

PROPRIÉTÉS THERMIQUES ET LA CHALEUR

PGC-10

ÉNERGIE THERMIQUE

L'énergie thermique

est l'énergie cinétique désordonnée totale (rotationnelle, translationnelle et vibratoire) associée à un groupe de particules (atomes, ions, électrons,...) qui constituent un corps.

Il existe trois mécanismes principaux pour varier l'énergie thermique :

- Un **travail** sur un corps.
- Le **rayonnement électromagnétique** (lumière visible, infrarouge,...).
- La **conduction**.

La chaleur est l'énergie thermique échangée entre deux corps.

TEMPÉRATURE VS ÉNERGIE THERMIQUE VS CHALEUR

- 1) La **température** qui constitue une mesure de l'**énergie cinétique moyenne** des molécules individuelles. Elle est donc indépendante du nombre total d'atomes présents. Ce type de variable est appelée *variable intensive* = *variable par molécule*
- 2) L'**énergie thermique** ou **énergie interne** U qui correspond à l'**énergie cinétique désordonnée** totale de toutes les molécules d'un objet : c'est une *variable extensive* = *variable de l'ensemble de molécules*
- 3) La **chaleur** qui consiste en un **transfert d'énergie** (généralement thermique) d'un objet à un autre dû à leur différence de température.

LA QUANTITÉ DE CHALEUR

Exp. on trouve que $Q \propto \Delta T$
 $Q \propto m$ } $\Rightarrow Q \propto m \cdot \Delta T$

$$Q = c m \Delta T = c m (T_f - T_i)$$

↳ capacité calorifique

$[Q]$: calorie
cal/kcal, Cal

$[c]$: cal/kg.k (mais ΔT est !
le même pour k
ou °C)

Consommation horaire approximative en kcal

Masse du corps en kg	45	68	90	100
En sommeil	40	60	80	105
Debout	70	100	140	170
Marche	130	195	260	320
Course à pied	290	440	580	730

QUANTITÉ DE CHALEUR ET ÉNERGIE

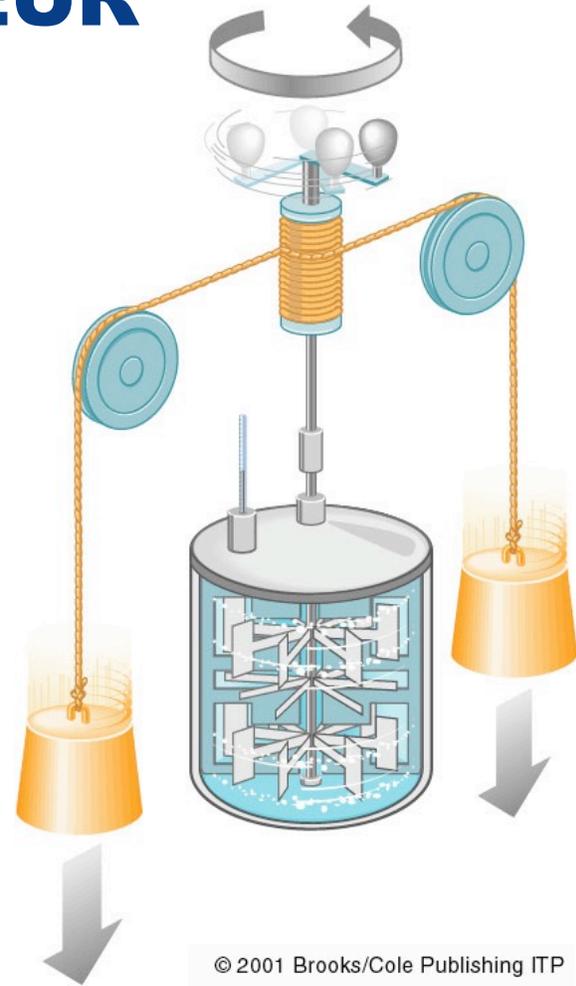
$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J}$$

$$\underline{E_p} \Rightarrow E_{\text{cin}} (\text{palettes}) \Rightarrow E_{\text{cin}} \text{ eau} \\ \Rightarrow E_{\text{thermique}} !$$

1 kg de 1 m !

On peut augmenter (abaisser) la température de 1 kg d'eau de 1 Kelvin en lui apportant (soutirant) une énergie (chaleur) de 4186 Joules (1kg chutant de 427m).



LA CAPACITÉ CALORIFIQUE

(SANS CHANGEMENT D'ÉTAT)

$$Q = c m \Delta T$$

$$T_1 = 5^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 95^\circ\text{C}$$

$$m_1 = m_2$$

$$Q_1 = c_1 m_1 (T_F - T_1) \quad T_F > T_1 : Q > 0 \text{ Reçu}$$

$$Q_2 = c_2 m_2 (T_F - T_2) \quad T_F < T_2 : Q < 0 \text{ Perdu}$$

$$Q_1 = -Q_2 \Rightarrow c_1 m_1 (T_F - T_1) = -c_2 m_2 (T_F - T_2)$$

Si $c_1 = c_2$ et $m_1 = m_2 \Rightarrow$

$$T_F - T_1 = -(T_F - T_2) \Rightarrow T_F = \frac{T_2 + T_1}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_F = 50^\circ\text{C}$$

LA CAPACITÉ CALORIFIQUE

(SANS CHANGEMENT D'ÉTAT)

$$\Delta T_{\text{Fe}} = Q / m C_{\text{Fe}}$$

$$C_{\text{Fe}} = 0.1 \text{ kcal/kg}\cdot\text{K}$$

$$\Delta T_{\text{eau}} = Q / m C_{\text{eau}}$$

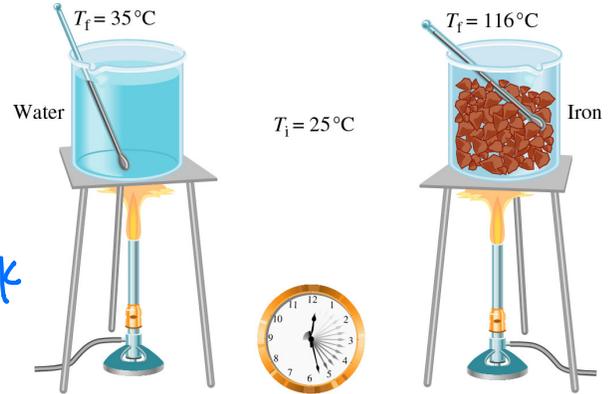
$$C_{\text{eau}} = 1.0 \text{ kcal/kg}\cdot\text{K}$$

Si même Q

$$C_{\text{eau}} \approx 9 C_{\text{Fe}}$$

$\Delta T_{\text{eau}} \sim 9 \times$ moins élevé que

$$\Delta T_{\text{Fe}}$$



© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

Matériau	c (kcal/(kg·K))
Glace (eau, -5°C)	0.50
Plomb	0.031
Aluminium	0.21
Cuivre	0.093
Fer	0.11
Mercure	0.033
Eau	1
Helium	1.237
Vapeur d'eau (110°C)	0.481
Air (100°C)	0.24

QUESTION

A 2 kg 50°C	B 2 kg 150°C
-------------------	--------------------

Le grand recipient est bien isolé de l'environnement.

On sait que $c_A < c_B$. Quelle est la température finale?

- (a) $T_f > 100^\circ\text{C}$
- (b) $T_f = 100^\circ\text{C}$
- (c) $T_f < 100^\circ\text{C}$

$$c_A m (T_f - T_A) = -c_B m (T_f - T_B) \Rightarrow$$

$$c_A (T_f - T_A) = -c_B (T_f - T_B)$$

$$c_A < c_B$$

$$T_f - T_A > - (T_f - T_B) \Rightarrow$$

$$2T_f > T_B + T_A \Rightarrow$$

$$T_f > \frac{T_A + T_B}{2} = 100^\circ\text{C}$$

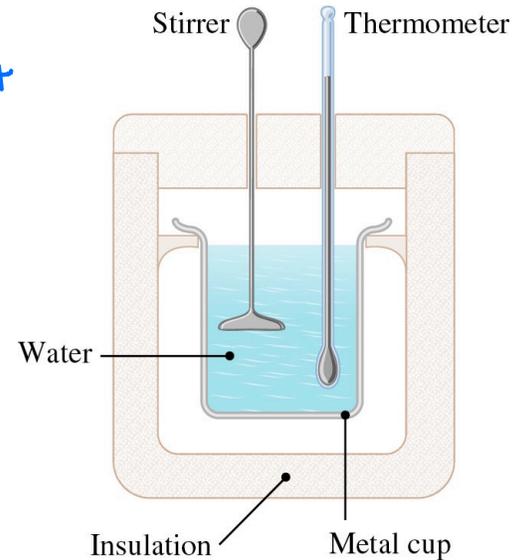
LE CALORIMÈTRE

$$-Q_b = Q_{\text{eau}} + Q_{\text{vase}}$$

$$-m_b C_b \Delta T_b = m_{\text{eau}} C_{\text{eau}} \Delta T_{\text{eau}} + m_{\text{vase}} C_{\text{vase}} \Delta T_{\text{vase}}$$

$$\Delta T_b = T_f - T_{i_b}$$

$$\Delta T_{\text{vase}} = \Delta T_{\text{eau}} = T_f - T_i$$



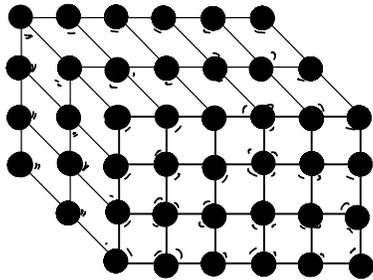
© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

CHANGEMENT D'ÉTAT

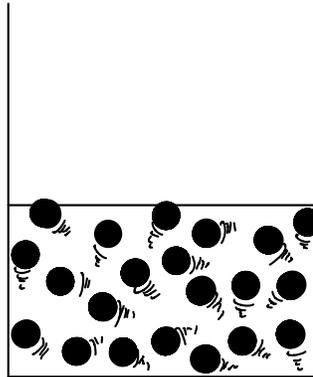
ÉTATS DE LA MATIÈRE

- **solide** : conserve sa forme et son volume.
- **liquide** : coule et prend la forme du récipient dans lequel il est placé, mais conserve un volume constant (si incompressible).
- **gaz** : coule, se disperse prenant la forme et occupant tout le volume du récipient.
- **plasma** : mélange d'atomes, ions et électrons.

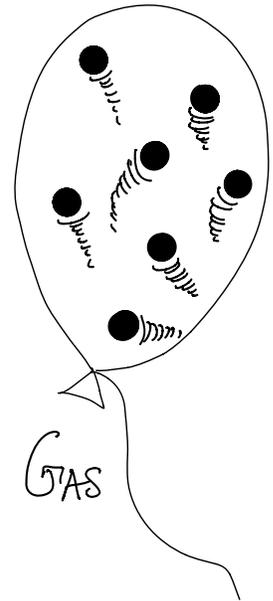
LES PARTICULES DANS LA MATIÈRE



SOLIDE



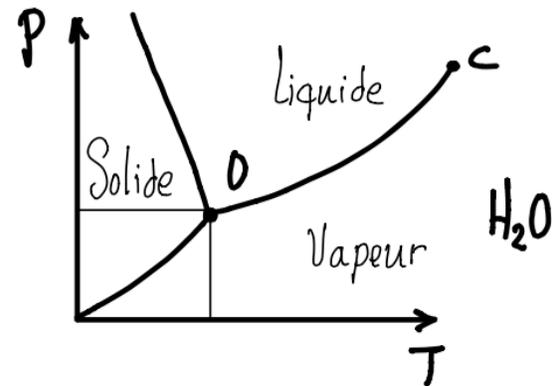
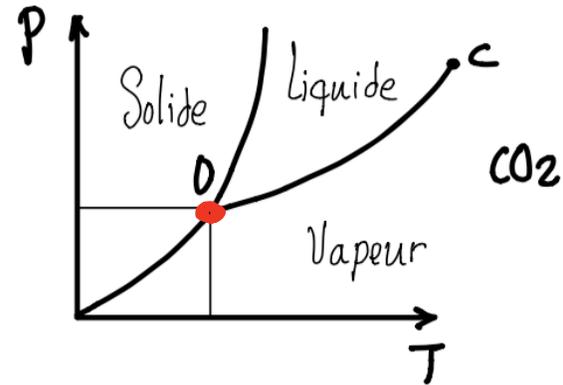
LIQUIDE



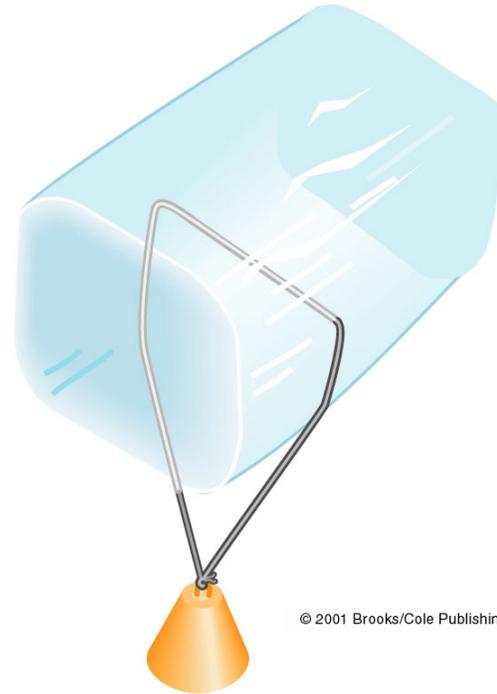
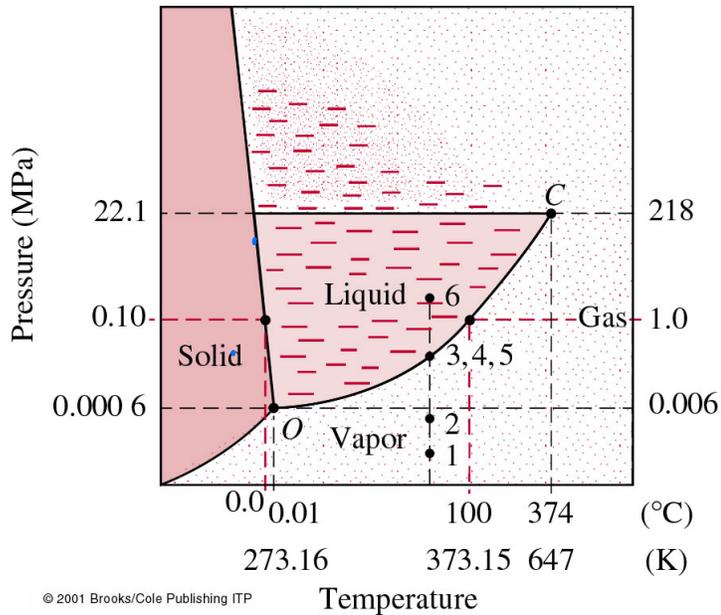
GAS

DIAGRAMME DE PHASE

- Courbe de vaporisation (L-V)
- Courbe de fusion (S-L)
- courbe de sublimation (S-V)



EXEMPLE DE TRANSFORMATION REVERSIBLE



© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

$Q = c m \Delta T \Rightarrow$ Pas de changement d'Etat

CHALEUR LATENTE DE FUSION

Solide \rightarrow liquide

$$Q = \pm L_F m$$

(+) : fusion

(-) : solidification

L_F : energie pour 1 kg solide \rightarrow liquide
à T constante!

CHALEUR LATENTE DE VAPORISATION

Liquide \rightarrow gaz

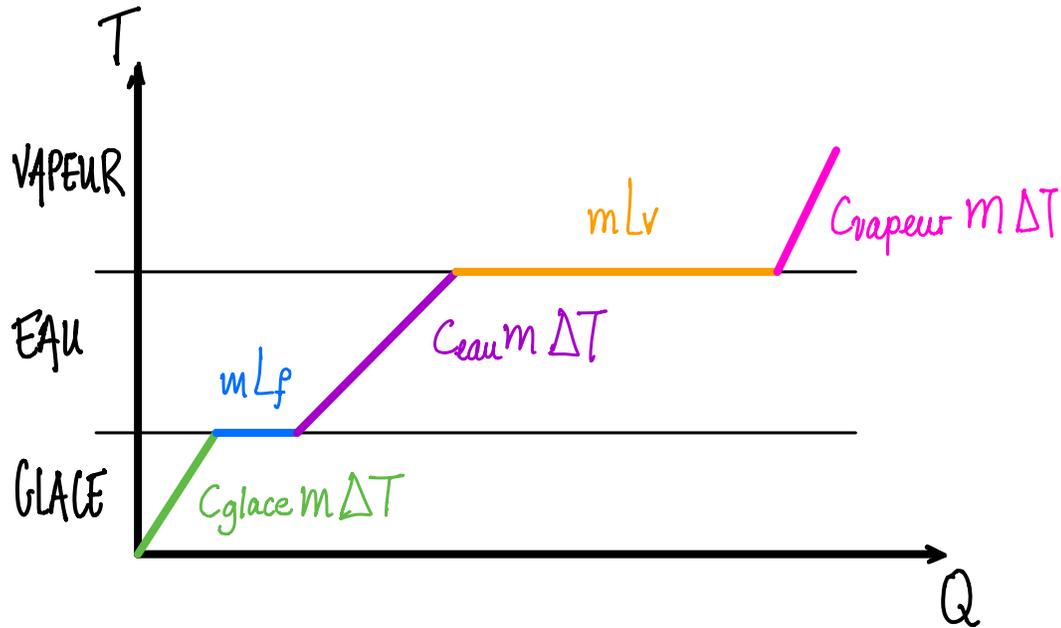
$$Q = \pm L_v \cdot m$$

$$L_v > L_f$$

CHANGEMENT D'ÉTAT – TABLEAU RECAPITULATIF

Substance	Point de fusion (°C)	L_f (kJ/kg)	Point d'ébullition (°C)	L_v (kJ/kg)
Cuivre	1083	205	2336	5069
Or	1063	66,6	2600	1578
Alcool éthylique	-114	104	78	854
Eau	0,0	333,7	100,0	2259
Mercure	-38,87	11,8	356,58	296
Azote	-209,86	25,5	-195,81	199
Hydrogène	-259,31	58,6	-252,89	452
Hélium	-269,65	5,23	-268,93	21

CAPACITÉ CALORIFIQUE ET CHALEUR LATENTE



$$\begin{aligned}C_{\text{vapeur}} &= 2.01 \text{ J/(g}\cdot\text{K)} \\L_v &= 2259 \text{ J/g} \\C_{\text{eau}} &= 4.18 \text{ J/(g}\cdot\text{K)} \\L_f &= 333.7 \text{ J/g} \\C_{\text{glace}} &= 2.10 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

CHANGEMENT D'ÉTAT

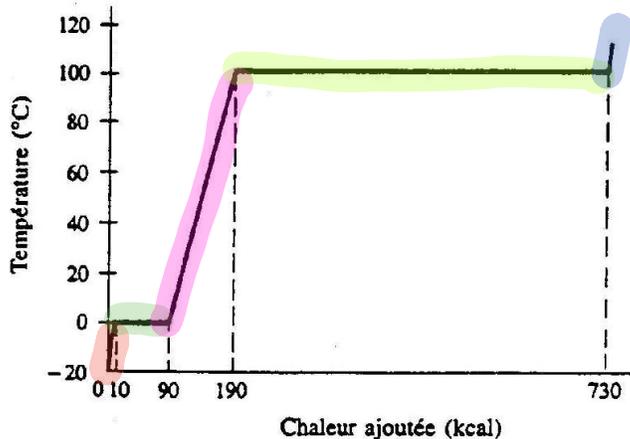
Quelle est la quantité de chaleur nécessaire pour transformer, sous pression atmosphérique, 1.0 kg de glace à -10°C en vapeur surchauffée à 110°C ?

$$Q = mC_g \Delta T_g + mL_f + mC_p \Delta T_p + mV_L + mC_v \Delta T_v$$

$$\Delta T_g = 10^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_p = 100^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_v = 10^{\circ}\text{C}$$



(valeurs de C_g , C_p , C_v , L_f et L_v à la page précédente!)

$$Q = 3055 \text{ kJoule}$$

ÉVAPORATION

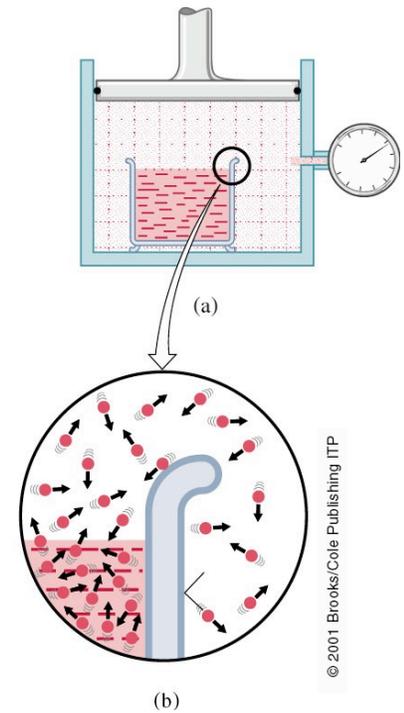
Espace Saturé

Pression de vapeur saturée P_0

Pression de vapeur $< P_0$:

Évaporation continue!

Évaporation: processus
refroidissement



© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

Température (°C)	Pression de vapeur saturée (Pa)
0	$6,11 \times 10^2$
50	$1,23 \times 10^4$
70	$3,12 \times 10^4$
100	$1,01 \times 10^5$
120	$1,99 \times 10^5$
150	$4,76 \times 10^5$

ÉBULLITION

La pression de vapeur d'un liquide augmente avec la température.

Lorsque celle-ci s'élève au point où la pression de vapeur est égale à la pression extérieure, il y a ébullition.

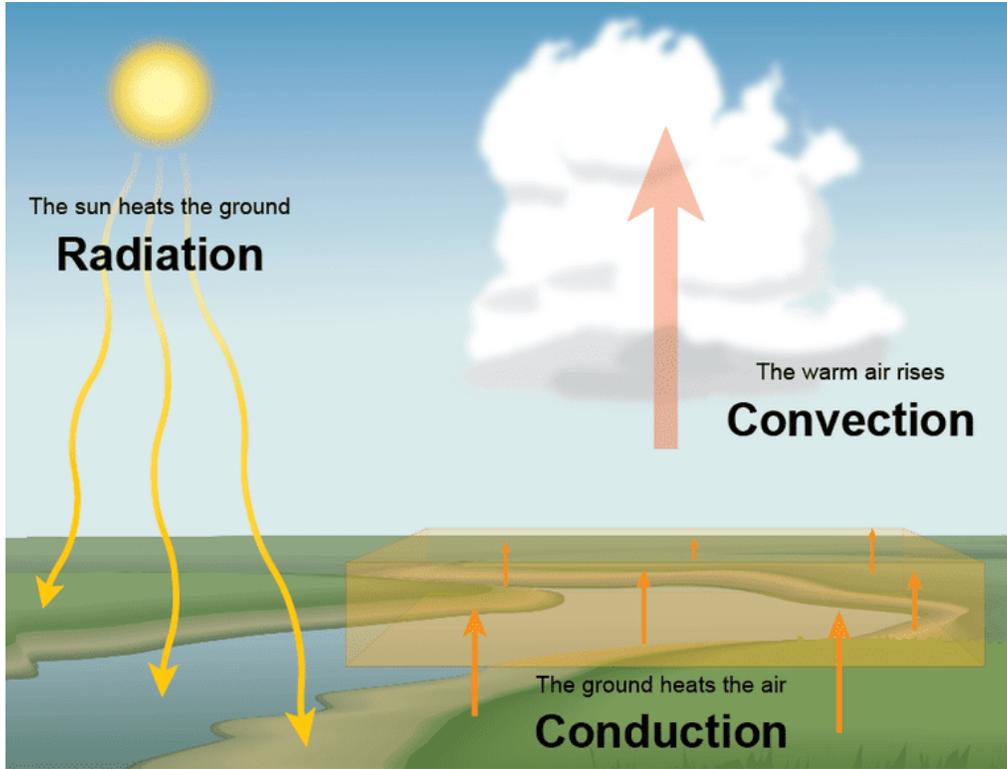
Sur
Gwerest: $P_{atm} \sim 1/3$ niveau de la mer

Point d'ébullition $\sim 70^\circ\text{C}$

Casserole à Pression utilise même processus!
pression \uparrow , temps cuisson \uparrow ($\sim 120^\circ\text{C}$)

TRANSFERT D'ÉNERGIE THERMIQUE

- Conduction
- Convection
- Rayonnement



CONVECTION

the transfer of heat through a fluid (liquid or gas) caused by molecular motion

CONDUCTION

the transfer of heat or electric current from one substance to another by direct contact.



RADIATION

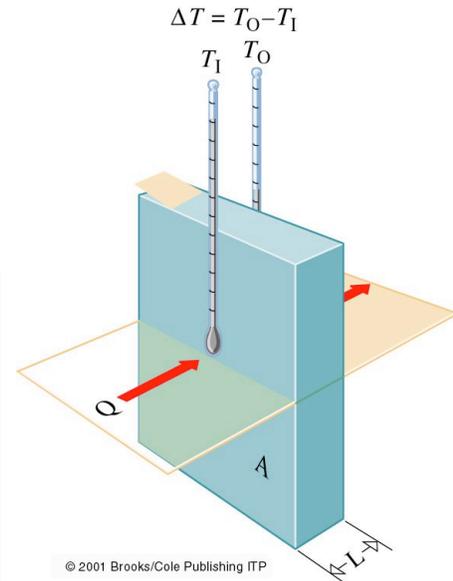
energy that is radiated or transmitted in the form of rays or waves or particles

LA CONDUCTION

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = - k_T \frac{A}{L} \Delta T$$

k_T : coefficient de conductivité thermique

Matériau	$k_T(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	matériau	$k_T(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Aluminium	210	Cuivre	386
Plomb	35	Argent	406
Verre	0,84	Duvet	0,02
Glace	2,2	Neige compacte	0,21
Mercure	8,7	Eau	0,58
Air	0,026	Dioxyde de carbone	0,017



EXEMPLE

Soit une vitre de 0.90m de largeur, 1.5 m de hauteur et 4.0 mm d'épaisseur. La température extérieure est de -9.0°C et celle de la pièce de 10°C . Quelle est la puissance thermique qui traverse cette vitre ($k_T = 0.84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ?

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -k_T \frac{A}{L} (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$$

$$A = 0.9 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} = 1.35 \text{ m}^2$$

$$L = 4.0 \text{ mm}$$

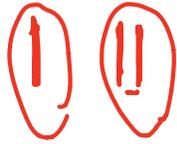
$$\Delta T = -19^{\circ}\text{C} = -19 \text{ K}$$

$$\Rightarrow H = 5386.5 \text{ Watt}$$

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\frac{k_T A}{L} \Delta T \Rightarrow H = -\frac{L}{R} \Delta T \quad R = \frac{L}{k_T A}$$

$$R_{\text{TOT}} = R_1 + R_2 + \dots \quad \text{"en série"} \quad \text{Resistance Thermique}$$

LA RÉSISTANCE THERMIQUE



On assimile une fenêtre à une vitre de verre de forme carrée de 90 cm de côté et 2mm d'épaisseur.

1) Calculez la résistance thermique de la vitre sachant que la conductivité thermique du verre est $k^v_T = 0.84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

2) On remplace le simple vitrage par un double vitrage comprenant deux vitres simples séparées par une lame d'air de 2 mm d'épaisseur et de conductivité thermique $k^a_T = 0.023 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
Calculez la nouvelle résistance thermique. Conclusion?

$$1) R_T^v = \frac{L}{k^v_T A} = 2.9 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_T^{\text{air}} = \frac{L}{k^a_T A} = 0.107 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

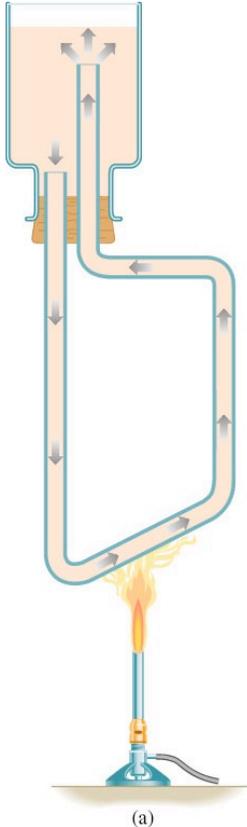
$$2) R_{\text{TOT}} = R_T^v + R_T^{\text{air}} + R_T^v = 2R_T^v + R_T^{\text{air}} = 0.11 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\text{Alors } R_{\text{TOT}} \sim 38 R_T^v \quad \text{!}$$

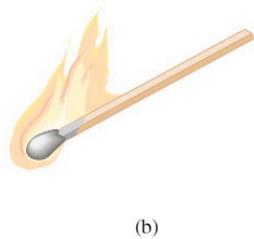
LA CONVECTION

$$H = g A \Delta T$$

↑
constante de convection



© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP



LE RAYONNEMENT

$$H_e = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon \sigma A T^4$$

\uparrow Emise
 \uparrow coefficient d'emissivité

$\epsilon = 1$: corps noir
 $\epsilon = 0$: corps qui brille

$$H_{net} = H_a - H_e = \epsilon \sigma A (T_{env}^4 - T^4)$$

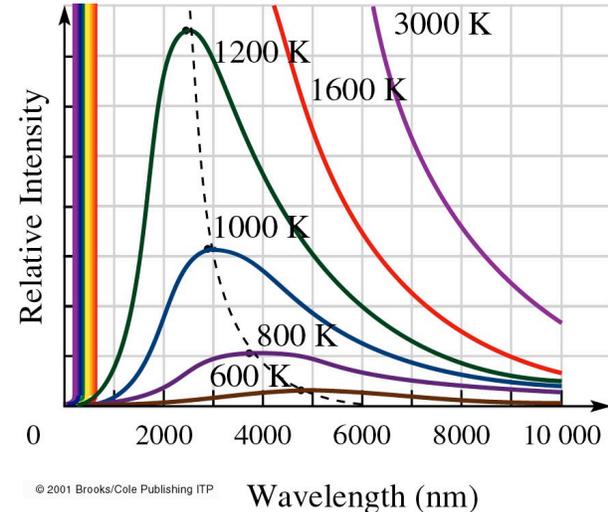
\uparrow absorbée

Loi de Stefan Boltzmann

σ : constante

A : aire

T : Temp

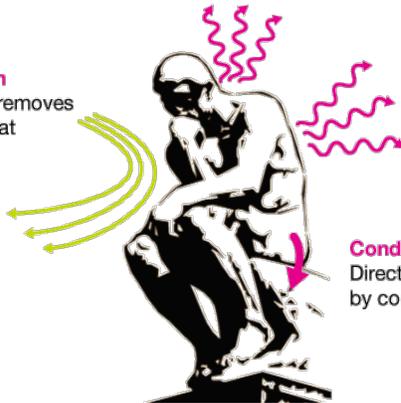


Convection
Moving air removes radiated heat

Evaporation
Loss of heat by evaporation of water

Radiation
Emission of electromagnetic radiation

Conduction
Direct transfer by contact



Radiation only

No Wind

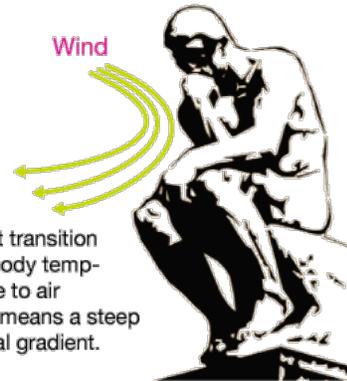
A "blanket" of heated air reduces the steepness of the thermal gradient.



Convection

Wind

Abrupt transition from body temperature to air temp. means a steep thermal gradient.



QUESTION

Vous (à 37°C) êtes dans une chambre à 20°C . Les quatre murs sont faits de matériaux différents, béton, cuivre, or et acier. Lequel des murs paraît le plus froid ?

- a) le côté du cuivre
- b) le côté du béton
- c) le côté de l'acier
- d) le côté de l'or
- e) Puisque les quatre murs sont à la même température, ils paraissent tous aussi froids les uns que les autres.

NB : Les conductivités thermiques respectives des matériaux sont $k_{\text{Cu}}=385 \text{ W/mK}$, $k_{\text{beton}}=0.8 \text{ W/mK}$, $k_{\text{Au}}=314 \text{ W/mK}$, $k_{\text{Acier}}=50.2 \text{ W/mK}$



L'atmosphère
laisse arriver au sol
50 % du rayonnement
reçu du soleil.

The diagram illustrates the greenhouse effect. A sun in the top left corner emits yellow arrows representing solar radiation. One arrow points towards the Earth's surface, while another points away from the Earth. A large red arrow points from the Earth's surface up towards the atmosphere, representing infrared radiation. A second, larger red arrow points from the atmosphere back down towards the Earth's surface, representing re-emitted radiation. The Earth's surface is depicted with a city, a tractor, and a house. An airplane is shown in the sky. The background is a blue sky with a white cloud.

Le rayonnement absorbé par le sol et l'atmosphère est finalement réémis vers l'espace en infrarouges, après de multiples interactions avec les composants de l'atmosphère, contribuant ainsi à en réchauffer les couches inférieures.

Agissant telles les vitres d'une serre, certains gaz présents naturellement en faible quantité dans l'atmosphère (vapeur d'eau, gaz carbonique, éthane, ozone) interfèrent avec les rayons infrarouges en les empêchant directement de s'échapper vers l'espace. Cela provoque une hausse des températures.

LAND AVERAGE TEMPERATURE

