

# Phénomènes de transport

## Les 3 états de la matière

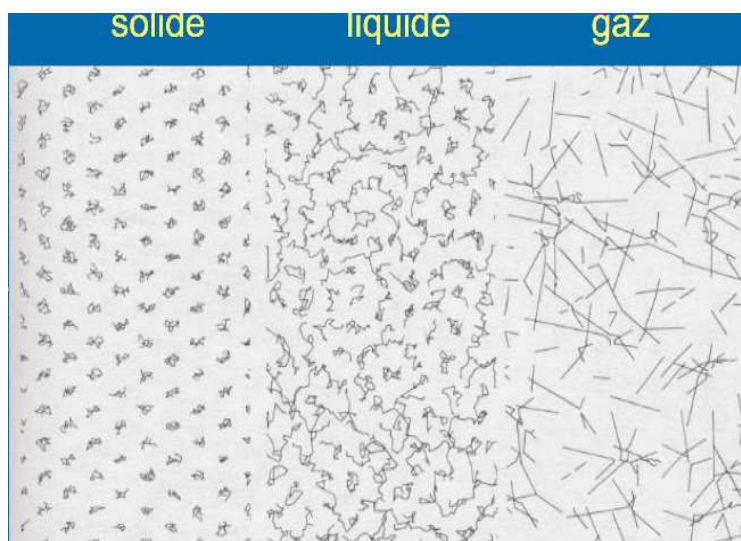
### ➤ Etats macroscopiques

Gaz	Liquide	Solide
peu dense $n^* = N/V \sim 10^{25}$ part/m <sup>3</sup> $\rho \sim 1$ kg/m <sup>3</sup>	1000 fois plus dense qu'un gaz $n^* \sim 10^{28}$ part/m <sup>3</sup> $\rho \sim 10^3$ kg/m <sup>3</sup>	aussi dense qu'un liquide $n^* \sim 10^{28}$ part/m <sup>3</sup> $\rho \sim 10^3$ kg/m <sup>3</sup>
fortement compressible	très peu compressible	encore moins compressible que les liquides
déformable	déformable	indéformable

### ➤ Etats microscopiques

Gaz	Liquide	Solide
distance moyenne entre molécules $d \sim 30$ Å	distance moyenne entre molécules $d \sim 3$ Å	distance moyenne entre molécules $d \sim 3$ Å
forces intermoléculaires très faibles	forces intermoléculaires importantes	forces intermoléculaires importantes
état désordonné	état avec un ordre à courte distance	état ordonné à longue distance
libre parcours moyen $\ell \sim 0.1$ μm	libre parcours moyen $\ell \lesssim 1$ Å	

- Rq : Il existe d'autres états de la matière comme les différentes phases des cristaux liquides (nématique, smectique, cholestérique), les plasmas, les différentes phases des corps magnétiques (para, ferro, ferri et antiferro), la phase superfluide, la phase supraconductrice ...

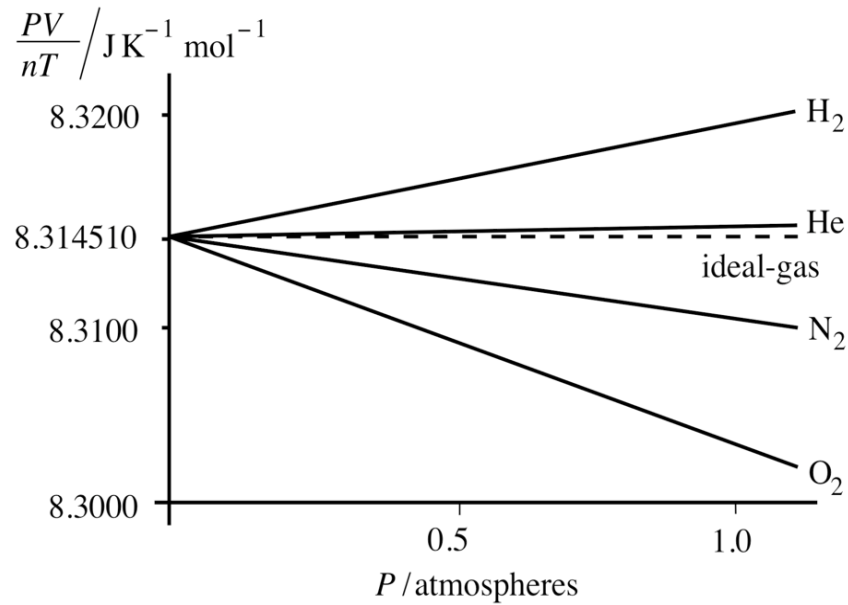


### Mouvement d'agitation moléculaire

Libre parcours moyen  $\ell$   
= distance parcourue par une particule entre deux collisions successives.

Attention : pas à l'échelle !

Fig. 1 : Les 3 états de la matière



Pour TOUS les gaz :  $PV/nT \rightarrow R = 8.31 J.K^{-1}.mol^{-1}$   
aux faibles pressions !

### Equation d'état du gaz parfait

$$PV = n R T = N k_B T$$

$P$  en Pa  
 $V$  en  $m^3$   
 $n$  en mol  
 $n^* = N/V$  en  $m^{-3}$   
 $T$  en K

ou

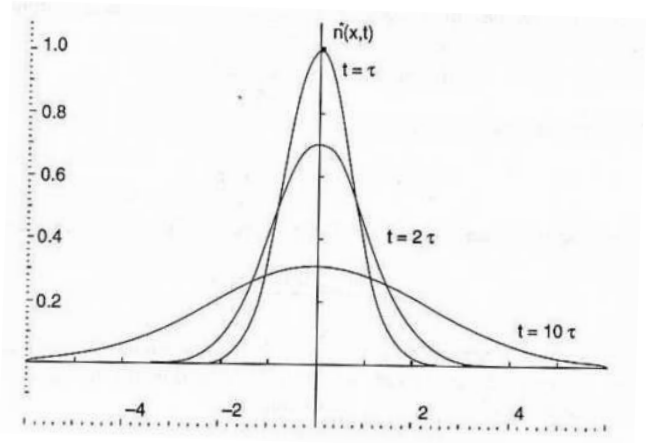
$$P = n^* k_B T$$

$R$  = cste des gaz parfaits  
 $= 8,31 J.K^{-1}.mol^{-1}$

$k_B$  = cste de Boltzmann  
 $= R/N_A$   
 $= 1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$

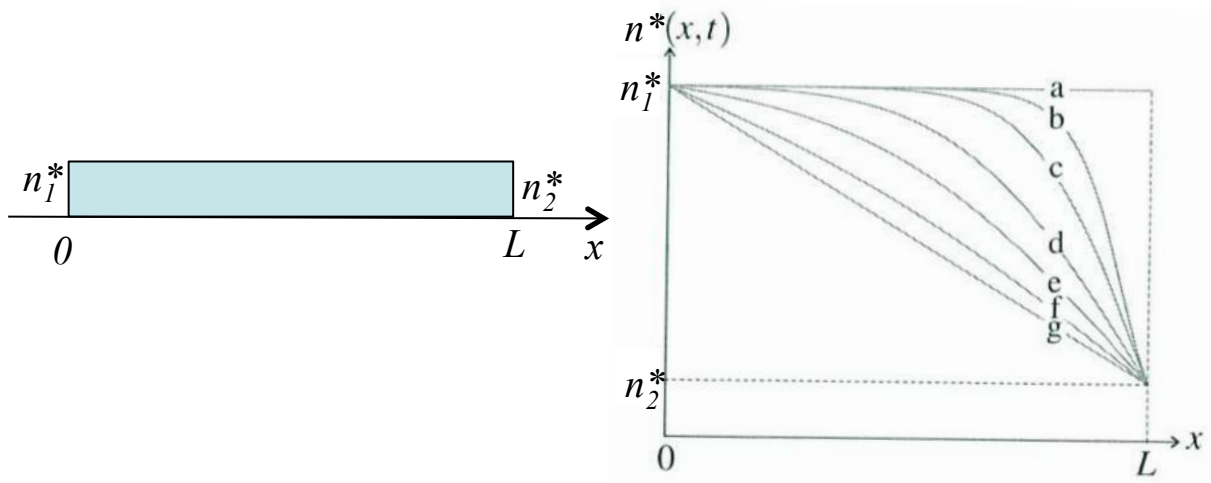
Tous les gaz se comportent comme un gaz parfait dans la limite des faibles pressions ou faibles densités !

Fig. 2 : Le gaz parfait



Diffusion d'une tâche d'encre

Diffusion d'un colorant alimentaire dans de l'eau à température ambiante.  
Durée de la séquence : ~5h



Initialement, la densité dans la barre vaut  $n_1^*$ .  
A  $t=0$ , on impose la densité  $n_1^*$  en  $x=0$  et  $n_2^*$  en  $x=L$ .  
La densité évolue avec le temps de (a) à (g) jusqu'au temps  $\tau \sim L^2/D$  où le régime permanent est atteint (loi linéaire).

La diffusion des particules se fait dans le sens des concentrations décroissantes : elle tend à homogénéiser les concentrations

Fig. 3 : Diffusion moléculaire

## Quelques valeurs de coefficients de transferts

Les valeurs indiquées ici sont données à 20°C.

### 1. Coefficients de diffusion

Diffusion de :	D (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
Molécules dans un gaz :	10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-4</sup>
Vapeur d'eau dans l'air	2.2 10 <sup>-5</sup>
O <sub>2</sub> dans l'air	1.8 10 <sup>-5</sup>
Molécules dans un liquide :	10 <sup>-12</sup> à 10 <sup>-8</sup>
Sucre dans l'eau	5 10 <sup>-10</sup>
Hémoglobine dans l'eau	6.9 10 <sup>-11</sup>
Atomes dans un solide :	10 <sup>-30</sup> à 10 <sup>-16</sup>

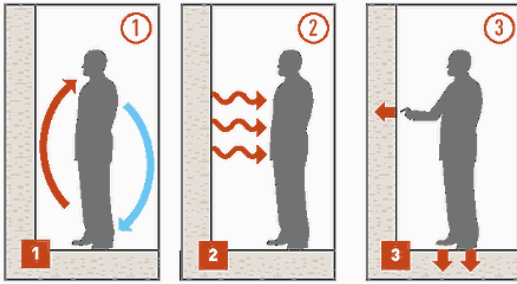
### 2. Conductivités thermiques

Qualité de la conduction thermique	Corps	λ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
Excellente	Ag	418
	Cu	390
	Al	238
	inox	120
Moyenne	Verre	1
	Béton	0.92
	Brique	0.7
	Eau	0.6
	Bois	0.2
Isolant	Amiante	0.17
	Laine de verre	0.04
	Placoplâtre	0.04
	Mousse de polyuréthane	0.03
	Air	0.03
	Duvet	0.02
	Polystyrène expansé	0.004

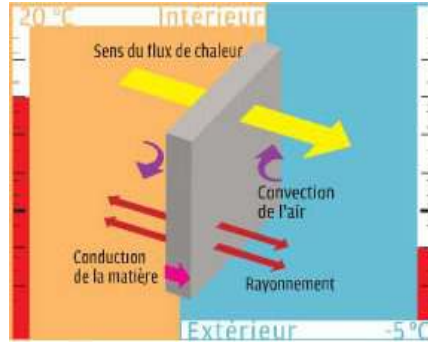
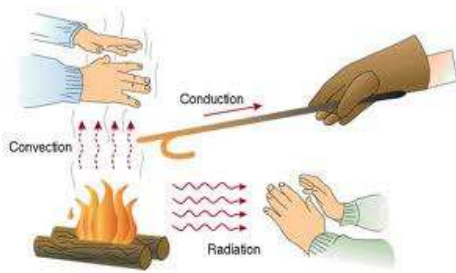
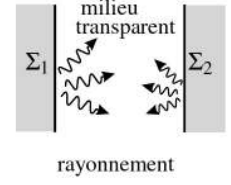
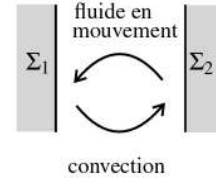
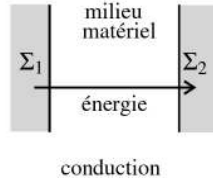
### 3. Coefficients de transfert conducto-convectifs

Type de convection	Corps	h (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )
Naturelle	Gaz	5 à 30
	Liquide	100 à 1 000
Forcée	Gaz	10 à 500
	Liquide	100 à 15 000

## Convection, conduction, rayonnement

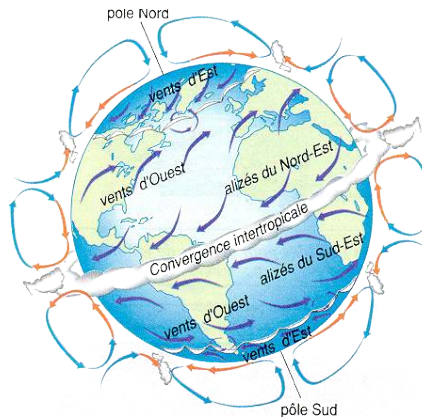
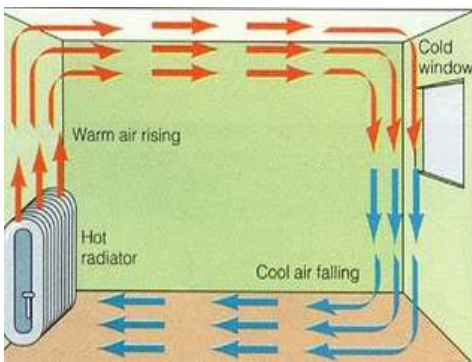
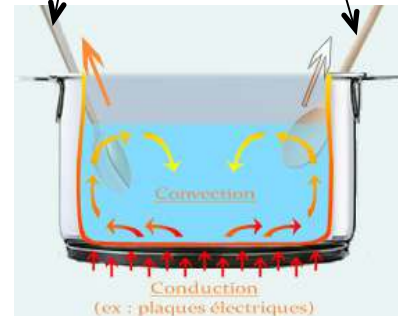


- 1 Le phénomène de convection entre la peau et l'air.
- 2 Le rayonnement.
- 3 La conduction par contact direct entre la peau et les objets.

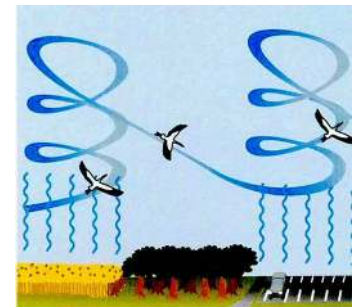


Une cuillère en métal est un bon conducteur thermique

Une cuillère en bois est bon isolant thermique

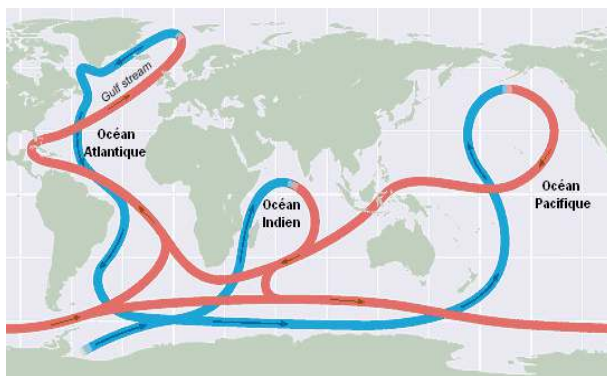


Cellules de convection atmosphériques



Courants de convection ascendants

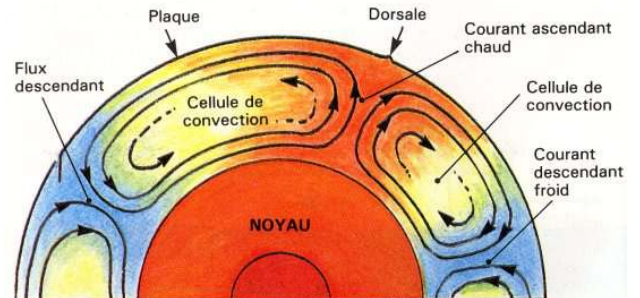
recherchés par les oiseaux, parapentistes et planeurs



Courants de convection océaniques, Gulf Stream

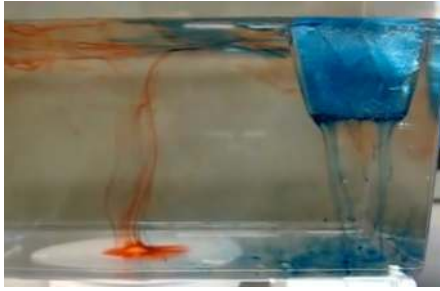
en bleu : courants froids et salés, profonds

en rouge : courants chauds et peu salés, peu profonds.



Cellules de convection dans le manteau terrestre

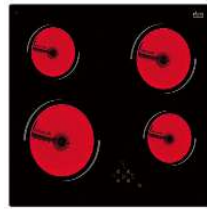
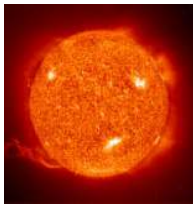
Fig. 4 : Les 3 modes de transferts thermiques



Zone chaude



**Convection forcée** : les radiateurs sur les composants électroniques permettent d'évacuer la chaleur plus efficacement par convection



**Transferts thermiques par rayonnement**

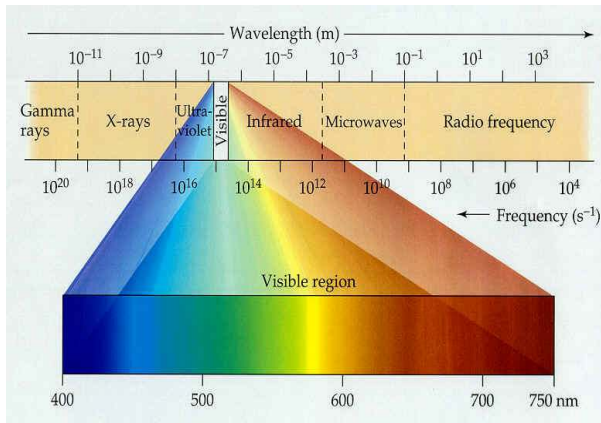
**Fig. 4 : Les 3 modes de transferts thermiques**



**Ailettes de refroidissement**

Fines plaques de métal chargées d'augmenter la surface de contact thermique avec l'air et donc le transfert de chaleur par conducto-convection.

**Fig. 5 : Transfert thermique par conducto-convection**



**Spectre électromagnétique**

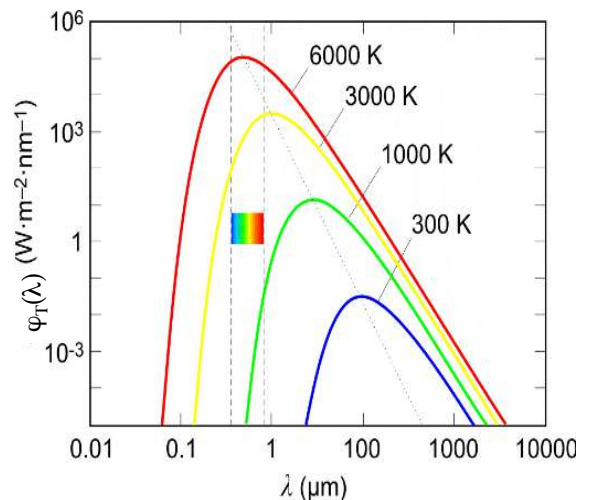
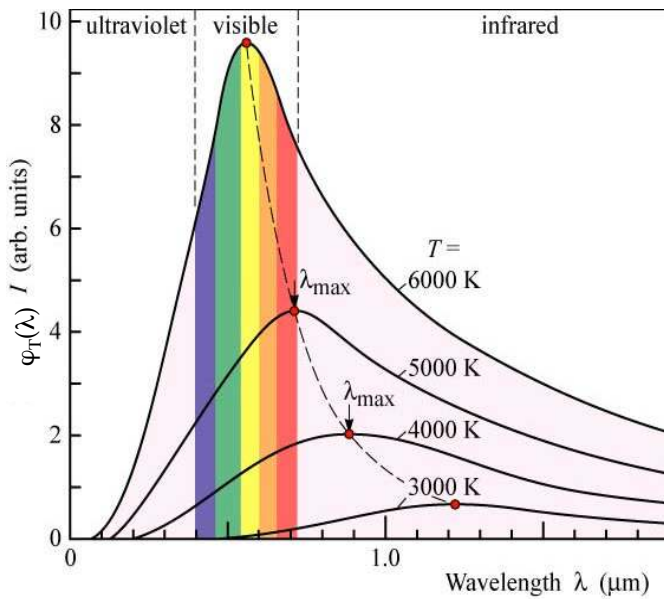
**Loi de Stefan-Boltzmann (1884)**

$$\Phi_e(T) = \sigma ST^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

**Loi de Wien (1896)**

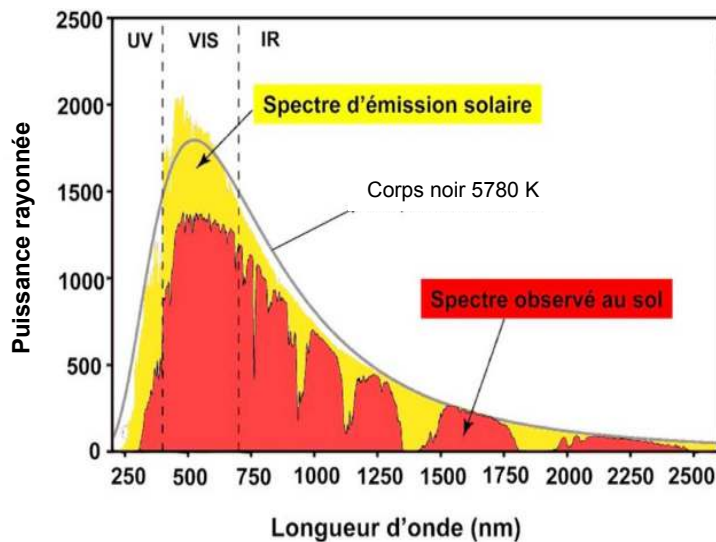
$$\lambda_m T = 2898 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



Les 2 axes sont en échelle logarithmique

**Loi de Planck**

Puissance rayonnée /u. de surface et /u. de longueur d'onde par un corps noir à la température T.



**Le rayonnement solaire**

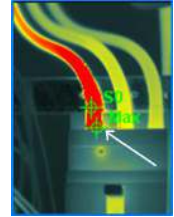
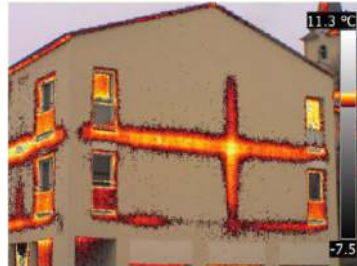
Le Soleil rayonne comme un corps noir à ~5800K (température de la surface du Soleil).

En jaune : spectre solaire au-dessus de l'atmosphère  
En rouge : spectre au niveau du sol, après absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère

**Fig. 6 : Rayonnement thermique**



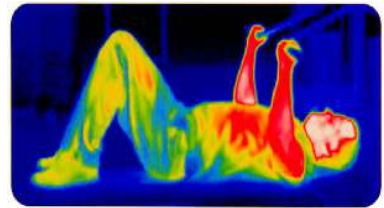
## Rayonnement dans le visible



Le verre est opaque aux IR lointains.

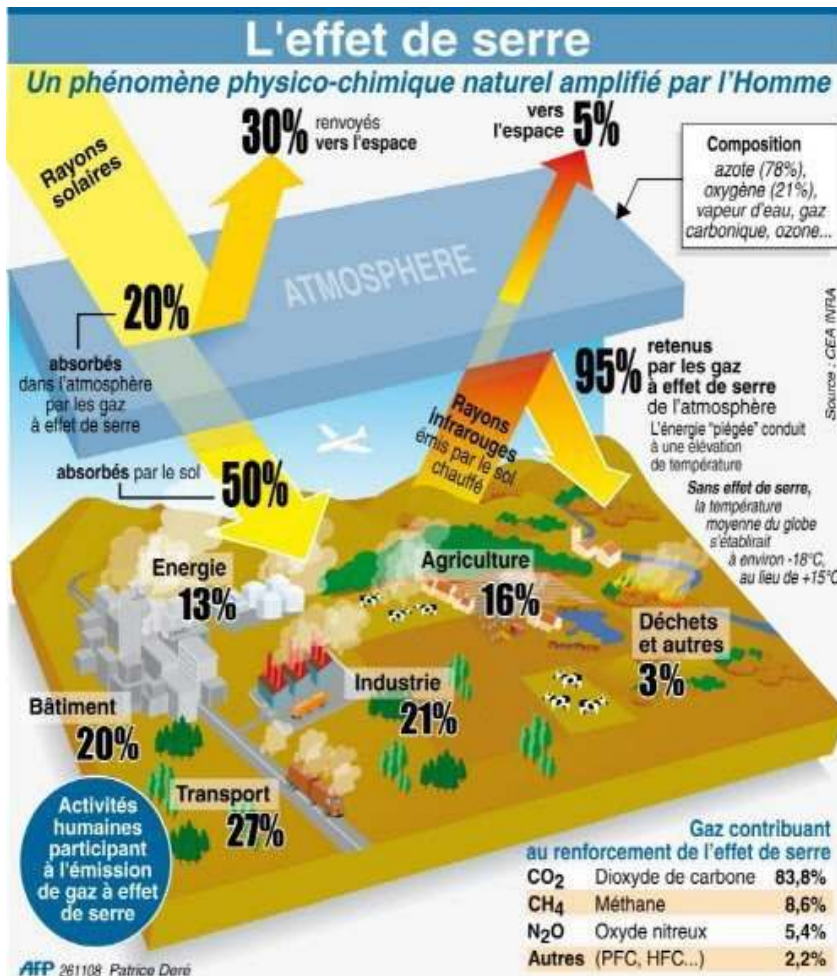


Lézard (à sang froid).



Sportif soulevant des poids !

## Rayonnement dans l'IR - thermogrammes



## L'effet de serre

La vapeur d'eau est le principal gaz à effet de serre.

(elle assure environ 75% de l'effet de serre naturel)

Fig. 7 : Applications du rayonnement thermique