

BASES DE THERMIQUE POUR LE GÉNIE INDUSTRIEL ALIMENTAIRE

BUT GB SAB 1

C. Voyant

2023/2024

Plan du cours

- **Introduction**
- Transferts thermiques (TD1 & TD2)
- Refroidissement et congélation (TD3 & TD4)
- Bilan énergétique (TD1 & TD2 & TD3 & TD4)

Introduction

1. Thermodynamique et transferts thermiques

La thermodynamique ne s'intéresse qu'à des états d'équilibre, négligeant les mécanismes d'échanges qui y conduisent.

L'étude de ces échanges constitue une discipline indépendante : **les transferts thermiques**.

2. Les différents modes de transfert de la chaleur

Avant tout, il convient de rappeler que l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants (molécules, atomes,...).

On distingue trois modes de transfert de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

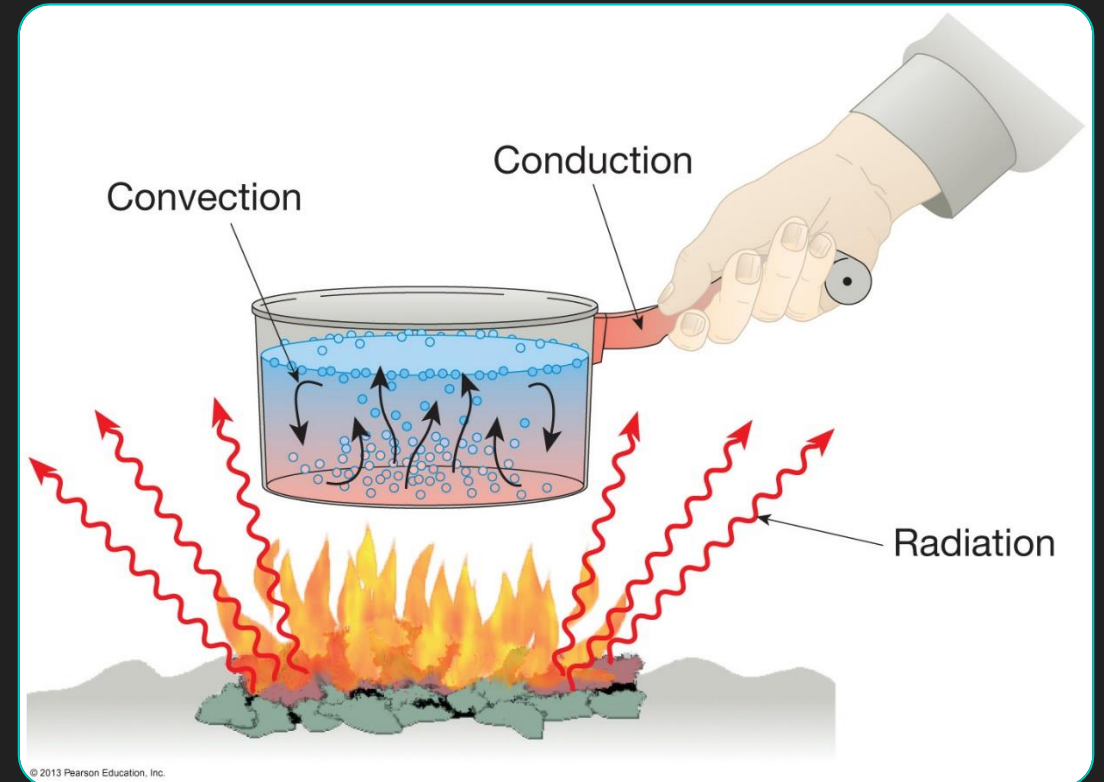
Chacun des transferts thermiques est lié à un processus physique correspondant à la façon d'échanger de l'énergie thermique par ces particules (qui peuvent donc gagner ou perdre de l'énergie cinétique).

Plan du cours

- Introduction
- Transferts thermiques (TD1 & TD2)
- Refroidissement et congélation (TD3 & TD4)
- Bilan énergétique (TD1 & TD2 & TD3 & TD4)

Introduction

- Les échanges par interaction directe avec les particules voisines (choc de molécules par ex) correspondent à la **conduction**.
- Les échanges par absorption ou émission de radiations électromagnétiques correspondent au **rayonnement**.
- Dans le cas d'un fluide, on considère à l'échelle macroscopique les échanges résultant du mélange des diverses parties de ce fluide à des températures différentes : la **convection**.



Transferts thermiques

1. Concepts fondamentaux

Surfaces isothermes

Le lieu des points ayant à chaque instant la même température est appelé *surface isotherme*.

Flux et densité de flux thermique

Considérons une plaque chauffée de manière uniforme sur toute sa surface S .

Soit dQ la quantité de chaleur (J) échangée entre cette plaque et l'air ambiant pendant l'intervalle de temps dt . On appelle :

- Flux thermique : la puissance (W) échangée par la surface S de la plaque
- Densité de flux thermique : la puissance échangée par unité de surface (W/m^2) de cette plaque

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$$

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = \frac{1}{S} \times \frac{dQ}{dt}$$

Transferts thermiques

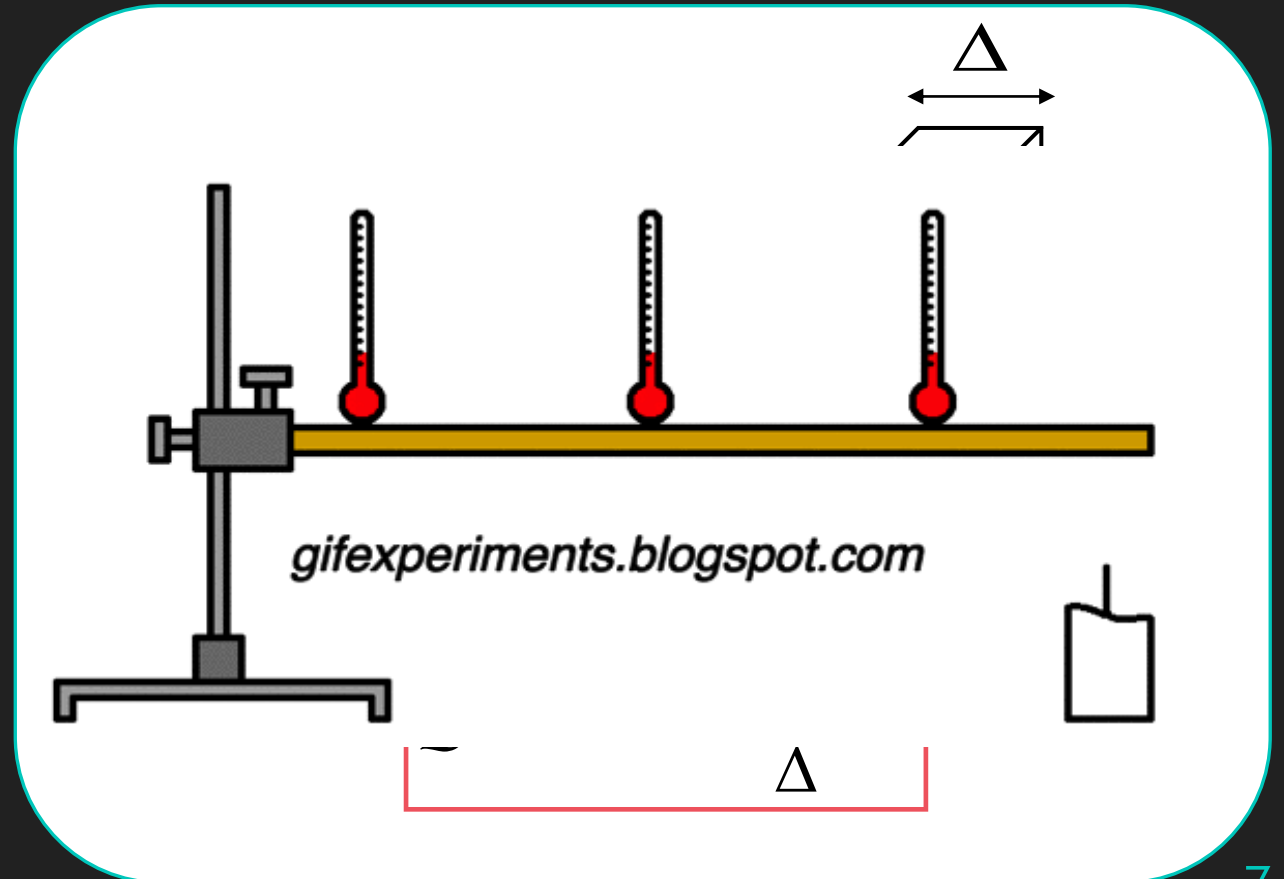
2. Conduction thermique

Loi de Fourier

Considérons un objet placé entre deux surfaces isothermes aux températures T_1 et T_2 (avec $T_2 > T_1$).

Après un certain temps, on observe que la température de l'objet n'est pas constante et qu'elle varie de façon croissante de la gauche vers la droite.

Ce comportement est dû à un flux de chaleur qui s'établit entre les deux faces de l'objet portées aux températures T_1 et T_2 .



λ s'appelle la conductivité thermique en $W/(m.K)$.

Transferts thermiques

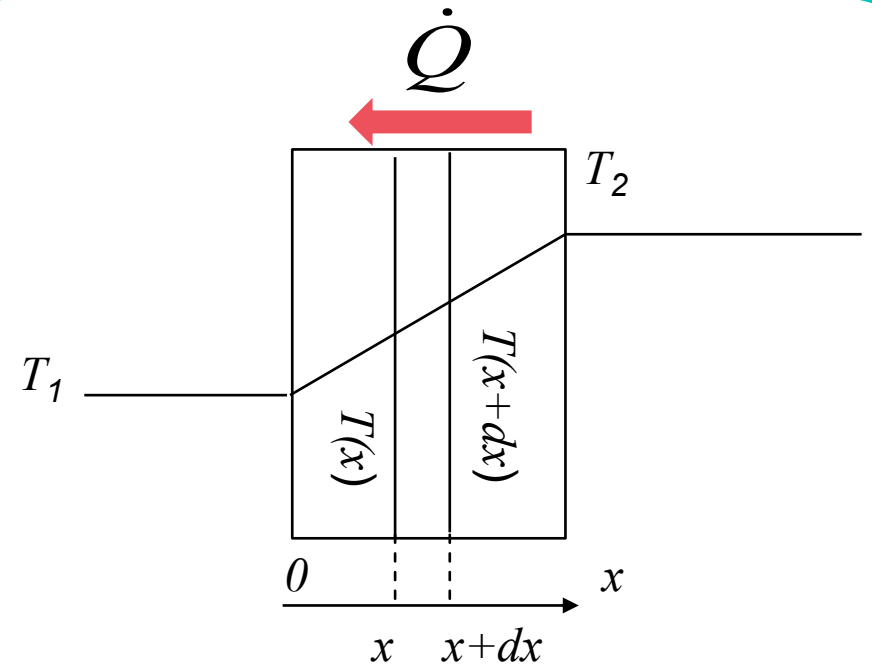
2. Conduction thermique

Remarques

Le signe moins permet de donner le sens du flux de chaleur « du chaud vers le froid ».

Le long de l'objet la température s'établit suivant des surfaces isothermes

L'expression du flux entre ces surfaces est donnée par :



$$\dot{Q} = -\lambda S \frac{dT}{dx}$$

Transferts thermiques

2. Conduction thermique

Résistance thermique de conduction (interne)

Par analogie avec l'électricité on écrit que

$$\dot{Q} = -\lambda S \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\dot{Q}}{S} = \frac{\lambda}{\Delta} (T_1 - T_2) \quad \Leftrightarrow (T_1 - T_2) = \frac{\Delta}{\lambda} \dot{q}$$

$$(T_1 - T_2) = R \dot{q}$$

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

$$R = \frac{1}{k}$$

R représente la résistance thermique de conduction du milieu (K.m²/W)

k représente la conductance thermique du milieu (W/K.m²)

Transferts thermiques

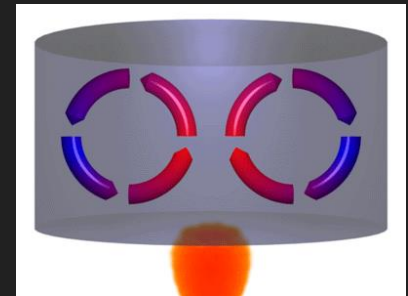
3. Convection thermique

Généralités

Rappelons qu'il s'agit de transferts de chaleur dus à des transferts de masse

Les échanges convectifs sont de deux types :

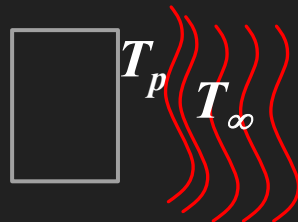
- **convection libre** (courants marins ou orages)
- **convection forcée** (utilisation de pompes, turbines... four à convection)



Ce mode de transfert est étudié essentiellement pour déterminer les échanges de chaleur entre une paroi et un fluide au contact de celle-ci.

Coefficients d'échange thermique par convection (loi de Newton)

Considérons un corps solide de température de paroi T_p , en contact avec un milieu fluide en mouvement caractérisé par une température T_∞ .



L'expression du flux de chaleur traversant la surface de contact S est donnée par

$$\dot{Q} = h S (T_p - T_\infty)$$

h est le coefficient d'échange thermique par convection

Transferts thermiques

3. Convection thermique

Coefficients d'échange thermique par convection

h est le coefficient d'échange thermique par convection. On l'appelle le plus souvent *coefficient de convection* en $W/(m^2.K)$

Résistance thermique de convection (externe)

De la même façon que pour la conduction, on peut écrire que :

$$\dot{Q} = h S (T_p - T_\infty) \Leftrightarrow \frac{\dot{Q}}{S} = h (T_p - T_\infty) \Leftrightarrow (T_p - T_\infty) = \frac{1}{h} \dot{q}$$

$$(T_p - T_\infty) = R \dot{q}$$

$$R = \frac{1}{h}$$

Où R représente la résistance thermique de convection

Transferts thermiques

4. Le nombre de Biot

Le nombre de Biot (Bi) est un nombre sans dimension utilisé dans les calculs de transfert thermique en phase transitoire

Il compare les résistances au transfert thermique à l'intérieur et à la surface d'un corps

$$Bi = \frac{1/k}{1/h} = \frac{h}{k} = \frac{h\Delta}{\lambda}$$

h coefficient global de transfert thermique
 Δ - longueur caractéristique (m)
 λ - conductivité thermique du corps

Une valeur du nombre de Biot > 40 signifie que la conduction de la chaleur à l'intérieur du corps est plus lente qu'à sa surface => Système épais

Si le nombre de Biot d'un système < 0.1 cela signifie que la résistance interne est négligeable, et donc que la température peut être considérée comme uniforme à l'intérieur du corps => Système mince

Plan du cours

- Introduction
- Transferts thermiques (TD1 & TD2)
- Refroidissement et congélation (TD3 & TD4)
- Bilan énergétique (TD1 & TD2 & TD3 & TD4)

Refroidissement et congélation

1. Objectifs de ce chapitre

- Déterminer la **puissance frigorifique** nécessaire à une opération de refroidissement ou de congélation
- Déterminer la **quantité d'eau** restant à congeler lors d'une congélation

2. Quelques propriétés thermiques des aliments

Les propriétés thermiques des aliments (c_p , λ ,...) dépendent de l'aliment considéré. De plus, elles sont fonction de la teneur en eau des aliments.

H , la teneur en eau (en base humide) d'un aliment est définie par :

$$H = \frac{\text{Masse de l'échantillon humide} - \text{Masse de l'échantillon sec}}{\text{Masse de l'échantillon humide}} \times 100$$

Il existe des formules simples permettant d'obtenir certaines propriétés thermiques.

Refroidissement et congélation

2. Quelques propriétés thermiques des aliments

Capacité calorifique

La capacité calorifique massique d'un aliment frais est approchée par :

$$c_{p,frais} = 3.35 \times a + 0.84$$

$$\text{avec } a = H/100$$

c_p est exprimée en kJ/(kg.°C)

De la même façon, pour un aliment congelé, on a :

$$c_{p,congelé} = 1.26 \times a + 0.84$$

Température de début de congélation des aliments

Comme l'eau contenue dans les aliments n'est pas pure, la température de congélation des aliments est souvent inférieure à 0°C.

Remarque : on parle de température de début de congélation ou de température moyenne de congélation. En effet, lorsque la quantité d'eau congelée dans les aliments augmente, la température de congélation diminue car la concentration en sucre dans l'eau restante augmente.

Refroidissement et congélation

2. Quelques propriétés thermiques des aliments

Capacité calorifique

La capacité calorifique massique d'un aliment frais est approchée par :

$$c_{p,frais} = 3.35 \times a + 0.84$$

$$\text{avec } a = H/100$$

c_p est exprimée en kJ/(kg.°C)

De la même façon, pour un aliment congelé, on a :

$$c_{p,congelé} = 1.26 \times a + 0.84$$

Température de début de congélation des aliments

Comme l'eau contenue dans les aliments n'est pas pure, la température de congélation des aliments est souvent inférieure à 0°C.

On utilise souvent les formules de Levy (°C)

$$T_c = -3 \times \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \quad \text{pour le bœuf et le poisson de mer}$$

$$T_c = -0.75 \times \sqrt{\frac{1}{a} - 1} \quad \text{pour l'agneau}$$

Refroidissement et congélation

3. Puissance frigorifique

1. Puissance frigorifique de refroidissement

La puissance moyenne frigorifique nécessaire pour refroidir une masse m d'un aliment de capacité calorifique c_p entre des températures T_i et T_f durant un intervalle de temps Δt est donnée par :

$$Q = c_p \Delta T$$

rappel

$$\dot{Q}_F = mc_p \frac{(T_i - T_f)}{\Delta t}$$

On a besoin de cette formule pour dimensionner une installation pour refroidir des aliments.

Remarque : Les fruits et les légumes respirent. Le sucre se combine avec l'oxygène pour former H_2O et CO_2 . L'énergie de respiration est ainsi dégagée ce qui accroît la puissance calorifique pour arriver à T_f .

Exemple : puissances de respiration des fraises à $0^\circ C$, $10^\circ C$ et $20^\circ C$ sont respectivement de 44,7 213 et 442 mW/kg.

Refroidissement et congélation

3. Puissance frigorifique

2. Puissance frigorifique de congélation

Deux facteurs importants sont à considérer pour dimensionner une unité frigorifique de congélation pour les aliments : la **variation d'enthalpie** subie par le produit et la **durée souhaitée de surgélation**.

La variation d'enthalpie massique des aliments peut être estimée si on connaît la température de congélation commençante T_c .

Énergie totale = Énergie interne + Travail

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3$$

$$h = u + pv \Rightarrow \Delta h = \Delta u = Q/m$$

$$\Delta h_1 = c_{p, \text{frais}} (T_i - T_c)$$

Variation d'enthalpie sensible de la T initiale à T_c .

$$\Delta h_2 = aL$$

Consommation d'enthalpie latente lors du chgt d'état.

$$\Delta h_3 = c_{p, \text{congelé}} (T_c - T_f)$$

Variation d'enthalpie sensible de T_c à la T finale T_f

Refroidissement et congélation

3. Puissance frigorifique

2. Puissance frigorifique de congélation

Connaissant les caractéristiques d'un aliment donné, si on veut congeler une masse m de cet aliment durant un intervalle de temps Δt , on doit choisir un appareil de puissance frigorifique

$$\dot{Q}_F > \frac{m\Delta h}{\Delta t}$$

De la même façon, si on a un appareil de puissance frigorifique fixée, pour garantir un temps de congélation Δt , il faudra une masse d'aliment m vérifiant :

$$m < \frac{\dot{Q}_F \Delta t}{\Delta h}$$

Refroidissement et congélation

4. Quantité d'eau à congeler

L'eau non congelable est un paramètre important qui doit être pris en considération pour la prévision des propriétés des aliments.

Chen a proposé une expression (on y reviendra en TD) pour calculer la teneur en glace G des produits en fonction de la température de congélation T_f .

A partir de G , on peut calculer la proportion d'eau congelée y et en déduire la proportion (et la quantité) d'eau restante.

$$G = \frac{\text{masse d'eau congelée}}{\text{masse d'aliment humide}}$$

$$G = \frac{S}{100M} \frac{RT_0^2}{L} \frac{(T_c - T)}{(T - T_0)(T_c - T_0)}$$

$$y = \frac{\text{masse d'eau congelée}}{\text{masse d'eau initiale}}$$

$$y = \frac{G}{a}$$

$$a = \frac{\text{masse d'eau initiale}}{\text{masse d'aliment humide}}$$

Refroidissement et congélation

4. Quantité d'eau à congeler

masse d'eau restante = masse d'eau initiale - masse d'eau congelée

masse d'eau congelée = $y \times$ masse d'eau initiale

$\Rightarrow$ masse d'eau restante = $(1 - y) \times$ masse d'eau initiale

Plan du cours

- Introduction
- Transferts thermiques (TD1 & TD2)
- Refroidissement et congélation (TD3 & TD4)
- Bilan énergétique (TD1 & TD2 & TD3 & TD4)

Bilan énergétique

T température finale dans l'aliment

T_a température ambiante

T_0 température initiale dans l'aliment

Δx distance de diffusion (entre la paroi et le point choisi)

t le temps

1. Cas de la conduction (approximation)

Trouver une relation permettant de connaître la température à l'intérieur d'un aliment

On a vu que $\dot{Q} = -\frac{\lambda.S}{\Delta x}(T - T_a)$ et que $\dot{Q} = m.c_p \frac{dT}{dt} \longrightarrow \frac{dT}{(T - T_a)} = -\frac{\lambda.S}{\Delta x.m.c_p} dt$

En intégrant les deux membres, il vient $\Rightarrow \int \frac{dT}{(T - T_a)} = \int -\frac{\lambda.S}{\Delta x.m.c_p} dt$ soit $\ln(T - T_a) = -\frac{\lambda.S}{\Delta x.m.c_p} t + cte$

Conditions aux limites, quand $t = 0$ alors $T = T_0 \Rightarrow cte = \ln(T_0 - T_a)$ d'où $T = T_a + (T_0 - T_a) \exp\left(-\frac{\lambda.S}{\Delta x.m.c_p} t\right)$

Possibilité d'utiliser une formule construite pour répondre à des problèmes de cuisson et de refroidissement

$$\log \frac{(T_a - T_0)}{(T_a - T)} = \frac{1}{f_h} t - \log(j)$$

f_h et j dépendent de la géométrie du problème

Bilan énergétique

T température finale dans l'aliment
 T_a température ambiante
 T_0 température initiale dans l'aliment
 t le temps

2. Cas de la convection

Trouver une relation permettant de connaître la température à la surface d'un aliment

En raisonnant de la même façon que précédemment, on trouve :

$$T = T_a + (T_0 - T_a) \exp\left(-\frac{h.S}{mc_p} t\right)$$

Possibilité d'utiliser une formule construite pour répondre à des problèmes de cuisson et de refroidissement

$$\log(\theta) = \frac{1}{f_h} t$$

avec $\theta = \frac{(T_a - T_0)}{(T_a - T)}$ et f_h qui dépend de la géométrie du problème

Ne pas oublier que $\log(\theta) = \frac{\ln(\theta)}{\ln(10)}$