

BILAN THERMIQUE D'UN SYSTÈME THERMODYNAMIQUE

1) Caractéristiques d'un transfert thermique :

ACTIVITÉ 1

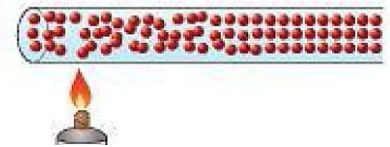
a - Les différents modes de transfert thermique :

Il existe trois modes de transfert thermique entre un système et le milieu extérieur :

Transfert thermique par conduction :

Ce transfert thermique s'effectue par contact et sans transport de matière.

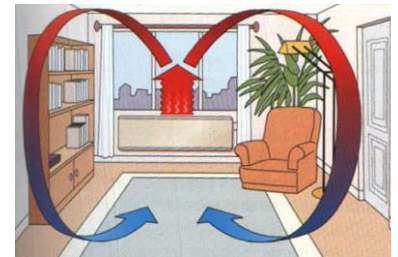
Dans l'exemple ci-contre, la flamme augmente l'énergie cinétique des particules du métal dans la zone chauffée puis cette agitation se propage de proche en proche, par chocs successifs, jusqu'à l'autre extrémité.



Transfert thermique par convection :

Ce transfert thermique s'effectue entre un système et un fluide (gaz ou liquide) en mouvement.

Dans l'exemple ci-contre, l'air à proximité du radiateur s'échauffe et se dilate. Il devient alors moins dense et s'élève. Il laisse sa place à de l'air plus froid qui s'échauffe à son tour au contact du radiateur. En s'élevant, l'air chaud s'éloigne de la source chaude et donc refroidit progressivement. Il devient alors plus dense et finit par retomber en s'approchant à nouveau de la source chaude.

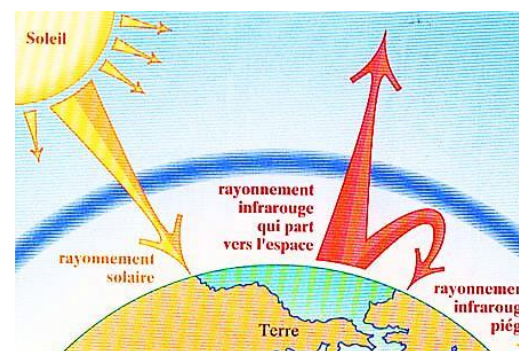


Transfert thermique par rayonnement :

Ce transfert thermique s'effectue par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques et ne nécessite donc pas de milieu matériel.

Dans l'exemple ci-contre, l'énergie thermique produite par le soleil est transférée vers la Terre sous forme de rayonnement, ce qui augmente son énergie interne et sa température. Le sol libère ensuite une partie de son énergie interne sous forme de rayonnements infrarouge.

(l'atmosphère étant en partie opaque à ce rayonnement IR à cause des gaz à effet et l'énergie rayonnée se retrouve piégée)



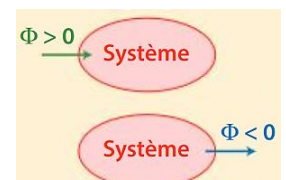
b - Flux thermique :

Un transfert thermique entre un système et le milieu extérieur peut se faire plus ou moins rapidement en fonction de leur différence de température et éventuellement de la cloison qui les sépare.

Le flux thermique correspond à l'énergie thermique Q transférée pendant une durée Δt :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi : \text{flux thermique (W)} \\ Q : \text{énergie thermique transférée (J)} \\ \Delta t : \text{durée du transfert (s)} \end{array} \right.$$

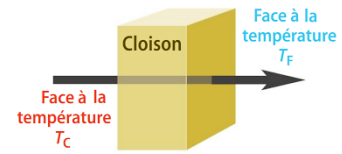
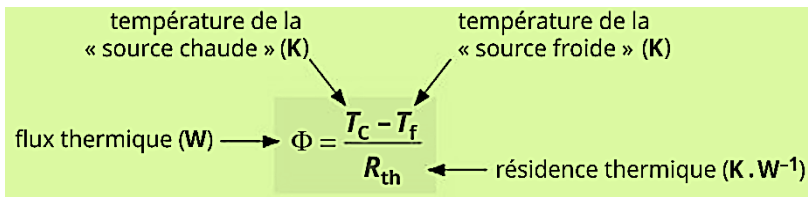


Remarque : Le flux thermique a la dimension d'une puissance et se nomme donc également « puissance thermique ».

c – Résistance thermique :

La **résistance thermique** R_{th} caractérise l'opposition d'un système au transfert thermique entre deux points.

Le flux thermique est donc lié à la différence de température entre les deux points et à la résistance thermique :



Transfert thermique à travers une cloison de la face la plus chaude à la plus froide.

Remarques :

La résistance thermique d'une cloison dépend de la conductivité thermique du matériau qui la constitue, de son épaisseur et de la surface traversée par le flux.

Si plusieurs parois sont accolées, la résistance thermique totale est égale à la somme des résistances thermiques de chaque paroi.

(voir ci-contre le tableau de comparaison entre la loi des résistances thermiques et la loi d'Ohm)

Électricité	Thermique
Courant électrique I (en A)	Flux thermique Φ_{th} (en W)
Tension électrique U (en V)	Différence de température $T_1 - T_2$ (en K)
Résistance électrique R (en Ω)	Résistance thermique R_{th} (en $K \cdot W^{-1}$)
$U = RI$	$T_1 - T_2 = R_{th} \Phi_{th}$

Exercices : n°32,41 p446/447

2) Bilan thermique du système { Terre ; atmosphère } :

ACTIVITÉ 2

La température moyenne de la surface de la Terre, conséquence des transferts d'énergie entre le système { Terre ; atmosphère } et l'extérieur, peut être déterminée à l'aide d'un bilan d'énergie. On applique le premier principe de la thermodynamique au système :

$$\Delta U = Q_T + Q_R + Q_E$$

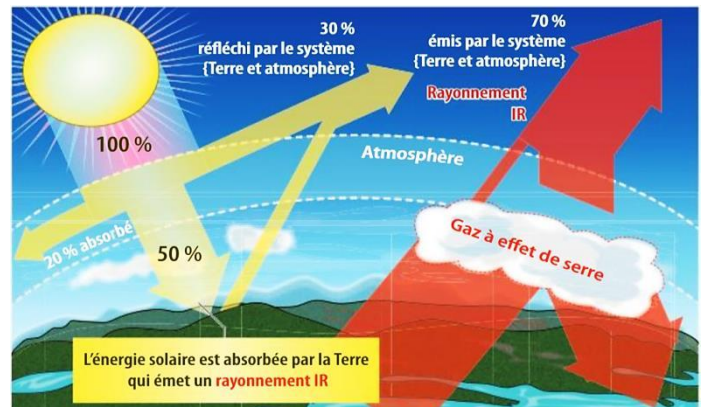
avec Q_T : énergie reçue de la part du Soleil (>0)

Q_R : énergie réfléchie par l'atmosphère (<0)

Q_E : énergie émise par le système (<0)

Comme la température moyenne de la surface de la Terre est stable au fil des ans : $\Delta U = 0$

Le bilan thermique s'écrit alors : $Q_T + Q_R + Q_E = 0$



En divisant l'équation précédente par Δt , on obtient un bilan de flux (puissances thermiques) : $\mathcal{P}_T + \mathcal{P}_R + \mathcal{P}_E = 0$

En divisant ce bilan par la surface S du système, on obtient un bilan de puissances surfaciques : $p_T + p_R + p_E = 0$

soit : $p_T + p_R = -p_E$

La Terre étant considérée comme un corps noir, la puissance surfacique

qu'elle émet est liée à sa température suivant la **loi de Stefan-Boltzman** : $p_E = -\sigma \times T^4$ ($p_E < 0$ car puissance perdue par le système)

Il vient alors : $T = \left(\frac{-p_E}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{p_T + p_R}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$

D'après le bilan thermique, T dépend de la proportion de rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère (**albédo**), mais aussi de l'absorption du rayonnement terrestre par l'atmosphère (**effet de serre**).

Plus l'albédo est élevé, plus le rayonnement solaire est réfléchi et moins la surface de la Terre reçoit d'énergie thermique. Aujourd'hui, l'albédo terrestre est environ égal à 30% ($\alpha = 0,3$).

Si une partie du rayonnement émis par la Terre n'était pas absorbée par l'atmosphère (principalement dans le domaine des infrarouges), la température à la surface serait d'environ $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Cette absorption essentiellement due à la présence d'eau H_2O et de dioxyde de carbone CO_2 dans l'atmosphère s'appelle **l'effet de serre**. Elle permet à la surface de la Terre de récupérer une partie de l'énergie qu'elle rayonne, contribuant ainsi à son réchauffement jusqu'à une température moyenne de $15\text{ }^\circ\text{C}$.

Exercices : n°33,42,51 p446/449

3) Transfert thermique conducto-convectif :

ACTIVITÉ 3

a – Loi de Newton :

Considérons un système incompressible en contact avec un fluide (liquide ou gaz) dont la température est constante. Le milieu extérieur est appelé « **thermostat** » car sa température reste constante quel que soit les échanges thermiques avec le système. Dans ce cas, le système subit un transfert thermique régit par la **loi de Newton** :

Modélisation du transfert thermique conducto-convectif

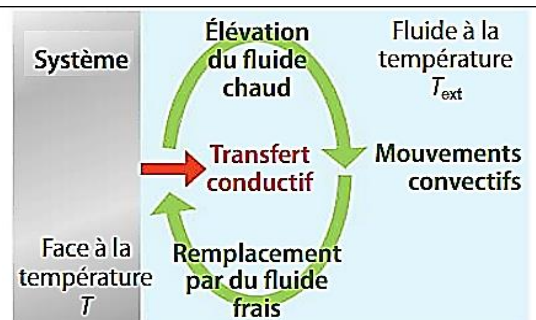
Sur l'une de ses faces à la température T , un système en contact avec un fluide dont la température est T_{ext} , échange de l'énergie thermique avec le fluide par **conduction** (contact fluide-face) et par **convection**.

Ce transfert conducto-convectif est modélisé par la **loi de Newton** :

La puissance thermique (ou flux) conducto-convective transférée à travers la surface d'aire S du système vaut : $P_{\text{cc}} = hS_x (T_{\text{ext}} - T)$

h est le **coefficient de transfert conducto-convectif** ($\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$)

() cette loi est phénoménologique car h dépend de nombreux paramètres (rugosité de la paroi, nature du fluide ...) et ne peut être déterminé que par des mesures expérimentales.*

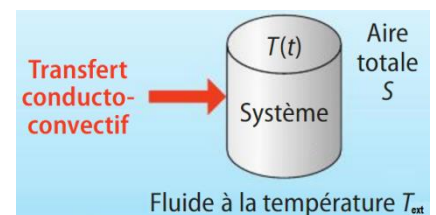


Représentation du transfert conducto-convectif : si $T_{\text{ext}} < T$ le fluide s'échauffe au contact de la face, sa masse volumique diminue, il s'élève puis il est remplacé par du fluide frais.

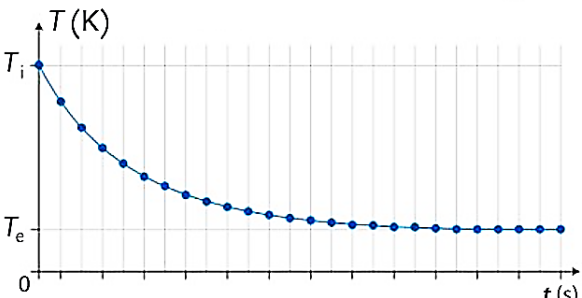
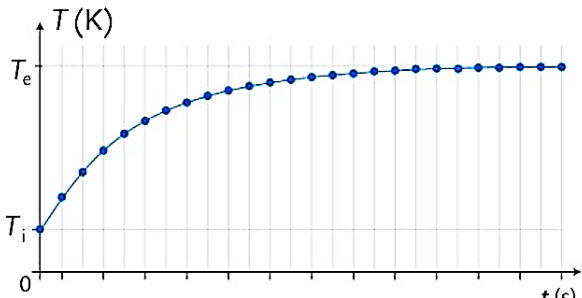
b – Evolution de la température du système :

On souhaite modéliser l'évolution de la température $T(t)$ d'un système placé dans un thermostat fluide de température T_{ext} avec lequel les échanges d'énergie se font uniquement par transfert conducto-convectif.

Le système a une masse m , une capacité thermique massique c et une aire extérieure totale S .



On peut déterminer l'expression de la fonction **T(t)** en faisant un bilan d'énergie appliqué au système :

Établissement de l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système	Détermination de la solution de l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système
<p>• D'après le premier principe de la thermodynamique, entre un état initial i et un état final f :</p> $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q \quad \text{avec} \quad Q = \Phi \times \Delta t$ <p>De plus, d'après la loi de Newton, $\Phi = h \times S \times (T_e - T)$ d'où : $Q = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$</p> <p>• On a également, pour un système incompressible de masse m dont la variation de température est ΔT :</p> $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta T$ <p>avec c la capacité thermique massique du système</p> <p>La relation devient : $m \times c \times \Delta T = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$ soit : $\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (T_e - T)$</p> <p>• Lorsque Δt tend vers zéro, la limite de $\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)$ est égale à la dérivée de T par rapport au temps t notée $\frac{dT}{dt}$.</p> <p>Il vient : $\frac{dT}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times T + \frac{h \times S}{m \times c} \times T_e$</p> <p>C'est l'équation différentielle vérifiée par la température T du système.</p>	<p>Les solutions de l'équation différentielle sont de la forme :</p> $T = K_1 \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + K_2 \quad (K_1 \text{ et } K_2 \text{ sont constantes réelles})$ <p>• Pour déterminer les constantes il faut utiliser les conditions initiale et finale sur la température :</p> <p>À $t = \infty$, la température du système est $T = T_e$ donc :</p> $T_e = K_1 \times e^{-\infty} + K_2 = K \times 0 + K_2 \quad \text{ce qui conduit à : } K_2 = T_e$ <p>À $t = 0$ s, la température du système est $T = T_i$ donc :</p> $T_i = K_1 \times e^0 + K_2 = K_1 \times 1 + T_e \quad \text{ce qui conduit à : } K = T_i - T_e$ <p>La solution de l'équation différentielle est donc :</p> $T = (T_i - T_e) \times e^{-\frac{t}{\tau}} + T_e \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{m \times c}{h \times S}$ <p>τ est appelé temps caractéristique de l'évolution de la température du système, exprimé en seconde.</p>
Allure de la courbe donnant la température d'un système en contact avec un thermostat, en fonction du temps	
<p>Refroidissement du système incompressible : $T_i > T_e$</p> 	<p>Réchauffement du système incompressible : $T_e > T_i$</p> 

Exercices : n°34,39,44,49 p446/453