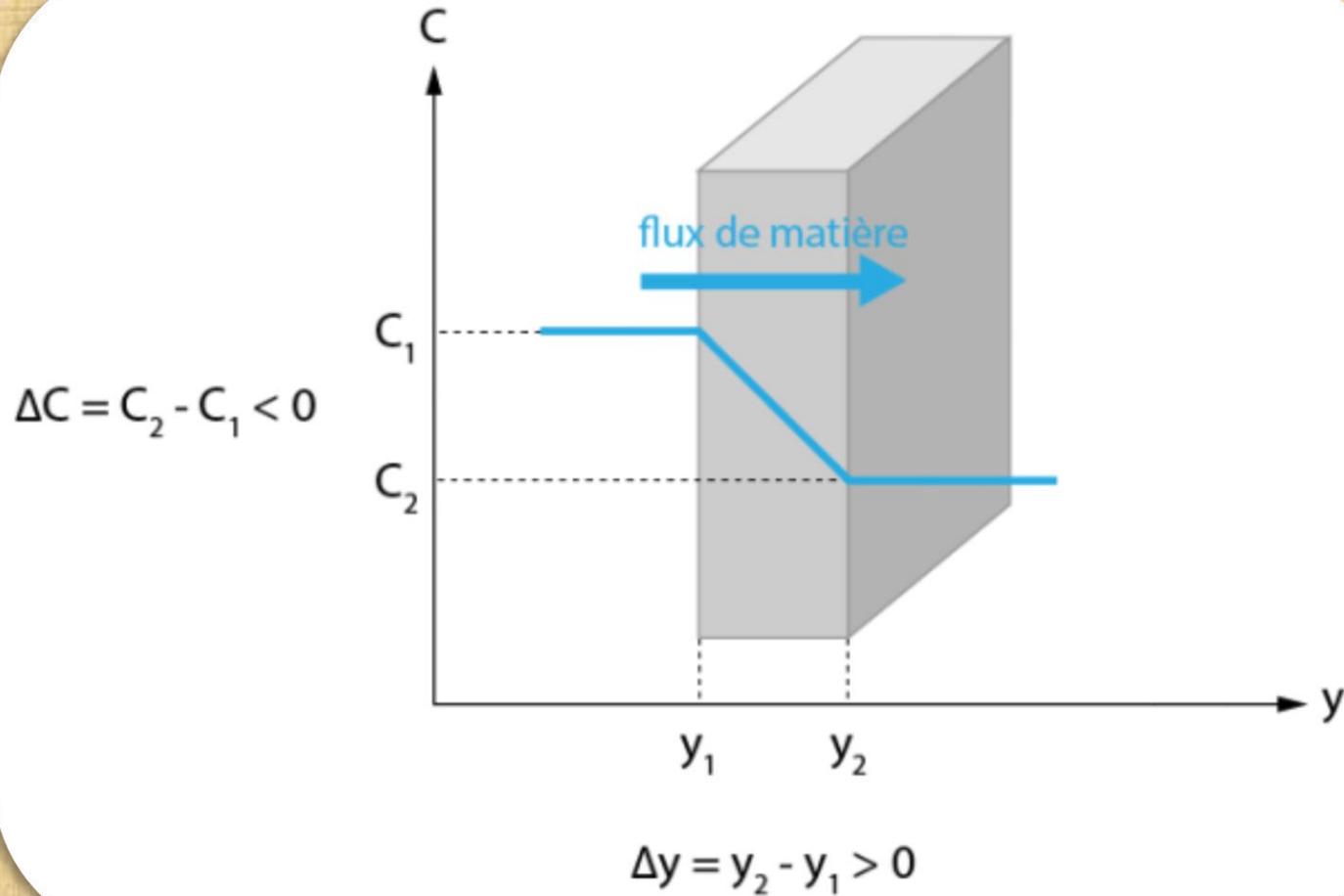
C_A : concentration en composé A (kg.m^{-3} ou mol.m^{-3})

ΔC_A : variation de concentration en composé A (kg.m^{-3} ou mol.m^{-3})

Δy : 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⁻¹)

v_{dA} : vitesse de diffusion de A (m.s⁻¹)

v : vitesse moyenne de l'écoulement (m.s⁻¹)

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⁻².s⁻¹ ou mol.m⁻².s⁻¹)

J_A : flux de diffusion du composé A (kg.m⁻².s⁻¹ ou mol.m⁻².s⁻¹)

T_A : flux par transport convectif du composé A (kg.m⁻².s⁻¹ ou mol.m⁻².s⁻¹)

C_A : concentration molaire ou massique de A dans le mélange (kg.m⁻³ ou mol.m⁻³)

Le phénomène de diffusion

Transfert de la matière

Diffusion Osmosis Dialysis