

I) Transferts d'énergie thermique

I-1 Les différents modes de transfert thermique

Il existe 3 modes de transfert thermique:

- **la conduction**: qui est un transfert thermique par contact d'une source chaude vers une source froide sans transport de matière. L'agitation des molécules de la source chaude se transmet progressivement à celles de la source froide .

Par exemple une casserole est chauffée, elle transmet de la chaleur à l'eau qui voit sa température augmenter.

- **la convection**: une source chaude se déplace et fournit une énergie thermique à une source froide.

Par exemple un sèche-cheveux envoie de l'air chaud et réchauffe les cheveux, l'eau s'évapore.

- **l'émission ou la réception d'un rayonnement** (onde électromagnétique) s'accompagne d'un transfert thermique.

Le Soleil émet des rayonnements (UV, visibles infrarouges) qui réchauffe la Terre et ses habitants!

I-2 Flux thermique φ (ϕ) (vidéo)

Un degré Celsius est égal à un Kelvin (unité légale de température) $1\text{ }^\circ\text{C} = 1\text{ K}$

$$T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$$

On considère une source chaude à la température T_c et une source froide à la température T_f ($T_c > T_f$) placées de part et d'autre d'une paroi. La source chaude transfère une quantité de chaleur Q à la source froide. Ce transfert est irréversible car il ne peut se faire spontanément dans l'autre sens (de la source froide vers la source chaude).

Le flux thermique φ est le rapport de l'énergie thermique Q transférée sur la durée Δt du transfert. Ce transfert s'effectue toujours de la source chaude vers la source froide.

$$\varphi =$$

$$\text{Unités: } \varphi (\quad) = \quad ; Q (\quad), \Delta t (\quad)$$

Exercice : que signifie la valeur $\varphi = 1\text{ W}$?

Lorsque les températures T_c (source chaude) et T_f (source froide) sont constantes, le flux thermique φ est égal à la différence de température $T_c - T_f$, divisée par la résistance thermique R_{th} de la paroi:

$$\varphi =$$

Unités: φ (W) ; T_c (K ou $^\circ\text{C}$), T_f (K ou $^\circ\text{C}$) ; R_{th} le kelvin par watt ($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$) ou le degré Celsius par watt ($^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$).

Exercice: la résistance thermique d'une vitre (1 m²) est $R_{th} = 5,0 \times 10^{-3} \text{ K.W}^{-1}$; la température de la pièce est $T_c = 22^\circ\text{C}$, la température extérieure est $T_f = 2^\circ\text{C}$. Calculer le flux thermique et la chaleur perdue en 1h. Sachant qu'une énergie $E = 1 \text{ kW.h}$ coûte 15 c d'euro, calculer la dépense énergétique sur une année (6h/jour pendant les 3 mois où les différences de température sont élevées)

Exercice : comment varie le flux thermique φ lorsque la résistance thermique R_{th} augmente ?

Remarque : la résistance thermique R_{th} est inversement proportionnel à:

- la conductivité thermique λ du matériau
- la surface S du matériau traversé par le flux

R_{th} est proportionnel à l'épaisseur 'e' de la paroi. Par conséquent la valeur de la résistance thermique R_{th} d'un matériau de surface S , d'épaisseur e , et de conductivité thermique λ est :

$$R_{th} =$$

Unité: e (), S (), λ (), R_{th} ()

Quelques valeurs de conductivité thermique λ exprimée dans l'unité légale

Laine de roche GR 32 $\lambda = 0.032$

Laine de verre $\lambda = 0.038$

Liège expansé conforme norme NF EN 13170 $\lambda = 0.049$

Meulière $\lambda = 1.800$

Monomur de terre cuite 37cm $\lambda = 0.120$

Mur béton armé 2150kg/m³ $\lambda = 1.650$

Mousse de polyuréthane plaque moulée $\lambda = 0.029$

Ouate de cellulose $\lambda = 0.042$

Exercice: comparer la chaleur perdue par un mètre carré de laine de verre et de béton de même épaisseur $e = 0,24 \text{ m}$. La température extérieure est $T_f = 5^\circ\text{C}$, la température à l'intérieur de la maison est $T_c = 20^\circ\text{C}$. $R_{th}(\text{laine}) = 6,85 \text{ K.W}^{-1}$, $R_{th}(\text{béton}) = 0,24 \text{ K.W}^{-1}$. La durée du transfert est $\Delta t = 1 \text{ h}$.

II) Bilan énergétique du système Terre-atmosphère. Effet de serre.

II-1 Flux thermique surfacique

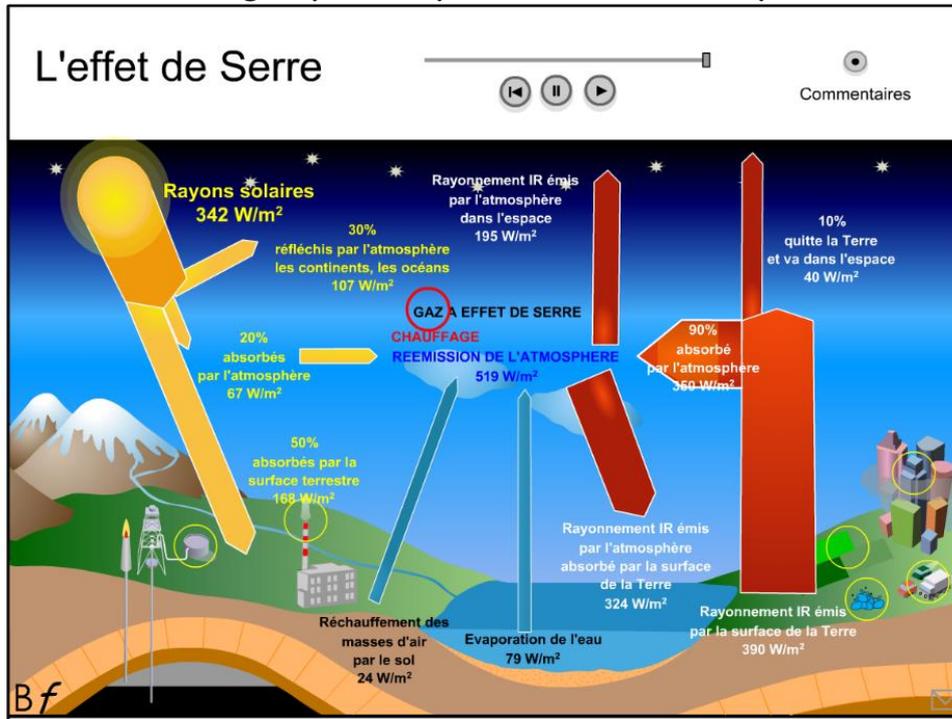
le flux thermique surfacique φ_s est égale au flux thermique échangé par un système, divisée par la surface S de réception :

$$\varphi_s =$$

Unités légales : φ en (); S en ; φ_s en ()

Exemple : le flux thermique surfacique moyen reçu par le système Terre-atmosphère de la part du Soleil vaut $\varphi_s = 342 \text{ W.m}^{-2}$. Qu'est-ce que cela signifie ?

II-2 Bilan énergétique du système Terre-atmosphère



A l'aide du document « l'effet de serre » répondre aux questions suivantes :

- 1) Quelle est le flux thermique surfacique φ_{S1} reçu en moyenne par le système Terre-atmosphère, de la part du Soleil ?
- 2) Quelle est le flux thermique surfacique φ_{S2} émis et le flux thermique surfacique φ_{S3} réfléchi par le système en direction de l'espace ?
- 3) Comparer ces 3 valeurs. Conclusion.

Le système Terre-atmosphère émet et réfléchit vers l'espace un flux thermique surfacique _____ à celui qu'il absorbe.

Exercice : appliquer le premier principe au système Terre-atmosphère, et démontrer que la variation d'énergie interne ΔU du système est nul. Que peut-on en déduire sur la température moyenne du système ?

II-3 Loi de Stefan Boltzmann

Tout corps de température T émet un rayonnement électromagnétique. La loi de Stefan Boltzmann permet d'établir une relation entre le flux thermique surfacique émis φ_S et la température T : $\varphi_S = \sigma \cdot T^4$

φ_S , flux thermique surfacique émis par un corps ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$: constante de Stefan Boltzmann

T : température du corps (K)

Exercice : à l'aide du schéma 'effet de serre', déterminer la température moyenne de la Terre en Kelvin puis en $^{\circ}\text{C}$.

II-4 L'albédo A

Une fraction du flux surfacique reçue du Soleil est réfléchi par l'atmosphère terrestre, la mer la neige etc... L'albédo A est le rapport du flux surfacique réfléchi $\varphi_S(\text{réfléchi})$ sur celui reçue $\varphi_S(\text{reçu})$. Détermine la valeur de l'albédo A du système Terre-atmosphère. à l'aide du schéma ci-contre

$$\alpha = \frac{\varphi_S(\text{réfléchi})}{\varphi_S(\text{reçu})}$$

Quelques valeurs d'Albédo

Type de surface	Albédo
Mer	0,05 à 0,15
Sable	0,25 à 0,45

Exercice : la fonte des glaces du pôle nord s'accélère. Quel en est l'impact sur la température de la Terre ?

II-5 Effet de Serre

Une partie du rayonnement émis par la terre est absorbée par l'atmosphère (principalement dans le domaine des infrarouges). Cette absorption, due essentiellement à la présence d'eau et de dioxyde de carbone, s'appelle l'effet de serre. Si l'effet de serre n'existait pas, la température moyenne de la surface terrestre serait d'environ $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Exercice : à l'aide du schéma effet de serre déterminer le flux thermique surfacique fourni par la surface de la terre à l'atmosphère. Que se passerait-il si ce flux augmentait à cause d'une augmentation du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ?

Exercice : <https://www.lelivrescolaire.fr/page/16669015>

III) Loi phénoménologique de refroidissement de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat.

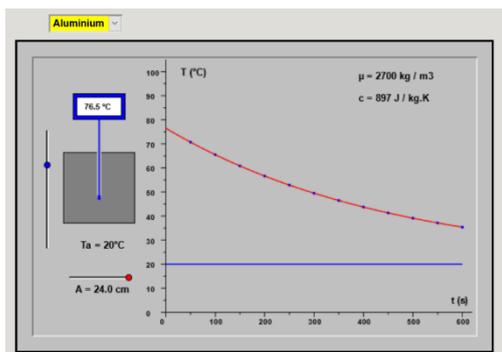
Une **théorie phénoménologique** exprime mathématiquement le résultat de l'observation d'un phénomène sans s'attarder à sa signification fondamentale¹.(wikipedia)

En thermodynamique, un **thermostat** est un système fermé (sans échange de matière avec l'extérieur) de température constante, susceptible d'être utilisé pour réaliser des **transferts d'énergie thermiques** avec un corps placé à son contact.

III-1 Modèle de la loi de Newton

Clique sur le [lien](#)

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/newton2.html>



On considère un système incompressible de température T échangeant uniquement de l'énergie thermique avec un thermostat de température T_a (un fluide, comme l'air extérieur par exemple). La loi du refroidissement de Newton indique que la vitesse de refroidissement d'un corps, dT/dt ($\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$) est proportionnelle à la différence $(T(t) - T_a)$ entre la température $T(t)$ de ce corps à l'instant t et la température T_a du thermostat.

$$dT / dt = k.(T(t) - T_a).$$

1) A quelle fonction mathématique semble correspondre l'évolution de la température du système ?

2) Changer de matériau la vitesse de refroidissement du corps est-elle modifiée ? , dT/dt varie-t-elle ?
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/newton2.html>

Cette loi, exprimée autrement, signifie que le flux thermique $\varphi(W) = \frac{dQ(J)}{dt(s)}$ échangé par le système avec le thermostat est proportionnel la différence de température entre $(T(t) - T_a)$:

$$\varphi = \frac{dQ(t)}{dt} = -h.S (T(t) - T_a)$$

avec T : température du système ($^{\circ}\text{C}$ ou K), $t(\text{s})$? , $S(\text{m}^2)$ surface du système T_a ($^{\circ}\text{C}$ ou K) température du thermostat (même unité que T), $h(\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$ coefficient de transfert thermique entre le système et le thermostat. Newton avait trouvé pour tous les corps $h = 210 \text{ SI}$

Exercice : dans quel cas le flux $\varphi > 0$? $\varphi < 0$?

Réponse : $\varphi < 0$ lorsque la température du système est $T > T_a$. En effet le transfert se fait toujours de la source chaude vers la source froide. Donc le système permet de l'énergie, il transfère une quantité de chaleur $dQ < 0$ vers la source froide. Et inversement lorsque $T < T_a$!

III-2 Etablissement de l'équation différentielle en T

Pour le système, le premier principe de la thermodynamique s'écrit : $\Delta U = W + Q = Q$
car le travail W échangé avec l'extérieur est nul.

Pour un système incompressible : $Q = m.c.\Delta T$ avec :
 c ($J.kg^{-1}C^{-1}$) capacité thermique massique du corps
 m (kg) masse du corps

Q : énergie thermique échangé par le corps avec le milieu extérieur (ici le thermostat). Lorsque la quantité de chaleur est infinitésimale cette relation s'écrit $dQ = m.c.dT$

D'après la loi de refroidissement de Newton :

$$(1) \frac{dQ(t)}{dt} = -h.S (T(t) - T_a)$$

$$\text{or } (2) dQ = m.c.dT \text{ donc } \frac{dQ(t)}{dt} = m.c.\frac{dT}{dt}$$

$$(1) = (2)$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = -h.S (T(t) - T_a) = m.c.\frac{dT}{dt}$$

$$\frac{dT}{dt} = -h.\frac{S}{m.c} \cdot (T(t) - T_a)$$

$$\frac{dT}{dt} = k \cdot (T(t) - T_a)$$

avec $k = -(h.S/m.c) = \text{constante}$

III-3 Solution de l'équation différentielle

$$\frac{dT}{dt} = k \cdot (T(t) - T_a)$$

$$\frac{dT}{dt} = k.T - k.T_a$$

Il s'agit d'une équation différentielle du premier ordre en T de la forme

$$y' = a.y + b$$

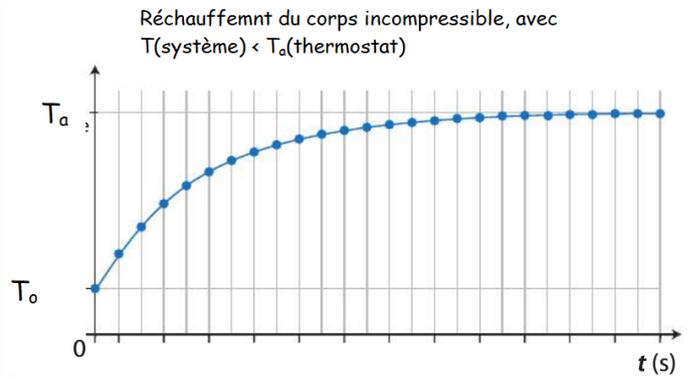
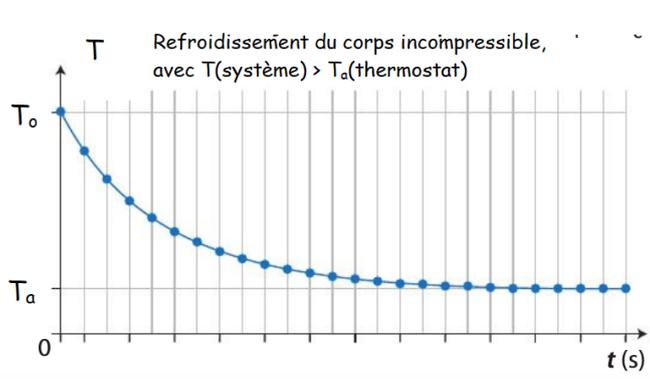
avec $y' = dT/dt$; $y = T$; $b = -k.T_a$; $a = k$

La solution de cette équation différentielle est de la forme $y = C.e^{-a.t} - b/a$

A $t = 0$, le système est à la température T_0 .

Démontrer que la solution de cette équation est $T(t) = T_a + (T_0 - T_a).exp(-k.t)$

Allure des courbes $T(t)$ dans le cas d'un réchauffement et d'un refroidissement



Exercice : démontrer, dans le cas du refroidissement, puis dans le cas de l'échauffement que, lorsque $t \rightarrow \infty$, $T \rightarrow T_a$.