

Cours 1 : Introduction

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

Transferts de chaleur

Christian Ghiaus

Bât. Freyssinet salle 1.05
Bât. Carnot salle 3.06

- *10h cours (5 séances)*
- *18h TD (9 séances)*

- *Conduction*
- *Convection*
- *Rayonnement*
- *Transferts de chaleur « multimodes »*

Documents de cours sur:

<https://moodle.insa-lyon.fr> Mes cours : Transferts de chaleur

<https://moodle.insa-lyon.fr/course/view.php?id=4885>

Introduction

INSA – sciences appliqués

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

Connaissances sous la forme des explications et prédictions testables.

Méthode : observations objectives vérifiables et raisonnement rigoureux.

Sciences appliquées -- disciplines applicatives qui utilisent la science (ex. ingénierie et médecine):

- thermodynamique, transfert de chaleur, mécanique des fluides, mécanique du milieu continu, géotechnique, sciences des matériaux, etc.

Les sciences formelles (mathématiques) sont souvent exclues : ne dépendent pas des observations empiriques.

Introduction

Concepts physiques

Transfert chaleur



Emmy Noether
(1882-1935)

Science: modèles qui ont la capacité de prédiction

Causalité: si un phénomène cause produit un phénomène effet, alors l'effet ne peut pas précéder la cause.

Relations = lois de la physique

Conservation (opération: addition $x_1 + x_2 = x_3$)

Energie-masse \Leftrightarrow symétrie (invariance) temps

Quantité de mouvement \Leftrightarrow symétrie (invariance) déplacement

Quantité de mouvement angulaire \Leftrightarrow symétrie (invariance) rotation

...

Lois fondamentales (opération: multiplication $x = a y$)

Attraction universelle (Newton) $F_1 = F_2 = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$

Relation Plank-Einstein $E = h \nu$

Energie thermique $E_{thermique} = k T$

...

Lois empiriques

Lois Ohm $u = R i$

Lois Hooke $F = k \Delta l$

Introduction

Concepts physiques

Transfert chaleur

Introduction

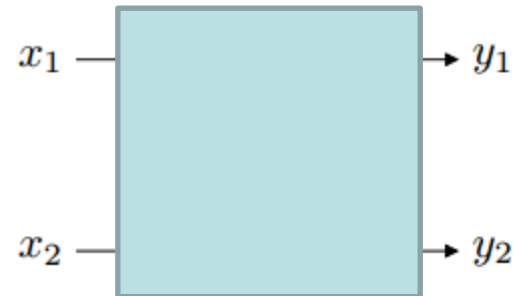
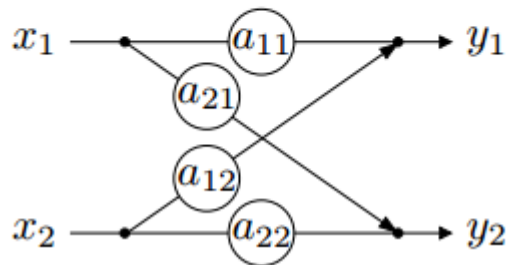
Bilan énergie

Lois constitutives

Système: éléments interconnectés par quantités qui se conservent

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{21}x_2 = y_1 \\ a_{12}x_1 + a_{22}x_2 = y_2 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$



Principe de correspondance: une nouvelle théorie scientifique englobant une théorie précédente doit pouvoir expliquer tout ce que cette dernière expliquait

Introduction

INSA – sciences appliqués

Transfert chaleur

Introduction

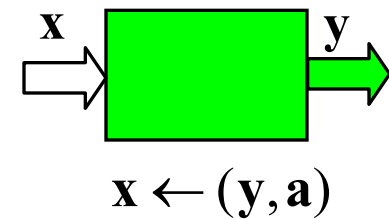
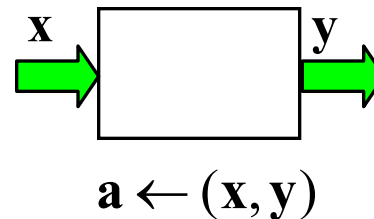
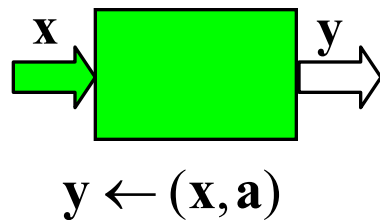
Bilan énergie

Lois constitutives

- Etude des phénomènes : expliquer les parties

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{y}_1 = f_1(\mathbf{x}_1 | \mathbf{a}_1) \\ \dots \\ \mathbf{y}_n = f_n(\mathbf{x}_n | \mathbf{a}_n) \end{array} \right\} \mathbf{y} = f(\mathbf{x} | \mathbf{a})$$

- Théorie des systèmes : mettre en relation et expliquer le comportement



Introduction

SI d'unités

Transfert chaleur

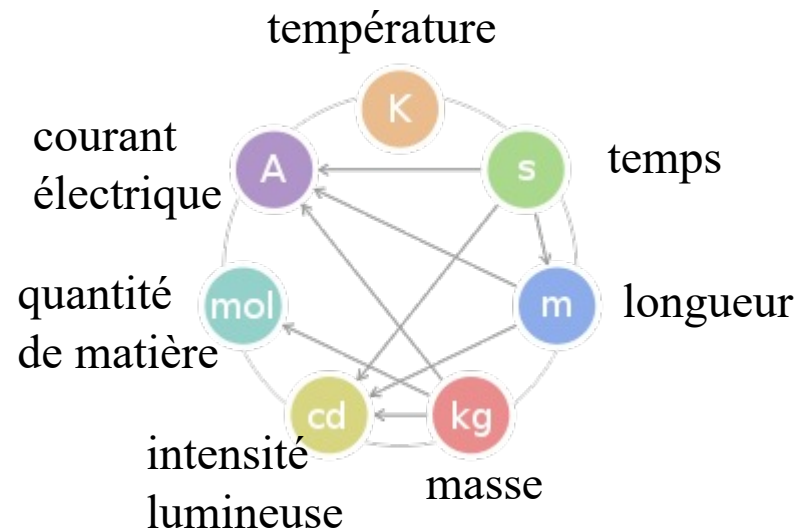
Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

Relations entre quantités \rightarrow nombre limité des unités indépendants

SI: système des quantités mesurable + relations entre les quantités



Introduction

SI d'unités et unités de Plank

Transfert chaleur

Introduction

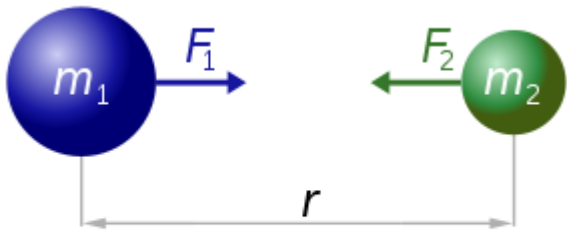
Bilan énergie

Lois constitutives

Constantes fondamentales

Constante	Symbole	Dimension
constante gravitationnelle	G	$M^{-1}L^3T^{-2}$
constante de Planck réduite	\hbar (= $h/2\pi$, où h est la constante de Planck)	ML^2T^{-1}
vitesse de la lumière dans le vide	c	L^1T^{-1}
constante de Boltzmann	k	$ML^2T^{-2}\Theta^{-1}$
permittivité du vide	ϵ_0	$Q^2M^{-1}L^{-3}T^2$

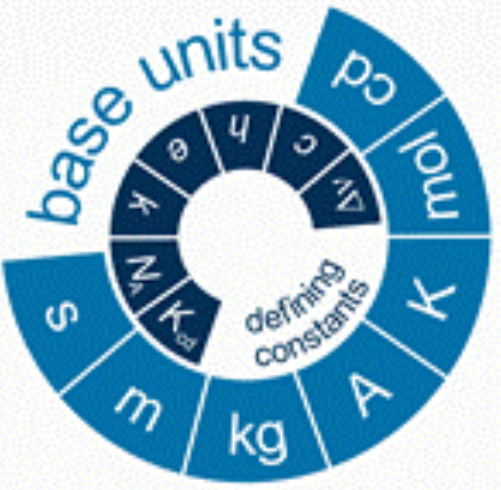
m, kg, s
K
A



$E = h\nu$
pour un photon

$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

$$E_{thermique} = kT$$



Introduction SI d'uni

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

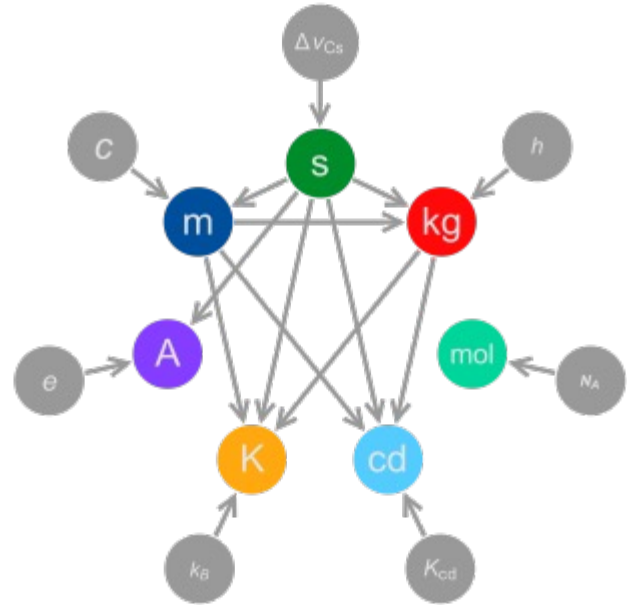
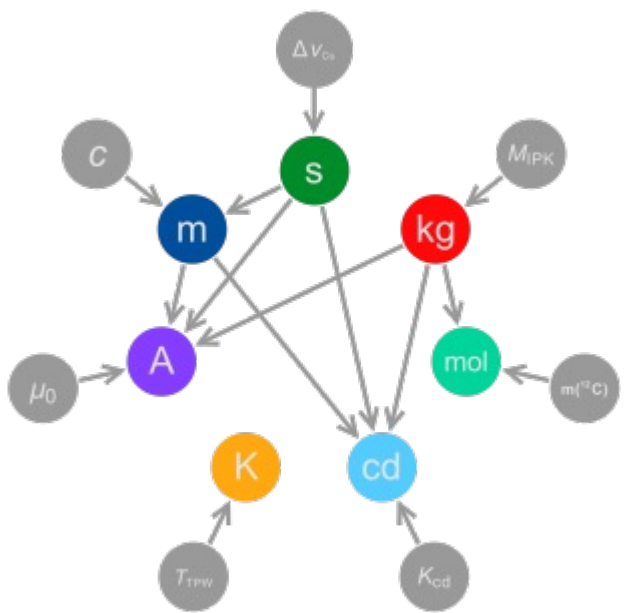
Incertitude relative de diverses mesures physiques

Unité	Constante utilisée comme référence	Symboles	Définition actuelle	Définition proposée
kg	Masse du kilogramme prototype	$m(K)$	exacte	$5,0 \times 10^{-8}$
	Constante de Planck	h	$5,0 \times 10^{-8}$	exacte
A	Constante magnétique	μ_0	exacte	$6,9 \times 10^{-10}$
	Charge élémentaire	e	$2,5 \times 10^{-8}$	exact
K	Température du point triple de l'eau	T_{TPW}	exacte	$1,7 \times 10^{-6}$
	Constante de Boltzmann	k	$1,7 \times 10^{-6}$	exacte
mol	Masse molaire du ^{12}C	$M(^{12}\text{C})$	exacte	$1,4 \times 10^{-9}$
	Nombre d'Avogadro	N_A	$1,4 \times 10^{-9}$	exacte



Old SI

New SI



Introduction

Chaleur et température



Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

$$pV = nRT$$

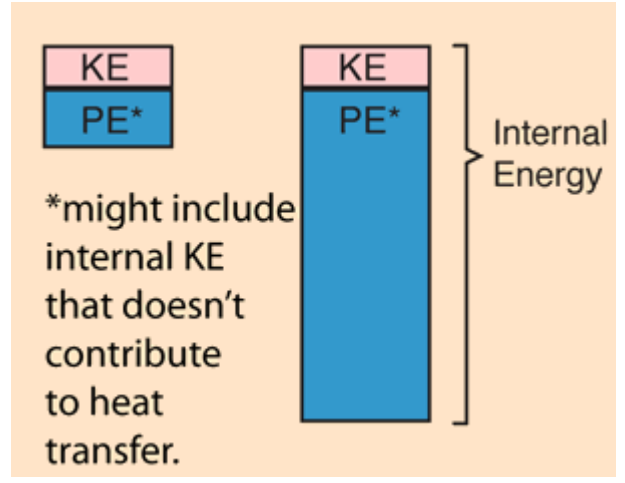
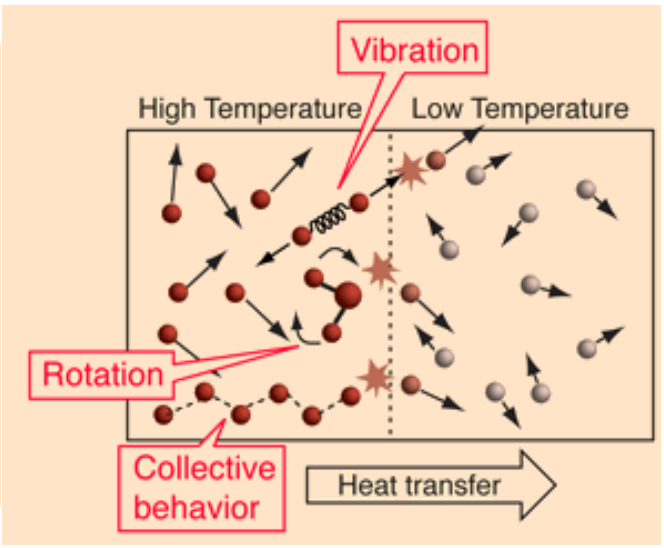
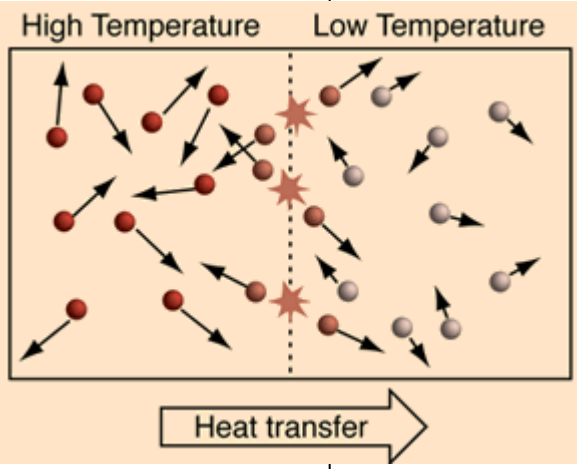
$$k = \frac{R}{N_A}$$

$$pV = NkT$$

Constante de Boltzmann: relie la température d'un corps à son énergie thermique

$$E_{thermique} = kT$$

Définition SI: 1 K est la variation de température qui change l'énergie thermique avec $1,380\ 648\ 8 \times 10^{-23} \text{J}$



Introduction

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

Le transfert de chaleur est la transmission de l'énergie thermique due à une différence spatiale de température.

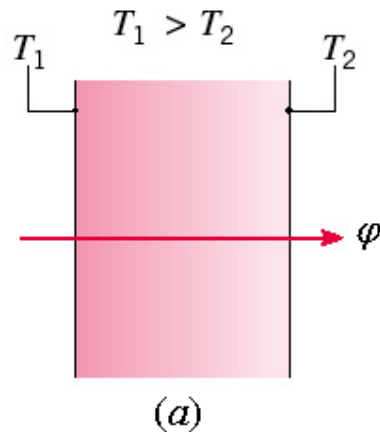
Principes :

0 : température donne une relation d'ordre

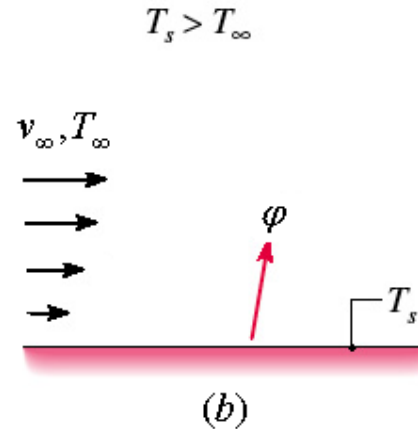
1 : conservation de l'énergie

2 : direction du chaud vers le froid

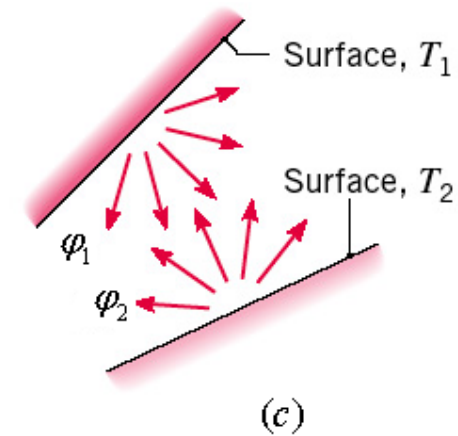
Trois modes de transfert



a) conduction à travers un corps solide ou un fluide sans mouvement



b) convection dans un fluide en mouvement



c) rayonnement entre deux surfaces sans contact

Introduction

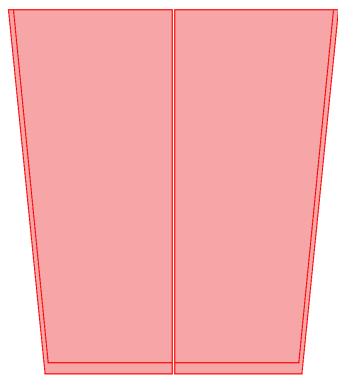
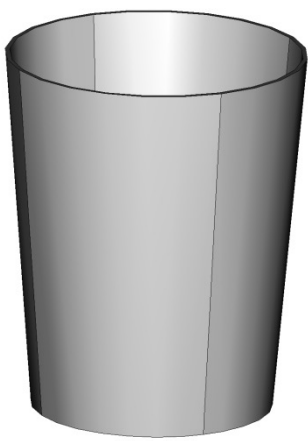
Transfert chaleur

Introduction

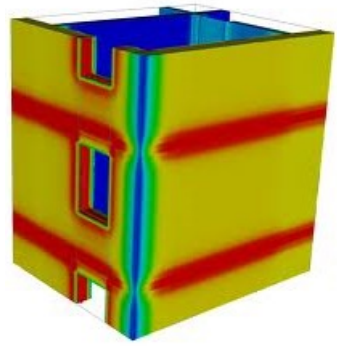
Bilan énergie

Lois constitutives

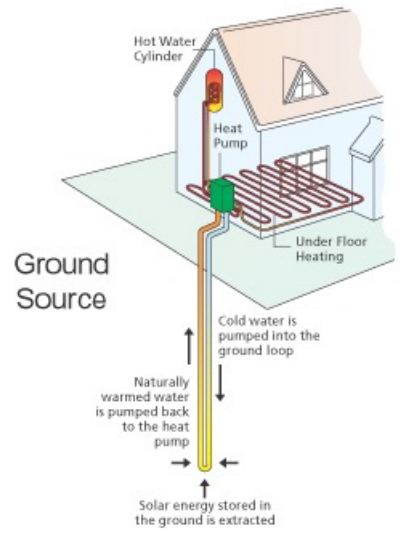
Convection dans un verre d'eau



Ponts thermiques



Puits géothermiques



Climatisation



Introduction

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

Phénomènes de transfert ou de transport

- **transfert de chaleur**
- **transfert de masse**
- **transfert de quantité de mouvement**
- **conduction électrique**

Transfert : phénomènes irréversible de nature statistique

- inhomogénéité d'une grandeur intensive →
transport d'une grandeur physique

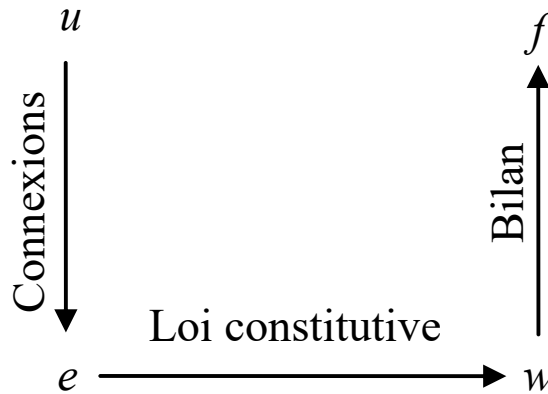
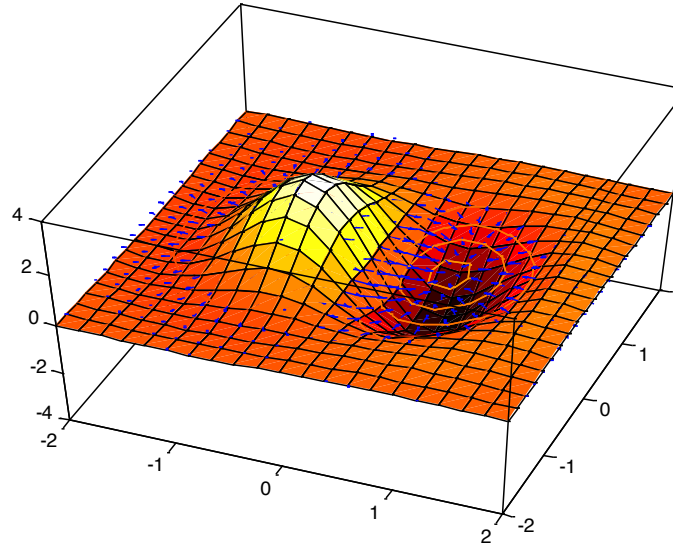
Introduction

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives



u potentiel
 e différence de potentiel
 w flux
 f flux externes

Introduction

Bilan d'énergie thermique

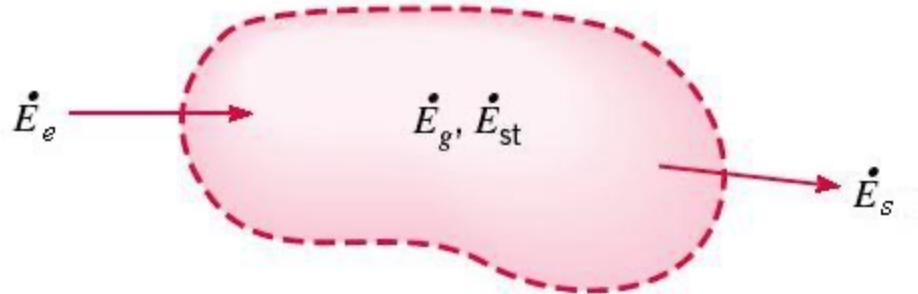
Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

- **Bilan d'énergie**



Conservation de l'énergie pour un volume de contrôle

$$\Delta E_{st} = E_e - E_s + E_g$$

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \dot{E}_e - \dot{E}_s + \dot{E}_g$$

Introduction

Bilan d'énergie thermique

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

- **Phénomènes de volume**

- Chaleur sensible $Q = mc(\theta_2 - \theta_1)$

- Chaleur latente $Q = m\lambda$

- Energie générée : thermique \Leftrightarrow autre forme

- **Phénomènes de surface**

- Energie qui entre

- Energie qui sort

Introduction

Bilan d'énergie thermique

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

- **Energie / quantité de chaleur** Q [J]

- **Flux d'énergie / flux de chaleur** \dot{Q}, q, Φ [W]

- **Densité de flux** $\varphi \equiv \frac{d\Phi}{dS}$ [W/m²]

Introduction

Lois constitutives

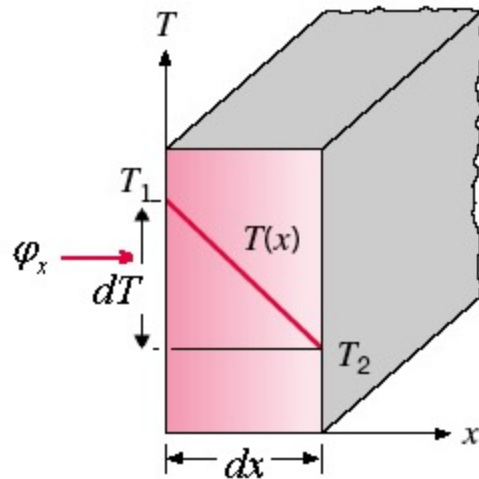
Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

- Conduction : loi de Fourier



$$\varphi_n = -\lambda \frac{d\theta}{dx}$$

Valeurs typiques des propriétés des matériaux (Lefebvre, 1994)

Matériau	Masse volumique, ρ [kg · m ⁻³]	Capacité thermique massique, c [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	Conductivité thermique, λ [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
Isolants	50 à 200	700	0.004
Bois	500	1250	0.2
Verre	1000	1000	1.2
Béton	1000 à 2000	1000	1.7
Pierre	2000	1000	2.0

Introduction

Lois constitutives

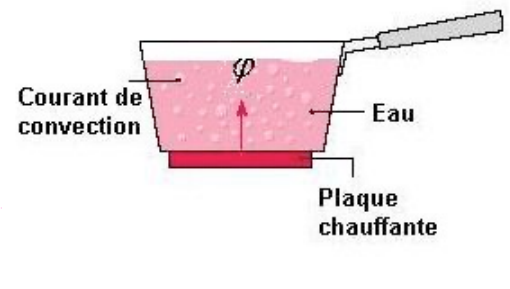
Transfert chaleur

Introduction

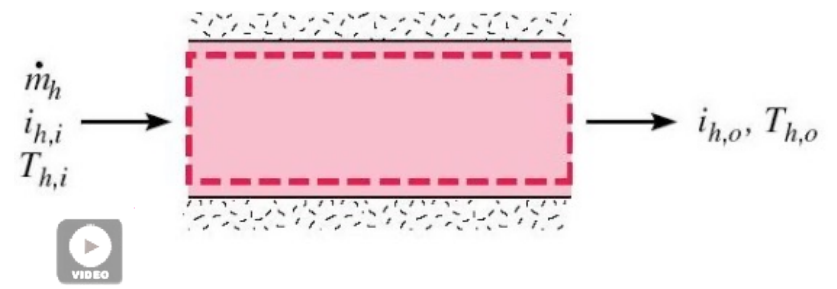
Bilan énergie

Lois constitutives

- Convection :



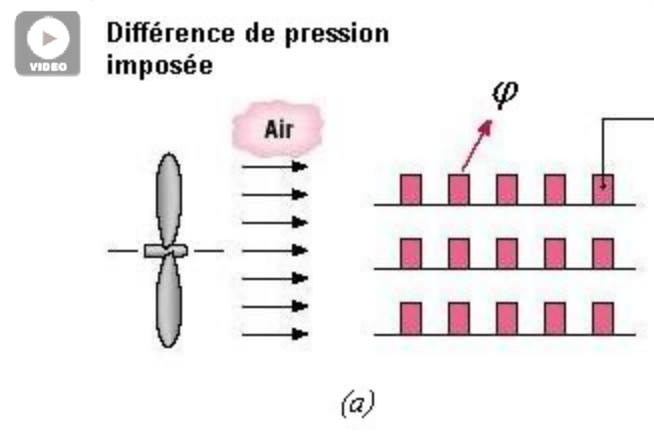
(a) convection



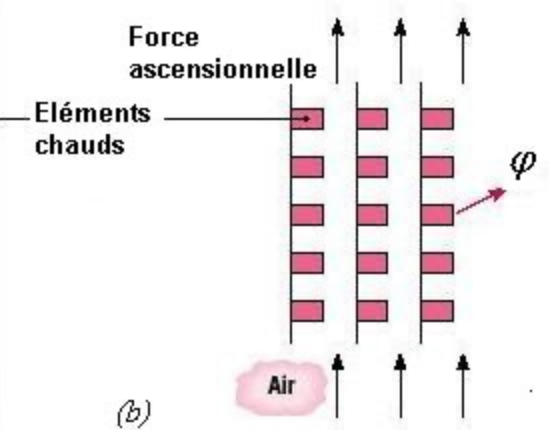
(b) advection

Lois Newton $\varphi = h_c (T_S - T_\infty)$

$$\dot{Q} = \dot{m}_h c_p (T_{h,o} - T_{h,i})$$



(a)



(b)

Transfert de chaleur sensible par convection entre un fluide et une surface :
 a) convection forcée ; b) convection naturelle.

Introduction

Lois constitutives

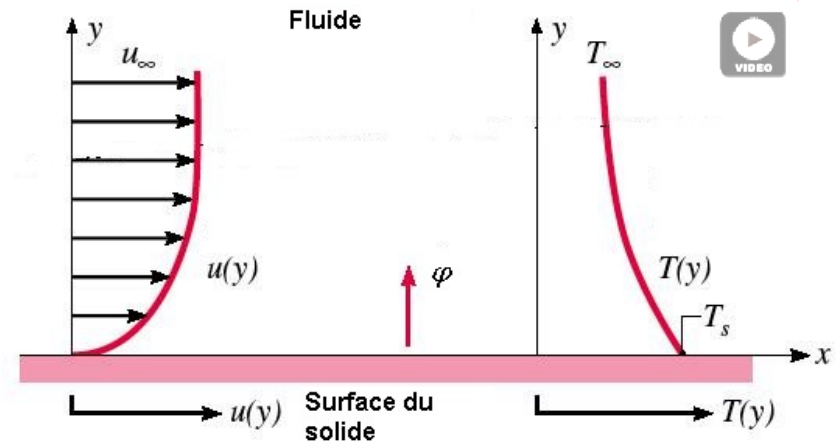
Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

• Convection



Valeurs typiques du coefficient d'échange convectif (Incropera et al. 2007)

Type de convection

Coefficient d'échange convectif, h_c

$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

Convection naturelle

Gaz

2 à 25

Liquides

50 à 1000

Convection forcée

Gaz

25 à 250

Liquides

100 à 20000

Convection avec changement de phase

2500 à 100000

Introduction

Lois constitutives

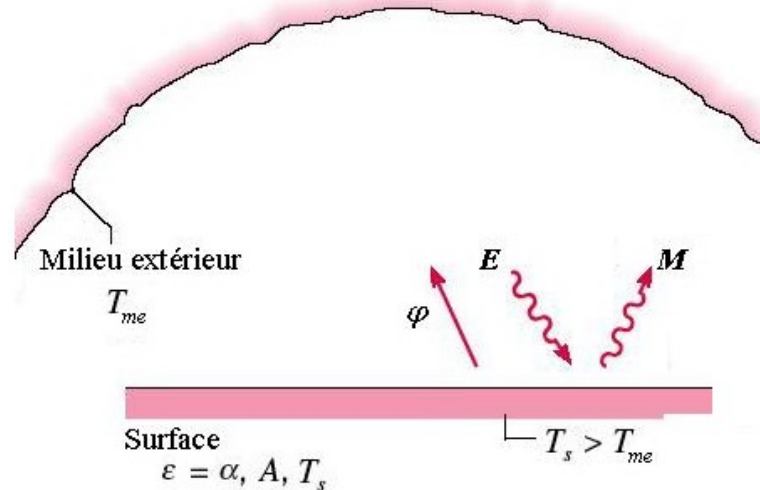
Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

- Rayonnement : loi Stefan-Boltzmann $M^\circ = \sigma T_S^4$



E éclairement
 M émittance ou excitation

émissivité, ε
coefficient d'absorption, α
température, T_s

Valeurs typiques de l'émissivité

Matériau	Emissivité, ε
Aluminium	0.06
Zinc galvanisé	0.20 – 0.30
Bois	0.75 – 0.95
Brique ordinaire	0.93

Introduction

Lois constitutives

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

- **Rayonnement**

$$\varphi_{abs} = \alpha E$$

$$\varphi_{em} \equiv M = \varepsilon \sigma T_S^4$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$$\alpha = \varepsilon$$

$$\varphi = \varphi_{em} - \varphi_{abs} = \varepsilon M^\circ - \alpha E$$

$$= \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_{me}^4)$$

$$\varphi = h_r (T_S - T_{me})$$

$$h_r \equiv \varepsilon \sigma (T_S + T_{me})(T_S^2 + T_{me}^2)$$

Introduction

Lois constitutives

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

- **Rayonnement**

$$T_S \cong T_{me}$$

$$T_S^4 \Big|_{T_S \cong T_{me}} = T_{me}^4 + 4T_{me}^3 (T_S - T_{me})$$

$$T_S^4 - T_{me}^4 = 4T_{me}^3 (T_S - T_{me})$$

$$\varphi = h_r (T_S - T_{me})$$

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T_{me}^3$$

Introduction

Lois constitutives

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

- Convection et rayonnement

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_{cv} + \varphi_r \\ &= h_c (T_S - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_{me}^4)\end{aligned}$$

$$T_S \cong T_{me} \cong T_S$$

$$\varphi = h_t (T_S - T_{me})$$

$$h_t = h_c + h_r$$

Introduction

Lois constitutives

Transfert chaleur

Introduction

Bilan énergie

Lois constitutives

- **Conduction, convection, rayonnement**

Mode	Mécanisme	Loi	Coefficient caractéristique
Conduction	Diffusion	Fourier $\varphi_n = -\lambda \frac{dT}{dx}$	Conductivité thermique λ [W/m · K]
Convection	Diffusion et transport de masse	Newton $\varphi = h_c (T_S - T_\infty)$	Coefficient d'échange convectif h_c [W/m ² · K]
Rayonnement	Ondes électromagnétiques	Dérivée de Stefan-Boltzmann $\varphi = \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_{me}^4)$ $\varphi = h_r (T_S - T_{me})$	Emissivité ε [-] Coefficient d'échange radiatif h_r [W/m ² · K]
Advection	Transport de masse	$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_o - T_i)$	$\dot{m} c_p$