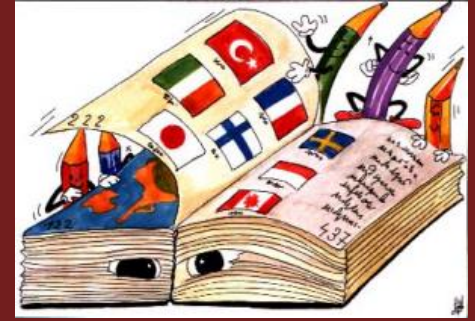


La chaleur et les transferts thermiques

Charles de IZARRA
Professeur des universités
Faculté des Sciences, Site de Bourges,
Université d'Orléans



Le Dictionnaire...



- **Chaleur** n f l. **1.** Température élevée de la matière (par rapport au corps humain); sensation produite par un corps chaud ♦ Température de l'air qui donne à l'organisme une sensation de chaud. **2.** Phénomène physique qui se traduit notamment par l'élévation de la température.

Plan de la présentation

1. Les 3 modes de transferts de chaleur
2. La conduction thermique
3. La convection thermique
4. Les échanges radiatifs
5. Jouer avec les unités

Les 3 modes de transferts de chaleur : petit déjeuner



Passage de la chaleur à travers de la paroi
De la tasse, sans mouvement de matière :

CONDUCTION THERMIQUE

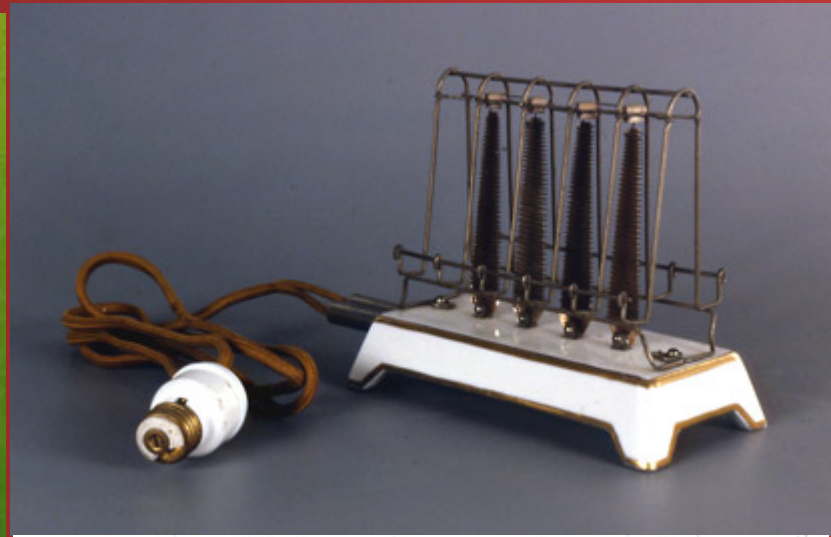


Passage de la chaleur entre la paroi chaude
Et un fluide AVEC mouvement de matière :

CONVECTION THERMIQUE

Convection NATURELLE
Convection FORCEE

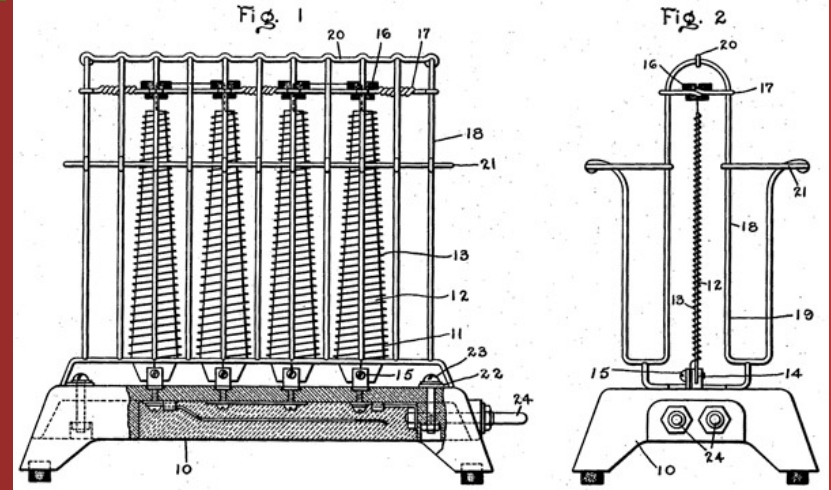
Les 3 modes de transferts de chaleur : suite...



Passage de la chaleur entre la résistance du grille pain et la tartine :

TRANSFERTS de CHALEUR par RAYONNEMENT

TRANSFERTS RADIATIFS

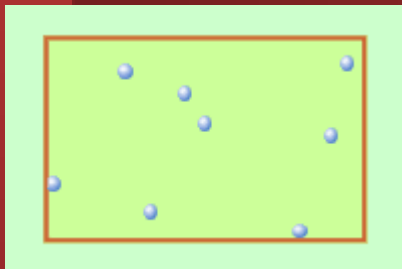


Coexistence des 3 modes de transferts de chaleur

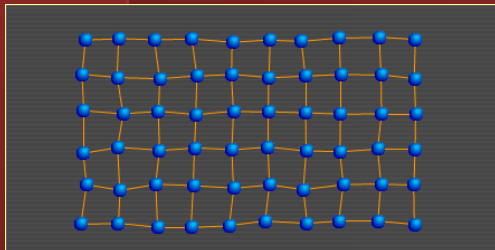


Chauffer... Refroidir au niveau microscopique

- La matière est formée de particules plus ou moins liées :



- Gaz : les atomes ou molécules se déplacent de manière incessante. Chauffer : augmenter la vitesse de ces particules
- Fluides : analogue à un gaz, mais avec des forces entre les particules (eau...)



- Solide : les particules sont fixées dans un réseau, qui peut vibrer. Les vibrations sont d'autant plus grandes que la température est élevée.

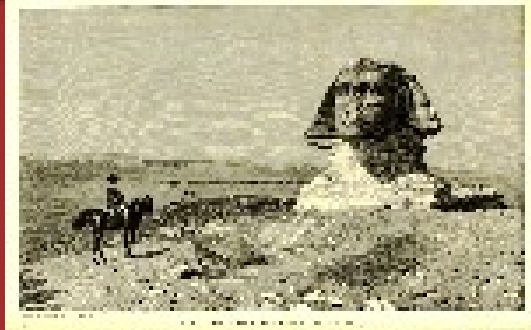
La conduction thermique

Passage de la chaleur à travers
un milieu, sans mouvement de
matière

Historique : Loi de Fourier (1822)



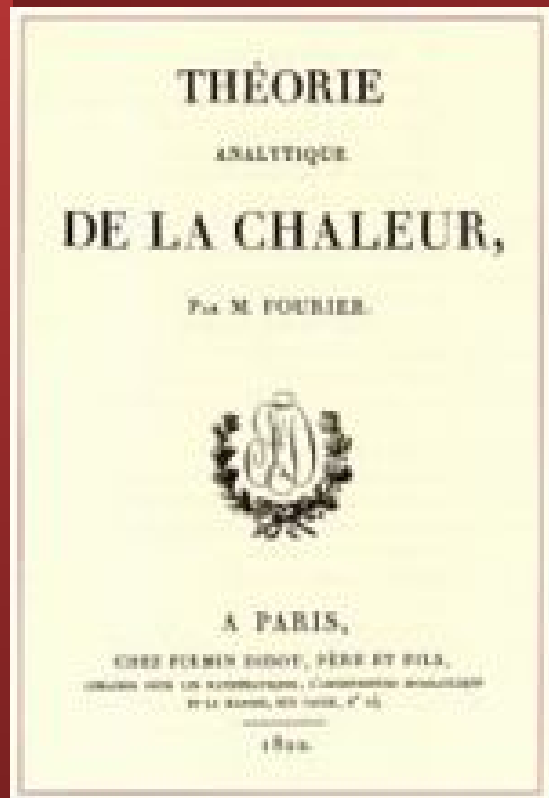
FIGURE 1.4 Baron Jean Baptiste Joseph Fourier (1768–1830). (Photo courtesy *Appl. Mech. Reus.*, vol. 26, Feb 1973.)



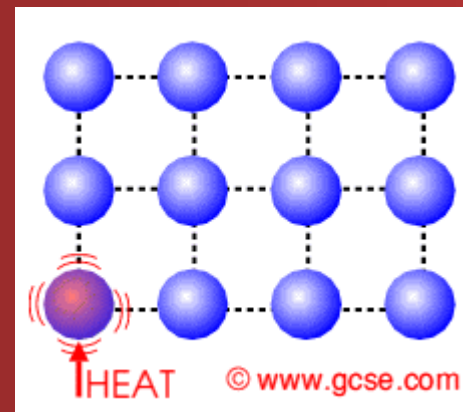
Vie très riche, avec participation à la campagne d'Égypte, préfet de L'Isère

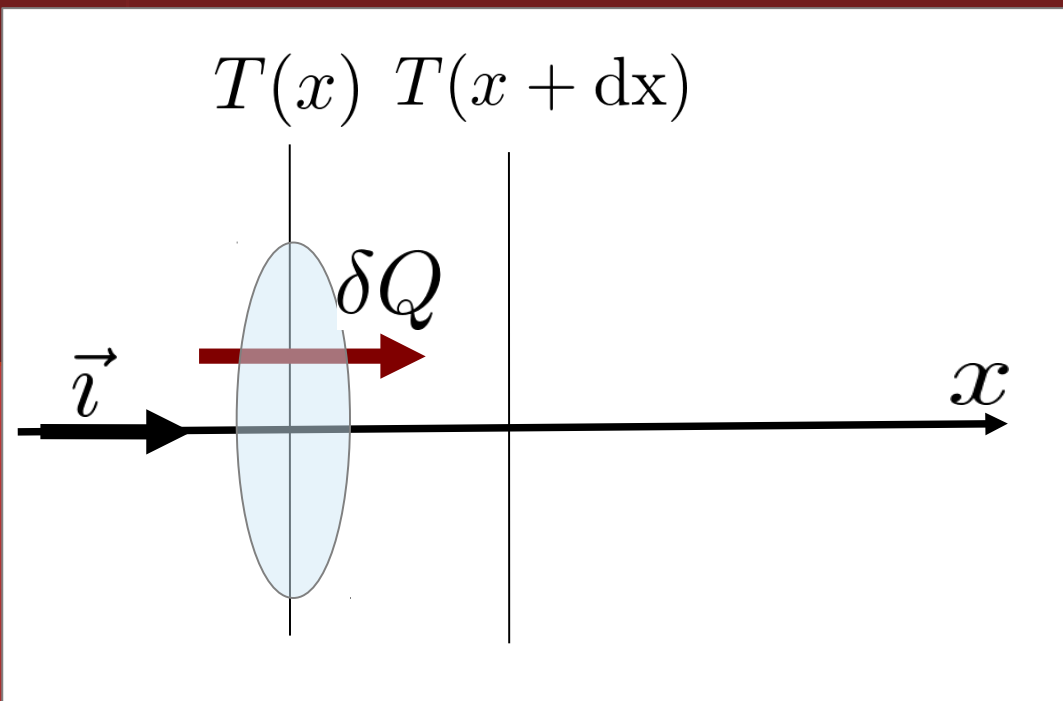
Jean-Baptiste Fourier (21 mars 1768 [Auxerre] - 16 mai 1830 [Paris])

La loi de Fourier et l'équation de la chaleur



Phénomène de diffusion : la chaleur va des zones chaudes vers les zones plus froides





Loi de Fourier :

$$\delta Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dS dt$$

λ Conductibilité thermique en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Conducteurs : 200 SI

Matériaux usuels : 1 SI

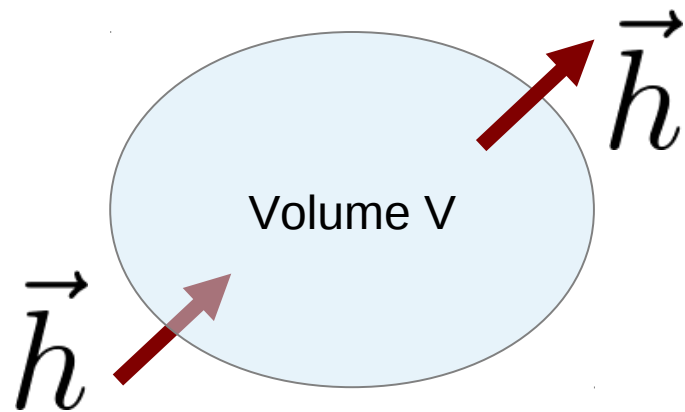
Isolants : 0.01 SI

Généralisation en 3 dimensions :

$$\delta Q = -\lambda \vec{\nabla} T \cdot d\vec{S} dt$$

Vecteur flux de chaleur (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) :

$$\vec{h} = -\lambda \vec{\nabla} T$$



Bilan thermique :

$$-\iint_S \vec{h} \cdot d\vec{S} dt = -\iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{h} dV dt$$

$$= -\iiint_V \vec{\nabla} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T) dV dt$$

$$= \iiint_V \lambda \Delta T dV dt$$

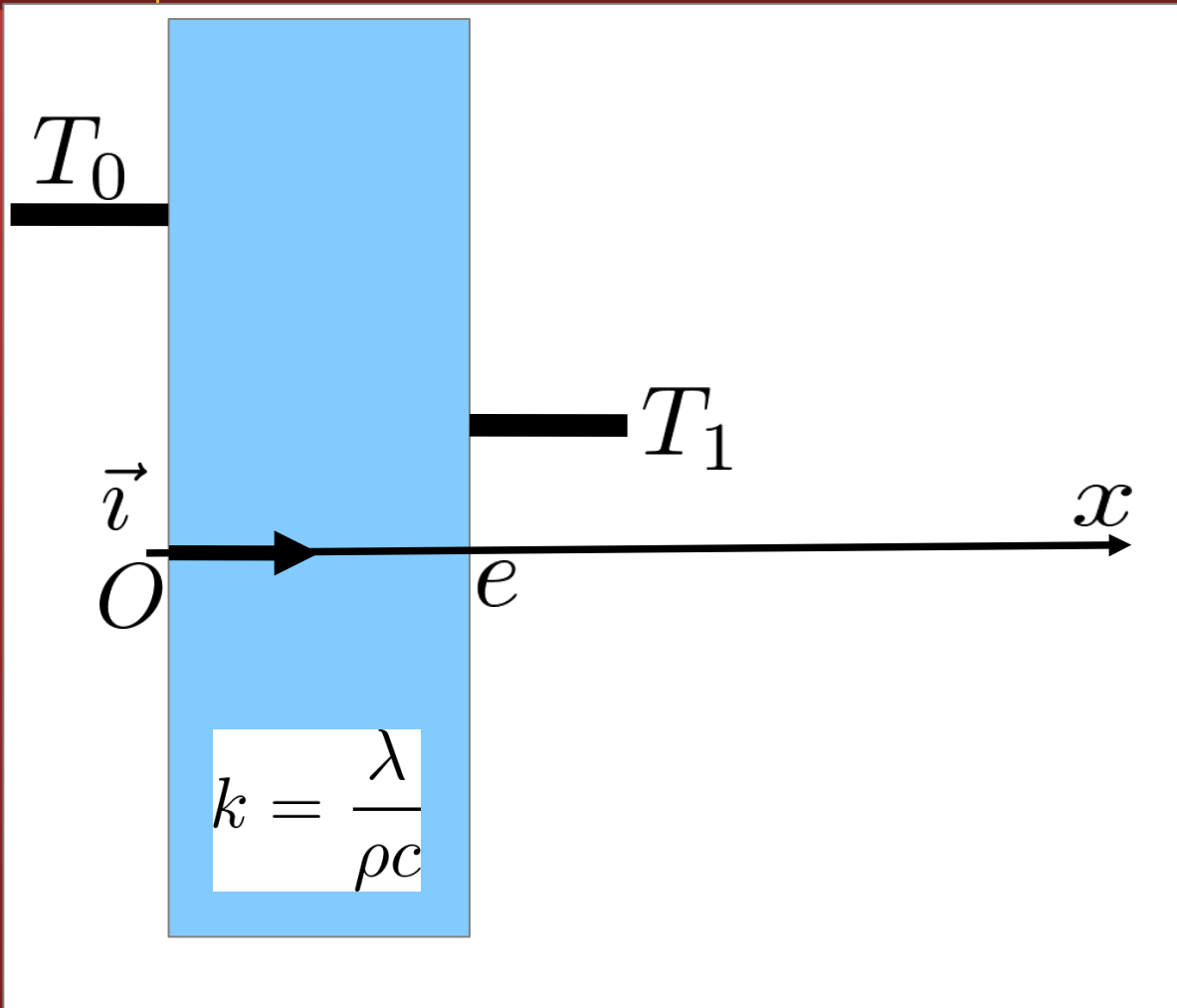
Equation de la calorimétrie :

$$\delta Q = mc\delta T \quad \delta Q = \iiint_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dt dV$$

Equation de la chaleur : $\frac{\lambda}{\rho c} \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t}$ $k = \frac{\lambda}{\rho c}$ (m^2/s)

Diffusivité thermique

Le problème du mur



Hypothèse :
régime permanent atteint.

$$\frac{\lambda}{\rho c} \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\Delta T = 0 \quad \frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

$$T(x) = \frac{T_1 - T_0}{e} x + T_0$$

$$\vec{h} = -\lambda \frac{T_1 - T_0}{e} \vec{i}$$

L'effusivité thermique

$$\alpha = \sqrt{\lambda \rho c}$$

Peau à 37°C

Bloc de métal à 20°C

Peau à 37°C

Bloc de bois à 20°C

Le matériau ayant la plus grande effusivité impose sa température au niveau du contact entre les deux matériaux.

Effusivité thermique de la peau : 1800 SI

Effusivité thermique de l'acier : 14000 SI

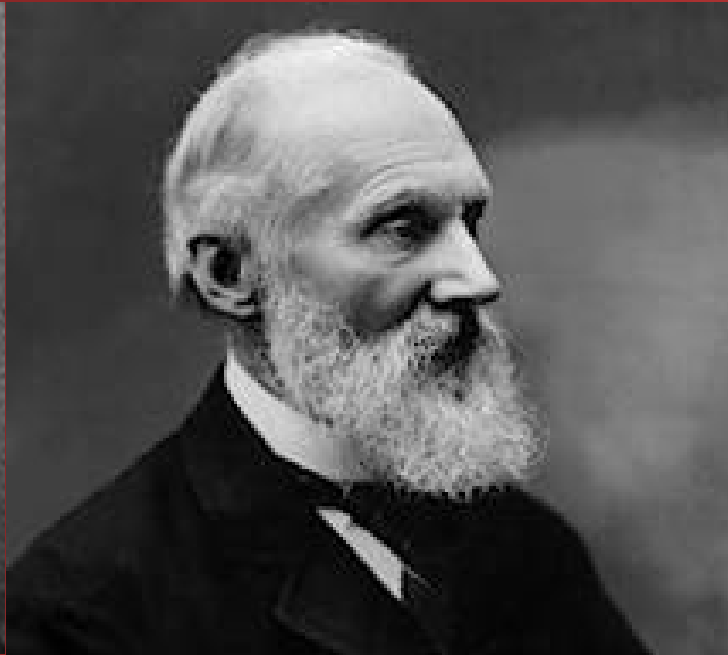
Effusivité thermique du bois : 400 SI

Température contact main/acier : 21,9°C

Température contact main/bois : 33,9 °C



Détermination de l'âge de la Terre par Lord Kelvin



Kelvin sir William Thomson
Mathématicien et physicien britannique (Belfast, 1824 - Netherhall, 1907)

« Père » de la thermodynamique.

La Terre : boule qui se refroidit depuis sa formation

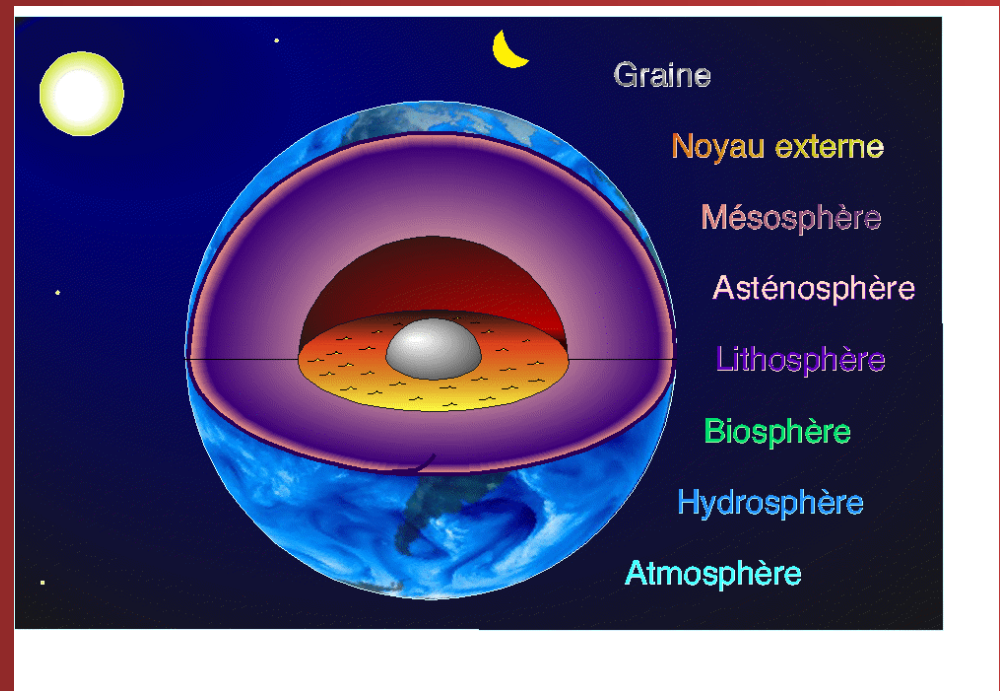
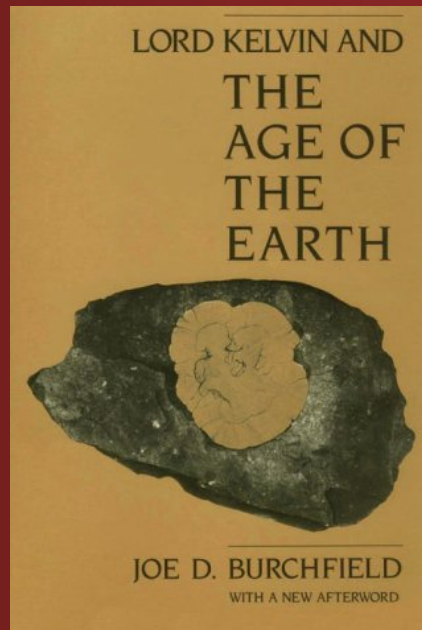


Les mesures faites sur l'écorce terrestre montrent que la température augmente de 37°C par kilomètre.

Modèle mathématique de refroidissement d'une boule : très classique

Résultat proposé par Kelvin : 100 millions d'années

Kelvin ne connaissait pas la radioactivité découverte par H. Becquerel en 1896...



Les hypothèses de Kelvin sont fausses, car il ne tient pas compte du phénomène de chauffage interne causé par les réactions nucléaires (uranium, radium...), et néglige la CONVECTION thermique.

Âge de la Terre « corrigé » (1953 & 1970) : 4,55 milliards d'années

Autres domaines

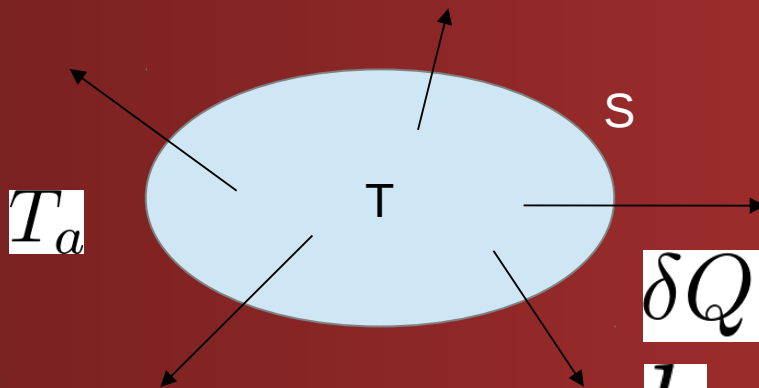
- À quelle profondeur faut-il placer les canalisations pour éviter le gel ?
- Calculs des portes coupe-feux
- Isolation des bâtiments
- ...

La convection thermique

Passage de la chaleur d'une surface vers un fluide AVEC mouvement de matière

Théorie très complexe!

- Couplage de la mécanique des fluides avec la thermodynamique
- Théorie très ancienne (Isaac Newton)
- Touche TOUS les domaines

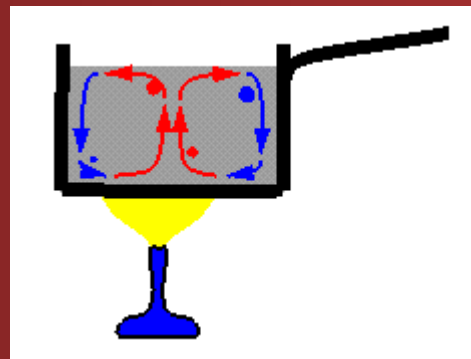
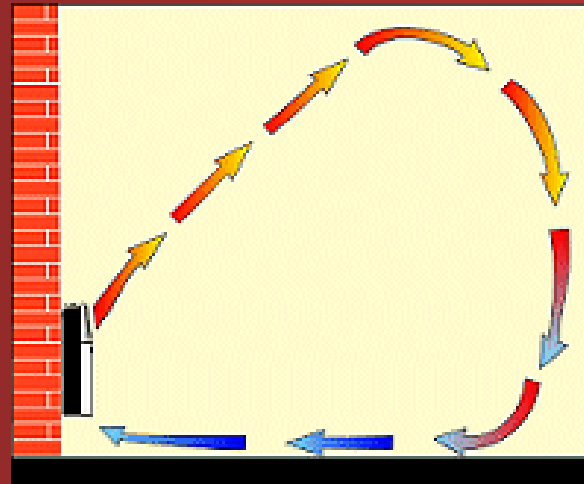
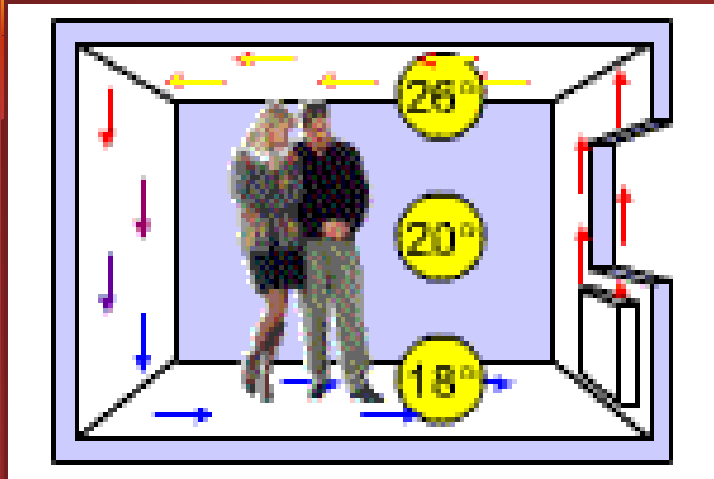


$$\delta Q = hS(T - T_a)dt$$

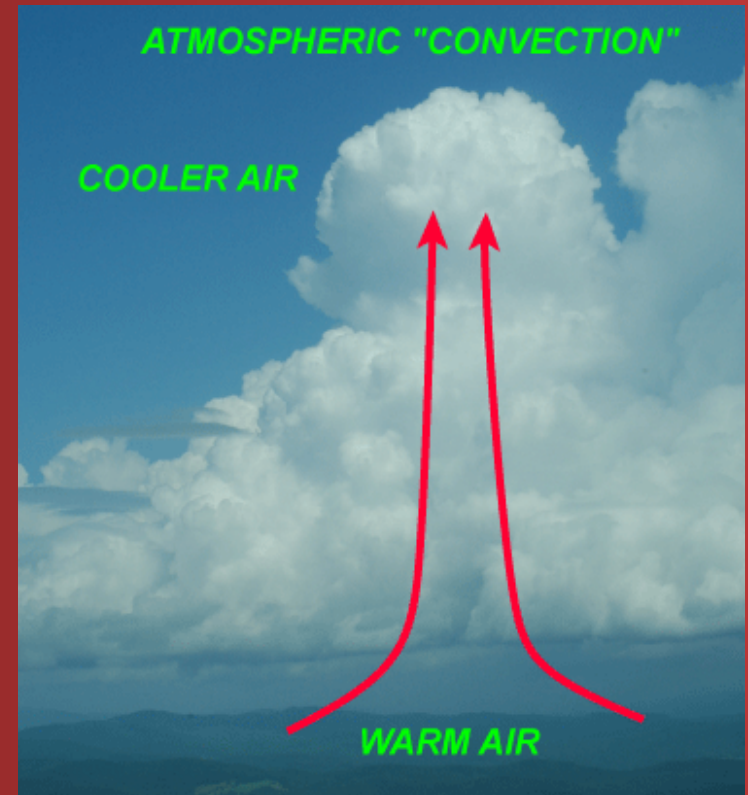
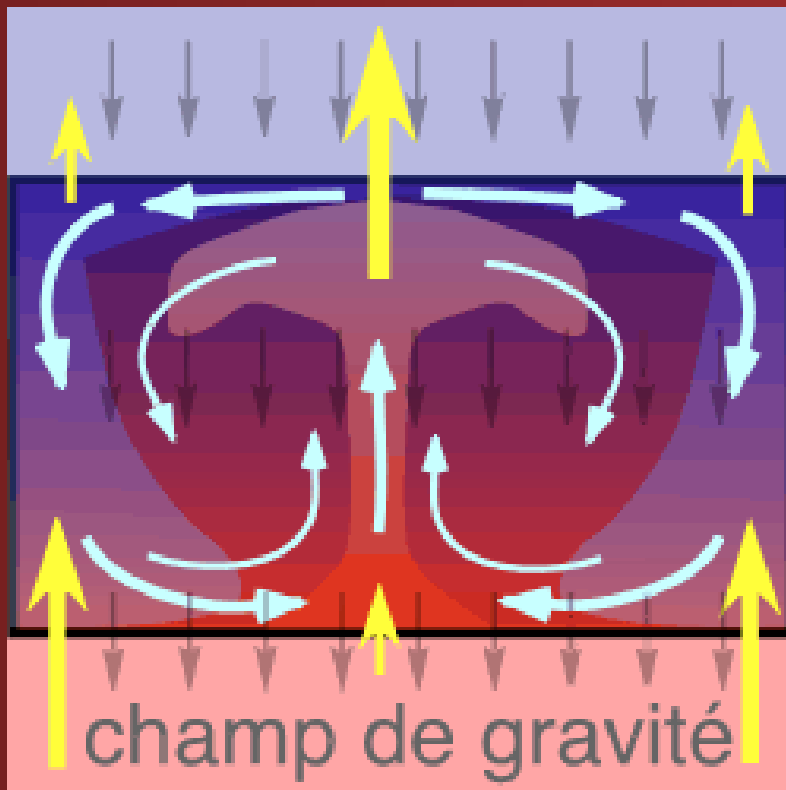
h

Coefficient de convection ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

Exemples de phénomènes convectifs à petite échelle



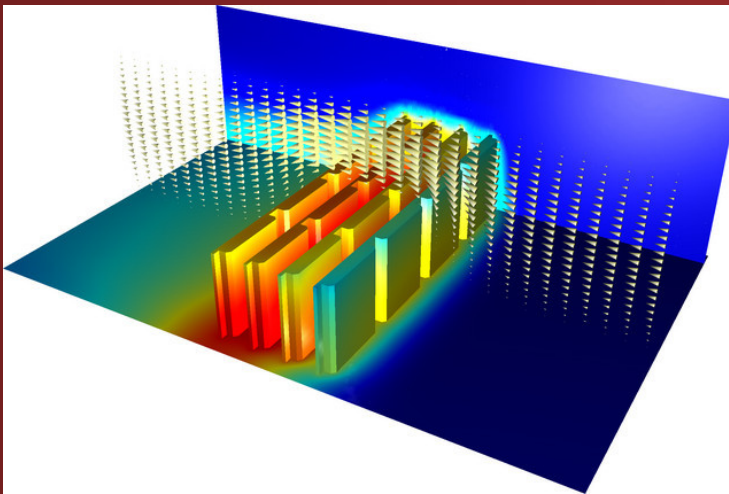
Et à plus grande échelle



Refroidissement par convection forcée



Carte mère d'ordinateur



Domaine de la modélisation numérique
(calculs numériques avec FLUENT...)

Le « freinage » de la Navette Spatiale

Vitesse = 30000 km/h (8 km/s)

Masse 100 tonnes

Energie Cinétique $3 \cdot 10^{12}$ J

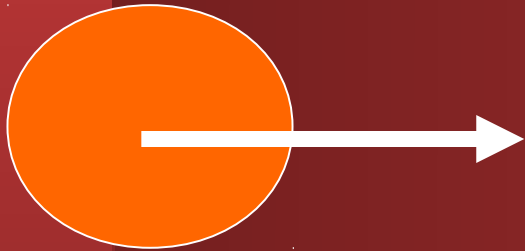


Freinage par convection :
L'air chauffe et vient prendre
De l'énergie à la navette

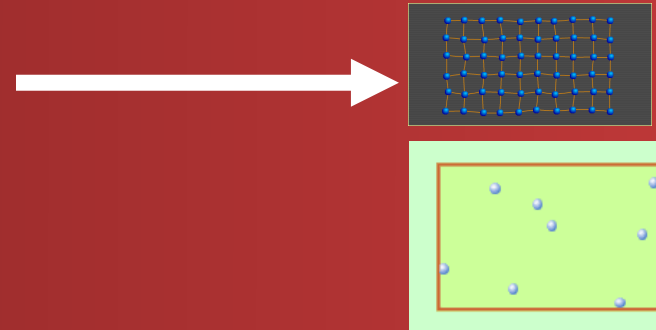
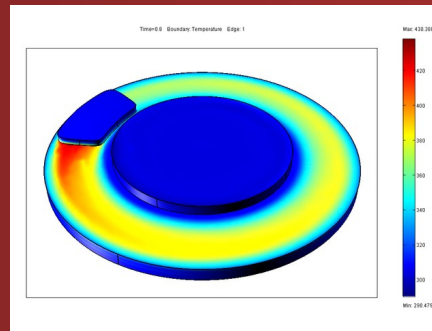


La chaleur est une forme dégradée de l'énergie

Freinage



Toutes les particules de la masse en mouvement vont à la même vitesse. C'est ordonné.



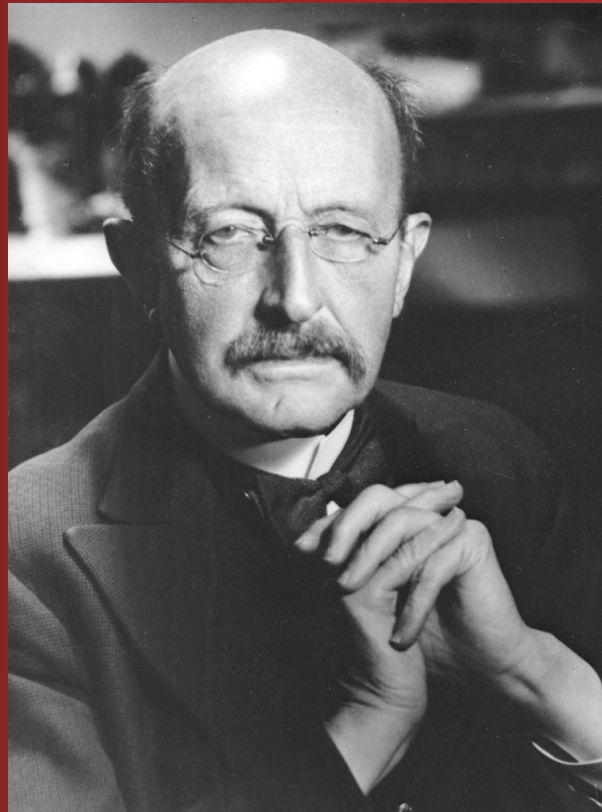
On retrouve toute l'énergie de départ sous forme de chaleur dans le gaz ambiant. C'est désordonné.

Augmentation du désordre, mesuré par l'entropie.

Les transferts radiatifs

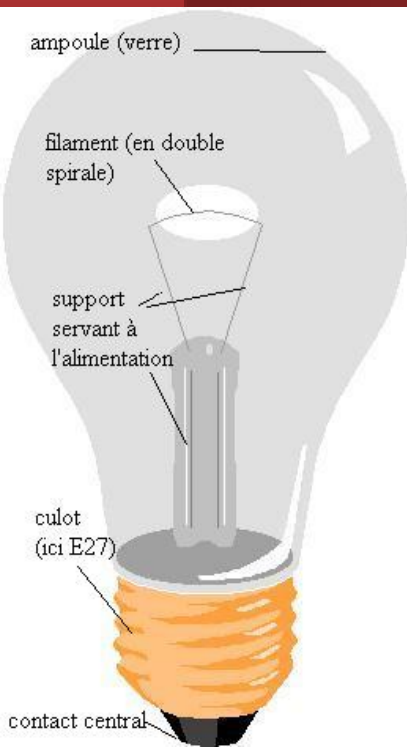
Echange de chaleur par le rayonnement (la lumière et les ondes électromagnétiques).

Théorie charnière entre la « vieille physique » et la physique moderne



Max Karl Ernst Ludwig Planck (23 avril 1858 – 4 octobre 1947).
Physicien allemand, prix Nobel de physique 1918.

Un corps chauffé émet de la lumière



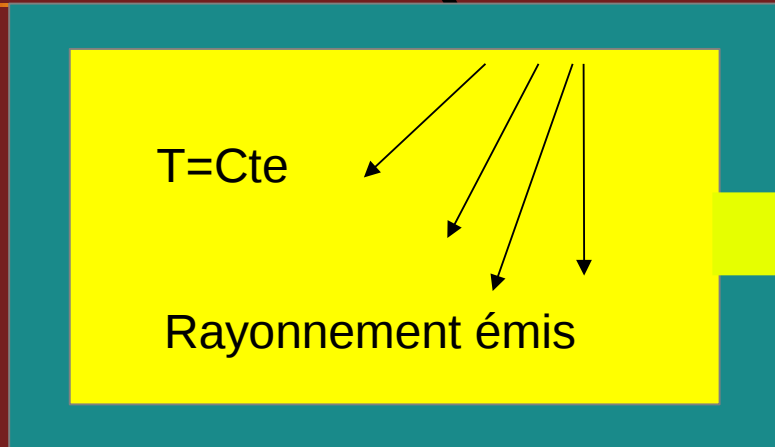
Le modèle du corps noir

Corps noir : corps qui absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit en gardant une température T constante

XIX^{ème} siècle : expériences faites avec la lumière du Soleil

Actuellement, un corps noir est un four (cavité) dont la température est régulée.

Emitance spectrale d'un corps noir (loi de Planck)



$$M_{\lambda}^0 \quad (W.m^{-2}.\mu m^{-1})$$

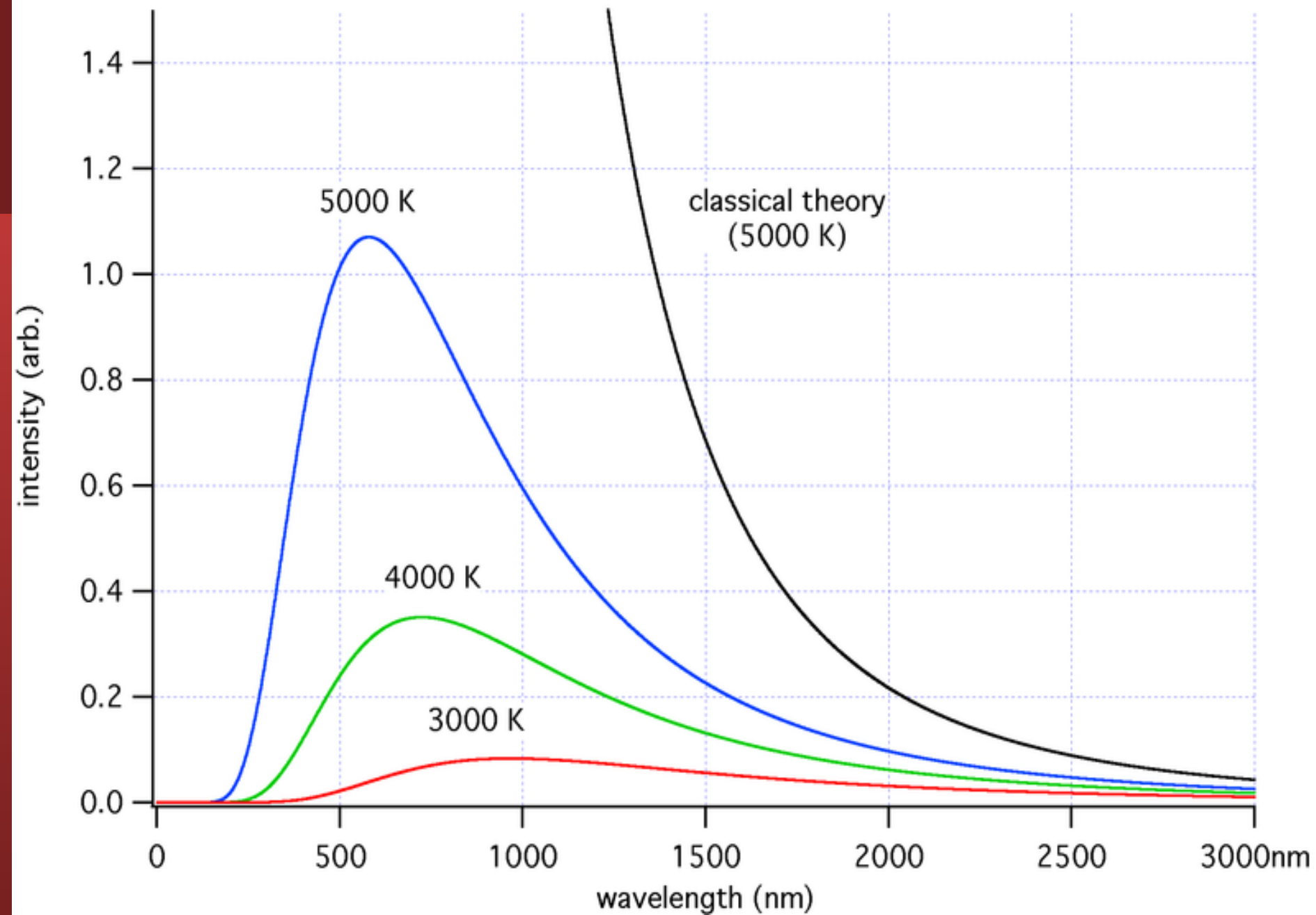
$$M_{\lambda}^0 = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

h : constante de Planck

k : constante de Boltzmann

c : célérité de la lumière dans le vide

T : température en Kelvin



Loi de Wien

$$\lambda_{max}T = 2897 \mu\text{m.K}$$

Applications :

Mesures de températures

Astrophysique

Rayonnement fossile à 3 Kelvin

Loi de Stefan-Boltzmann

Le calcul de l'émittance totale est donné par l'intégrale de l'émittance spectrale, sur toutes les longueurs d'ondes

$$M^0 = \int_0^{\infty} M_{\lambda}^0 d\lambda \quad (\text{W.m}^{-2})$$

$$M^0 = \int_0^{\infty} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} d\lambda$$

$$M^0 = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.6710^{-8} SI$$

Constante de Stefan

Corps humain (37°C)

On considère un corps humain avec une surface de peau de 1 m², à la température de 37°C=310 K

Emission maximale (loi de Wien) :

$$\lambda_{max} = \frac{2897}{310} = 9.3\mu m$$

Puissance totale émise (loi de Stefan-Boltzmann) :

$$P = SM^0 = S\sigma T^4 = 520W$$

Ampoules à incandescence

Titre du document / Document title

Température du filament d'une lampe à incandescence et pyrométrie optique

Auteur(s) / Author(s)

GITTON Jean-Michel ; DE IZARRA Charles ;

Résumé / Abstract

Dans le cadre des échanges entre l'enseignement secondaire et l'enseignement supérieur, nous présentons une activité proposée à des élèves en classe de troisième au cours de laquelle ils mesurent la température du filament d'une

Transferts thermiques en cuisine

(Nombres sans dimension)

Le nombre de Fourier

Deux objets similaires géométriquement seront dans les mêmes conditions thermiques par conduction s'ils ont le même nombre de Fourier

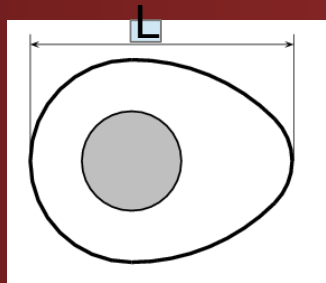
$$F_o = \frac{kt}{L^2}$$

k : diffusivité thermique (en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

t : durée (en s)

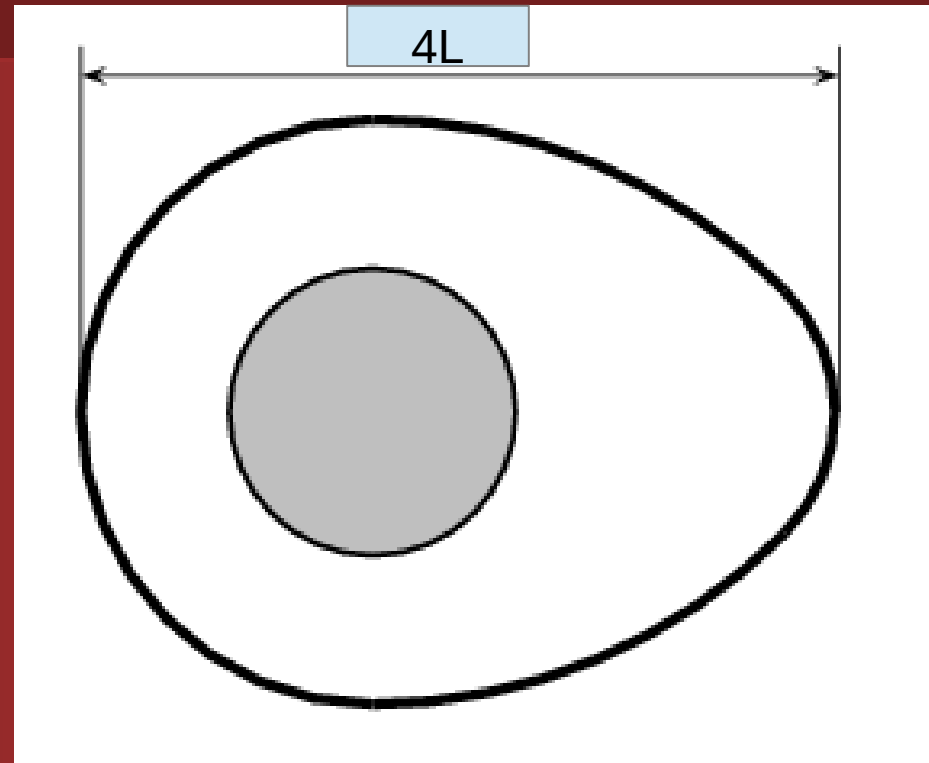
L : une longueur typique de l'objet (en m)

Cuisson d'un œuf d'autruche à la coque



Oeuf de poule : L
Cuisson à la coque : t=3 min

$$F_o = k \frac{3 \text{ min}}{L^2}$$



Oeuf d'autruche : L'=4L
Cuisson à la coque : t'

$$F_o = k \frac{t'}{16L^2}$$

$$t' = 3 \times 16 = 48 \text{ min}$$

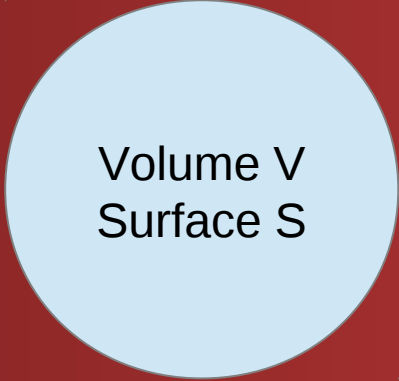
Temps de cuisson

$$t \propto \frac{F_o L^2}{k}$$

La masse M varie selon L^3 .

$$t \propto \frac{F_o M^{2/3}}{k}$$

Durée de refroidissement par convection thermique



Volume V
Surface S

Chaleur contenue dans un corps de volume V :

$$Q_C = \rho c V T$$

Chaleur perdue par convection pendant la durée t :

$$Q_P = h S t T$$

Le corps est refroidi quand $Q_p = Q_C$. Ceci correspond à la durée :

$$t = \frac{\rho c V}{h S}$$

$$t = \frac{\rho c V}{h S}$$

$$t = \frac{\rho c L}{h}$$

Soupe chaude dans une soupière de diamètre L



Soupe chaude dans bol de diamètre L/2

$$t = \frac{\rho c L}{h}$$

$$t' = \frac{\rho c L/2}{h}$$

Et de nombreux exemples...

- ✓ Refroidissement des grandes maisons face aux petites.
- ✓ Eteindre un feu.
- ✓ Transport des surgelés : penser à bien remplir ses sacs « isothermes ».
- ✓ Les éléphants ont de grandes oreilles.
- ✓

Merci.