

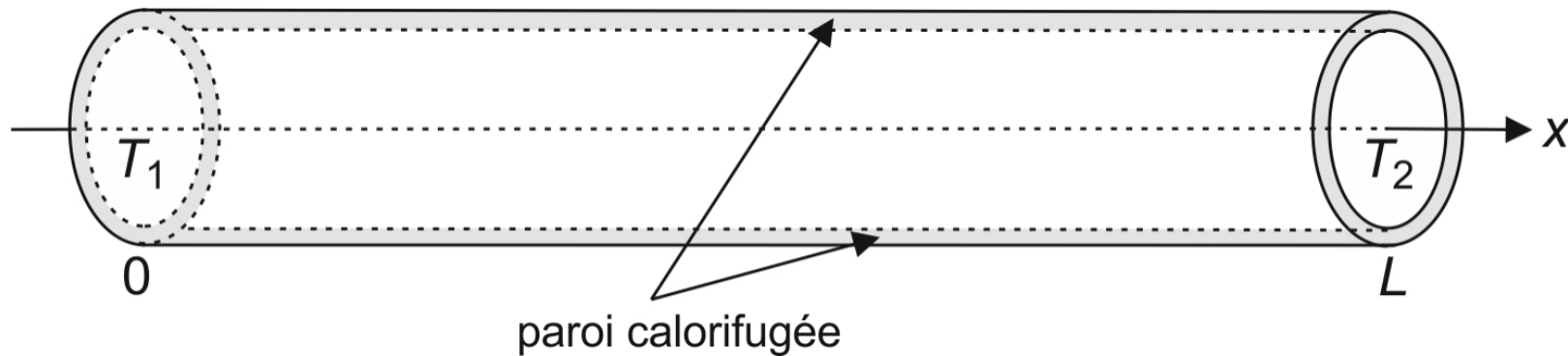
# 1. FLUX THERMIQUES

## 1.1 Système hors équilibre

équilibre thermodynamique  $\Rightarrow$

- les paramètres d'état d'un système  $\Sigma$  ne dépendent pas du temps (état stationnaire)
- les paramètres d'état *intensifs* ( $p, T...$ ) sont **uniformes**

exemple de régime stationnaire thermique  $\neq$  équilibre :



on impose  $\forall t : T(x=0, t) = T_1$  et  $T(x=L, t) = T_2 < T_1$

$\Rightarrow$  après un régime transitoire,  $T(x, t)$  : régime stationnaire mais pas équilibre thermodynamique

## 1.2 Densité volumique de courants thermiques

on définit  $\vec{J}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) tel que  $\delta^3 Q = \vec{J} \cdot d^2 \mathcal{S} dt$

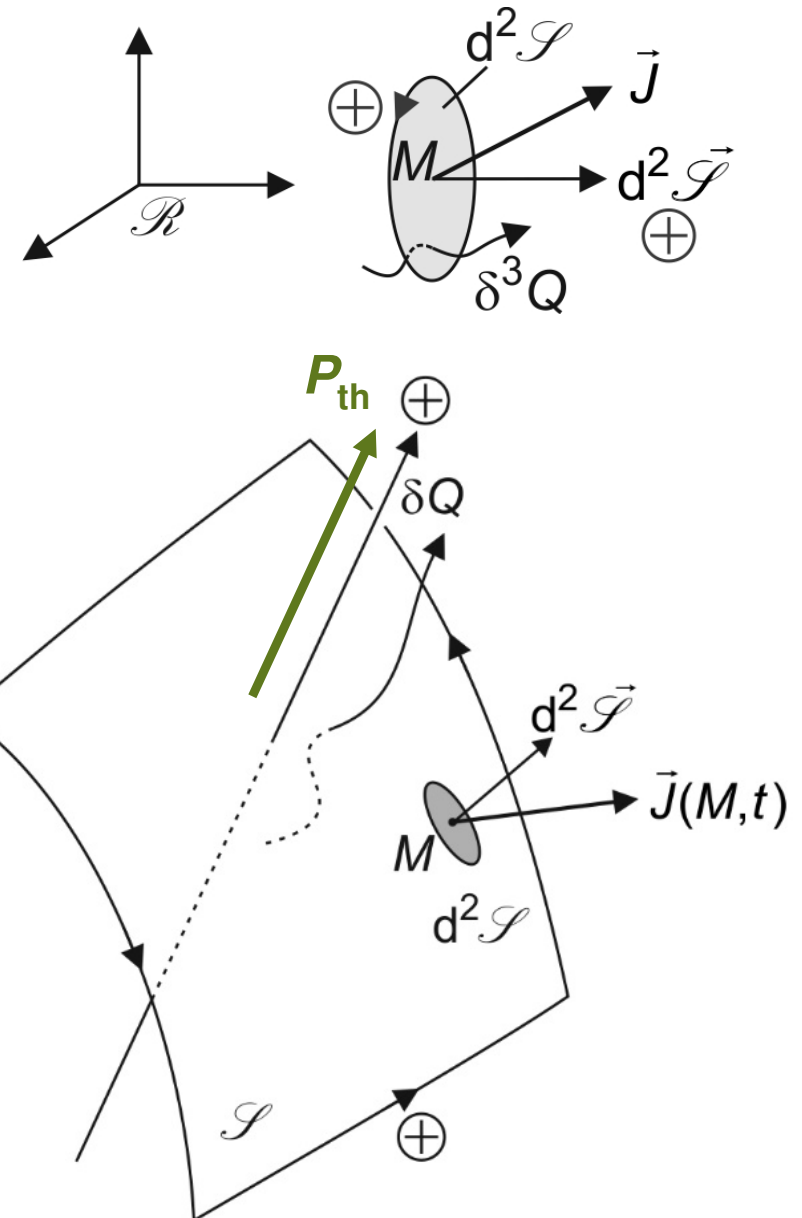
$d^2 \mathcal{S}$  est donc traversée par la puissance ("flux")

$$\text{élémentaire } d^2 P_{\text{th}} = d^2 \Phi = \frac{\delta^3 Q}{dt} = \vec{J} \cdot d^2 \mathcal{S}$$

$$\Rightarrow \underbrace{\Phi = P_{\text{th}}}_{\text{en W}} = \frac{\delta Q}{dt} = \iint_{\mathcal{S}} \vec{J} \cdot d^2 \mathcal{S}$$

trois modes de transfert :

- diffusif :  $\vec{J}_d$
- convectif :  $\vec{J}_c$
- radiatif :  $\vec{J}_r$



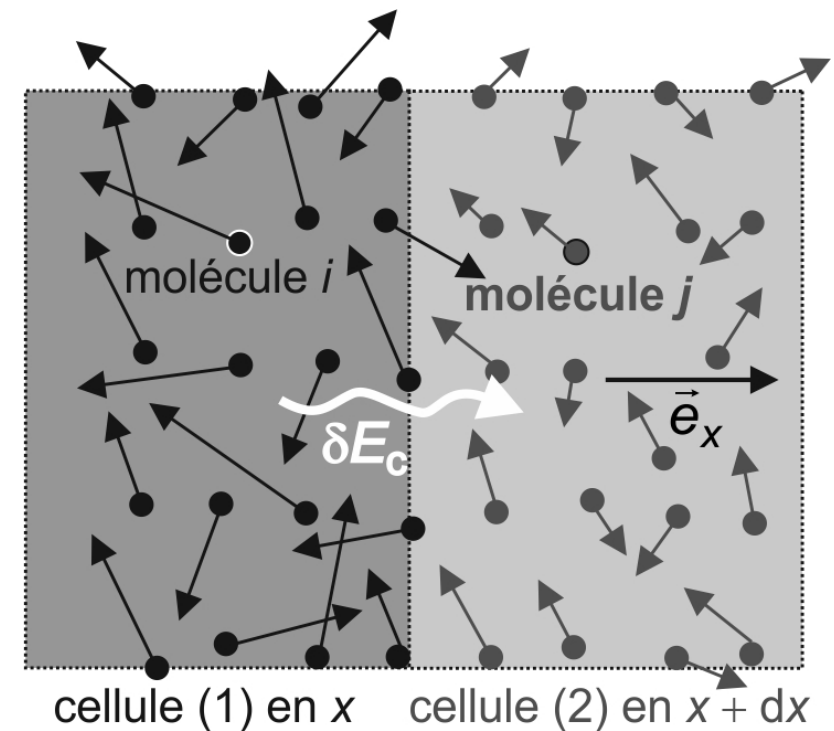
## 1.3 Conduction (diffusion) thermique / loi de Fourier

conduction thermique :

- nécessite un support matériel
- se produit dans *tous* les corps dès que la température n'est pas uniforme
- c'est un transport d'énergie cinétique de proche en proche entre particule microscopiques, **sans mouvement macroscopique**

exemple : barre calorifugée d'un matériau solide ; on porte la moitié gauche à  $T_1$  et la droite à  $T_2 < T_1$

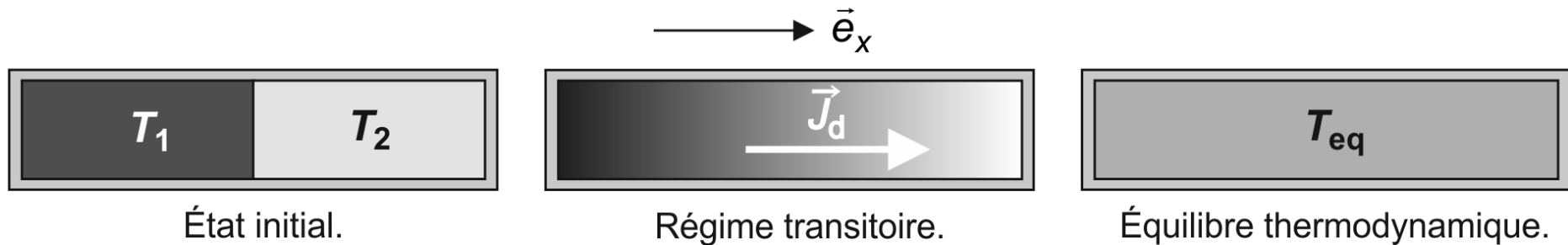
⇒ initialement les molécules à gauche vibrent autour de leur position moyenne avec  $E_{c1} > E_{c2}$ , énergie cinétique des molécules de droite  
 ⇒ par chocs à l'interface, celles de la moitié gauche perdent de l'énergie cinétique au profit de celles de la moitié droite  
 ⇒ ce processus se reproduit de proche en proche, avec transport d'énergie cinétique des zones de forte température vers les zones de basse température : ici de la gauche vers la droite



$T(x,t) > T(x + dx,t) \Rightarrow$  transfert de  $E_c$  dans le sens  $x \uparrow$

$\vec{J}_d$  est donc dirigé des hautes vers les basses températures

après le régime transitoire, on obtient un équilibre thermodynamique avec  $T_2 < T_{eq} < T_1$



loi de Fourier :  $\vec{J}_d = -\lambda \vec{\text{grad}} T$

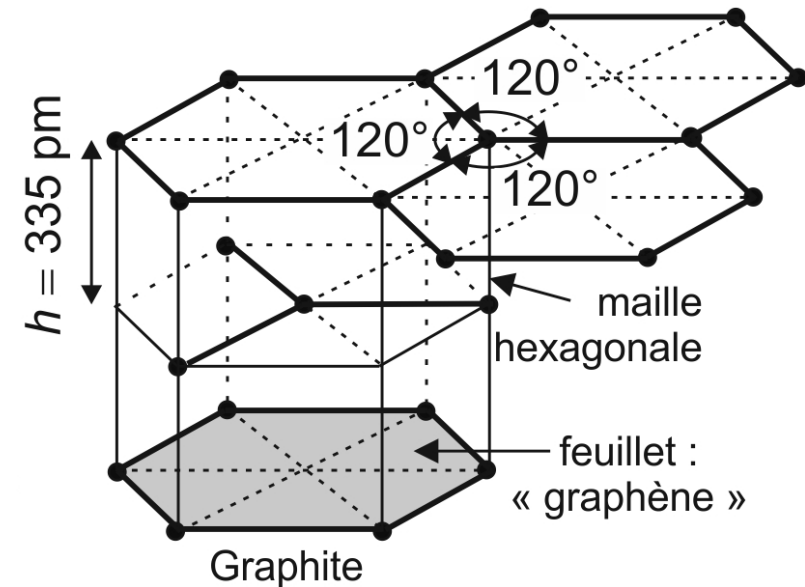
$\lambda \geq 0$  conductivité thermique du matériau ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

loi **phénoménologique** (est issue des observations, ne se démontre pas ; n'est pas universelle) en bon accord avec les mesures pour beaucoup de matériaux si le gradient de température n'est pas trop élevé

la loi de Fourier est linéaire : les matériaux pour lesquels elle est bien vérifiée sont des matériaux L.H.I (linéaires, homogènes et isotropes)

graphite : matériau **non** isotrope

- : atome de carbone



loi de Fourier en accord avec les phénomènes observés : transferts thermiques dans la direction où les variations spatiales locales de températures sont les plus intenses, et dans le sens des températures *décroissantes*

exemple à 1D :  $T(x,t)$

$$\vec{J}_d = -\underbrace{\lambda \frac{\partial T}{\partial x}}_{>0} \vec{e}_x \text{ si } T \text{ décroît avec } x$$

$\lambda$  dépend peu de  $p$  et  $T$  (par la suite l'influence de  $T$  est négligée)

valeurs de  $\lambda$  (pour  $p = p^0 = 1 \text{ bar}$  et  $T = 300 \text{ K}$ ) :

		$\lambda \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$
métaux : très bons conducteurs	cuivre	403
	fer	81
solides non métalliques	diamant	2310
	graphite // graphène	2000
	graphite $\perp$ graphène	9,6
	verre	1,0
	bois	0,2
	P.V.C	0,16
liquide	eau	0,6
gaz	air	0,026
isolants thermiques	laine de verre	0,03
	polystyrène expansé	0,04
	brique	0,8

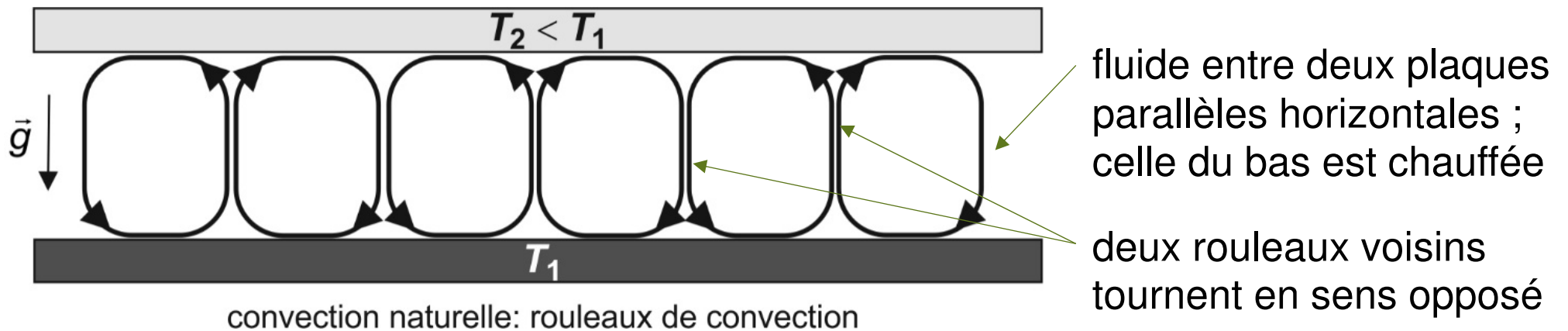
isolants thermiques : souvent des matériaux qui emprisonnent l'air  $\Rightarrow \lambda \approx \lambda_{\text{air}}$

## 1.4 Convection

**solides** : diffusion thermique *pure*

**fluides** : diffusion + convection (transport de  $E_c$  par mouvement *macroscopique*)

l'écoulement peut être dû à des différences de température dans le fluide (convection *naturelle*) ; exemple :



le fluide se réchauffe au contact de la plaque inférieure et devient moins dense que le fluide du dessus

$T_1 - T_2 > \Delta T_{\text{critique}} \Rightarrow$  instabilité de Rayleigh-Bénard : rouleaux de convection

- le fluide chaud subit une poussée d'Archimède de la part du fluide froid qui l'entoure et monte
- le fluide froid, plus dense, descend

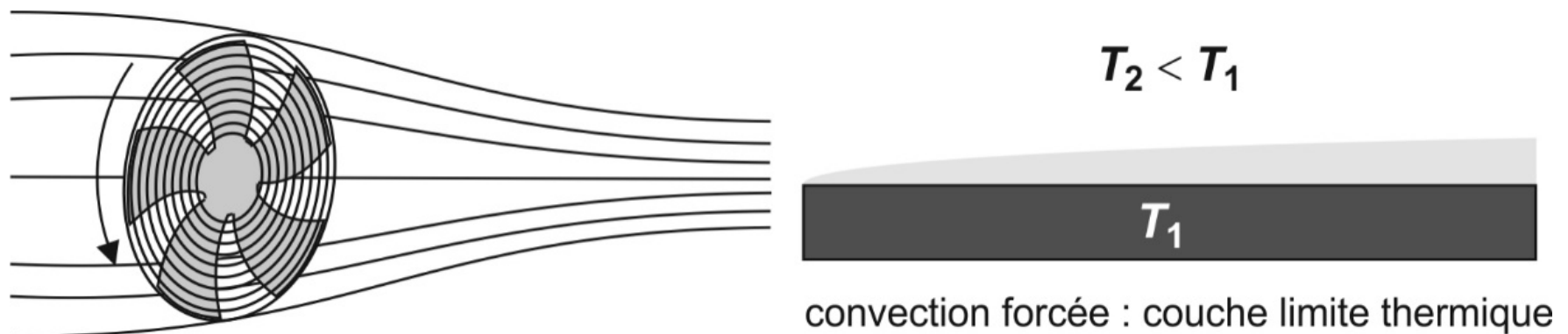
exemple : chauffage d'une pièce avec des radiateurs à eau

les transferts thermiques dus à la convection naturelle sont *beaucoup plus rapides* que ceux dus à la diffusion :  $\tau_c \ll \tau_d$

ce phénomène fait intervenir la gravité et n'existe pas en apesanteur

on augmente la puissance thermique en *imposant* un écoulement : convection *forcée*

exemple : ventilateur d'un ordinateur pour refroidir les composants électroniques

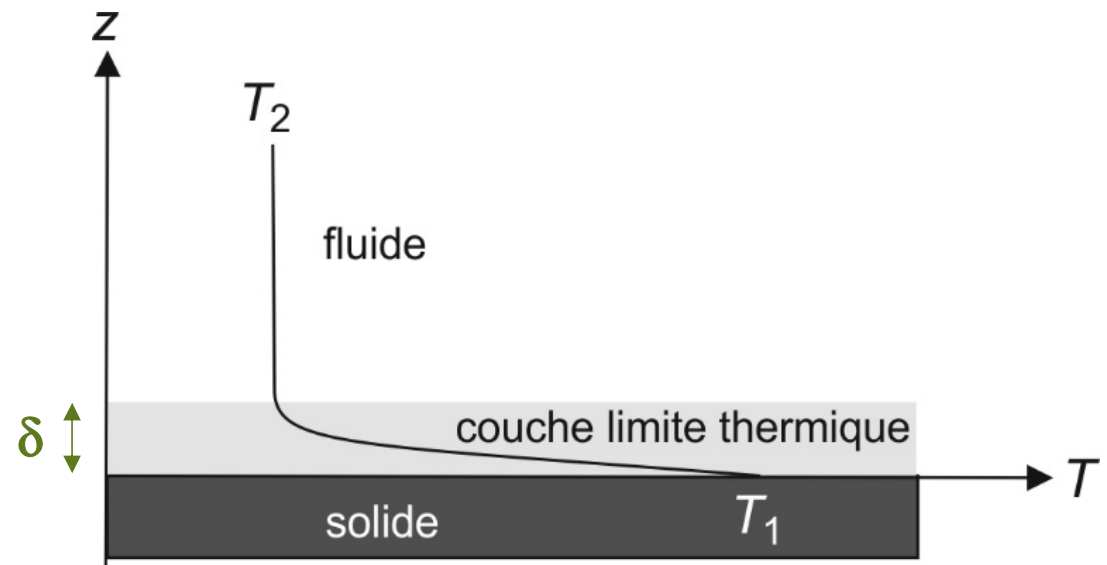




pour un solide de température  $T_1$  placé dans un écoulement fluide (naturel ou forcé) de température  $T_2 \Rightarrow$  transferts thermiques à l'interface

près du solide, la vitesse  $v$  du fluide  $\rightarrow 0$  (adhérence à la paroi)  $\Rightarrow$  transferts thermiques *diffusifs* non négligeables dans une *couche limite thermique*

- hors de la couche limite thermique (de très faible épaisseur  $\delta$ ),  $T \approx T_2$
- dans la couche limite : fort gradient de  $T$  (passe sur une faible distance de  $T_1$  à  $T_2$ )
- $\neq$  couche limite « dynamique » qui existe pour tout écoulement alors qu'il n'y a pas de couche limite thermique si  $T_1 = T_2$



Les transferts thermiques entre le solide et le fluide font intervenir la diffusion **et** la convection : on parle de transport *conducto-convectif* associé au vecteur  $\vec{J}_{cc}$

pour calculer ces transferts il faut les champs de vitesse **et** de température de l'écoulement  $\Rightarrow$  simulations numériques

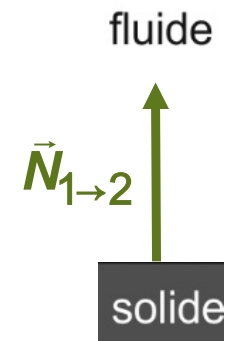
approche phénoménologique : loi de Newton  $\vec{J}_{cc} = h[T_1 - T_2]\vec{N}_{1 \rightarrow 2}$

$h \geq 0$  coefficient de transfert thermique de surface ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$\vec{N}_{1 \rightarrow 2}$  vecteur unitaire normal à l'interface solide / fluide  
dirigé du solide vers le fluide

loi de Newton :

- linéaire
- transferts thermiques normaux à l'interface
- d'autant plus rapides que  $|T_1 - T_2|$  est grande
- dans le sens solide  $\rightarrow$  fluide si  $T_1 - T_2 > 0$ , dans le sens opposé sinon
- bon accord avec les mesures si  $|T_1 - T_2|$  pas trop élevé



convection naturelle :  $h_{(\text{air})} \simeq 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  ;  $h_{(\text{eau})}$  de 100 à 1000  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

convection forcée :  $h_{(\text{air})}$  jusqu'à 500  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  ;  $h_{(\text{eau})}$  jusqu'à 15000  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

## 1.5 Rayonnement thermique

rayonnement *électromagnétique* émis par les atomes qui se dés excitent d'un niveau d'énergie à un niveau plus bas suite à une *excitation thermique*  
se propage donc dans le vide (seul mode de transfert thermique qui existe en l'absence de milieu matériel)

### Complément hors-programme : rayonnement du corps noir

**corps noir** : absorbe tout rayonnement électromagnétique,  $\forall \lambda$  et l'angle d'incidence

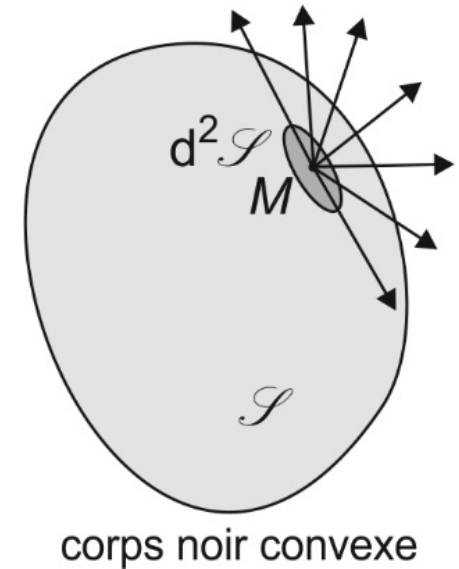
**loi de Planck** pour corps noir de température *de surface*  $T$  (équilibre thermodynamique *local* car la température du corps noir n'est pas nécessairement uniforme) :

$$\underbrace{d\phi_e}_{\text{W}\cdot\text{m}^{-2}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} d\lambda = F(\lambda) d\lambda$$

$h$ ,  $k_B$  et  $c$  constantes de Planck, de Boltzmann, et célérité de la lumière dans le vide

puissance émise par unité de surface,  
dans l'intervalle spectral  $[\lambda, \lambda + d\lambda]$

$\Phi_e$  puissance émise dans un demi espace à partir d'un point  $M$  à la surface du corps noir supposé convexe



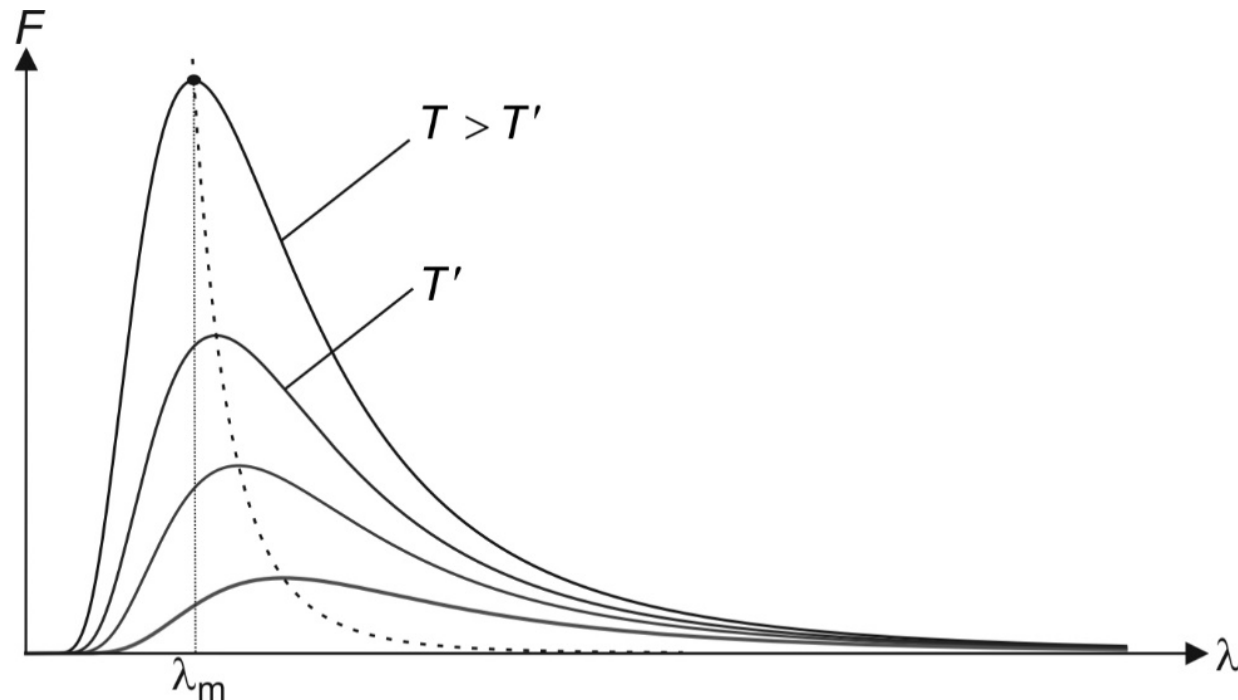
le rayonnement d'un corps noir est donc **continu**, très différent du spectre de raies émis par un gaz à basse pression.

étude de fonction : la puissance surfacique spectrale  $F(\lambda)$  est maximale pour la longueur d'onde  $\lambda_m$  telle que :

$$\lambda_m T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \simeq 3 \cdot 10^3 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

(loi de déplacement de Wien)

exemple : pour  $T = 300 \text{ K}$ ,  $\lambda_m = 10 \text{ } \mu\text{m}$  (infra-rouges)



loi de déplacement de Wien : plus la température est élevée, plus le spectre émis est centré sur les faibles longueurs d'onde

calcul : 98% de la puissance est rayonnée dans l'intervalle  $[0,5\lambda_m, 8\lambda_m]$

en intégrant sur tout le spectre : **loi de Stefan**

$$\varphi_e = \sigma T^4 \text{ avec } \sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} = 5,670316 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \text{ constante de Stefan}$$

puissance surfacique *totale* émise par le corps noir de température de surface  $T$

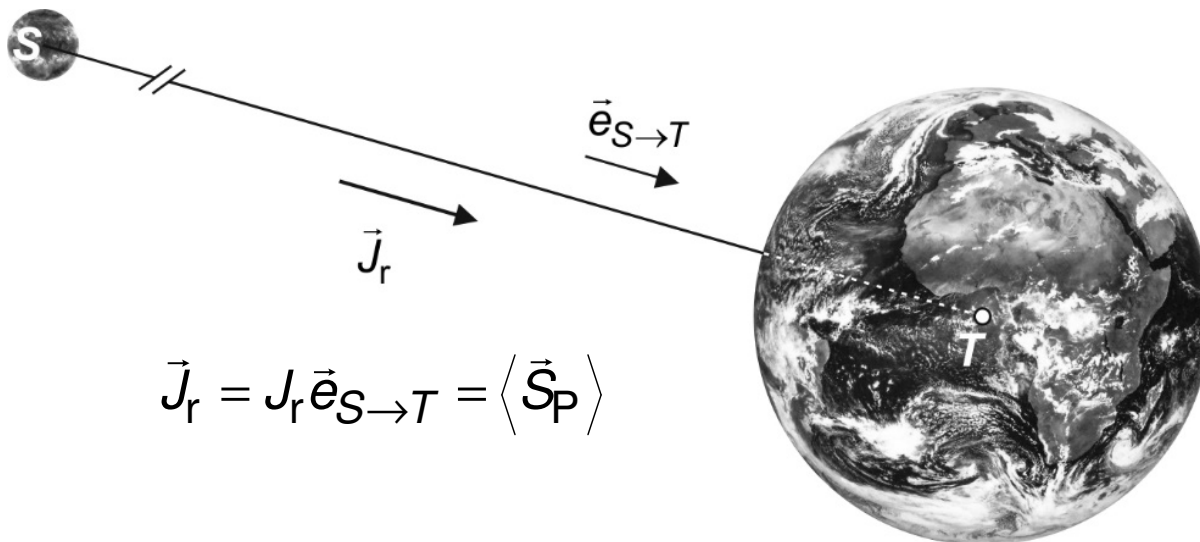
corps noir : modèle car aucun corps n'absorbe tout le spectre

exemple : le verre est transparent dans le visible mais absorbe les U.V et **les infra-rouges autour de  $10 \mu\text{m}$**   $\Rightarrow$  se comporte comme un corps noir vers  $10 \mu\text{m}$  et absorbe, d'après la loi de Wien, le rayonnement thermique ambiant ( $T \approx 300 \text{ K}$ )

le rayonnement solaire est proche de celui d'un corps noir de température  $5700 \text{ K}$   
la loi de Stefan permet de calculer la puissance émise par le Soleil et on en déduit la fraction  $J_r$  reçue par la Terre

$$J_r = 1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ au sommet de l'atmosphère}$$

$$J_{r \text{ max}} \approx 1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ au niveau de la mer car :}$$



- *albédo* (une partie de la puissance provenant du Soleil est réfléchiée, ou diffusée, et repart dans l'espace)
- absorption par l'atmosphère
- émission de rayonnements de l'atmosphère vers la Terre