

**Objectifs :**

- *Energie interne d'un système. Aspects microscopiques*
- *Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.*
- *Capacité thermique d'un système incompressible. Variation d'énergie interne .*
- *Modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement*
- *Bilan thermique du système Terre-atmosphère. Effet de serre.*
- *Loi phénoménologique de Newton modélisant un transfert thermique.*

**1. ENERGIE INTERNE D'UN SYSTEME**

**1.1 définition**

L'énergie interne est une énergie propre au système. Elle est liée aux interactions et mouvements des particules constitutives du système. Elle rassemble les différentes formes d'énergie microscopiques du système.

On peut définir l'énergie interne comme suit:

L'énergie interne d'un système thermodynamique est la somme de ses énergies cinétiques et potentielles microscopiques. On la note U.

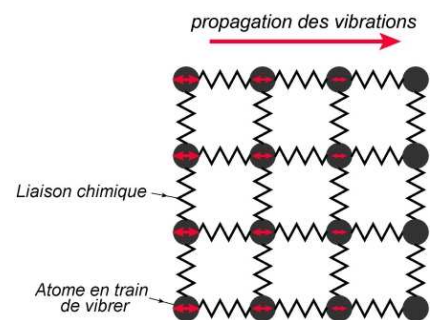
$$U = E_c + E_p$$

**1.2 Energie cinétique microscopique**

L'énergie cinétique microscopique correspond à l'agitation thermique des particules.

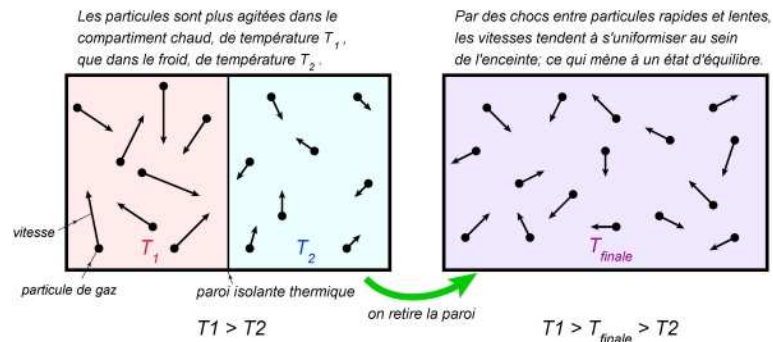
A l'échelle microscopique, chaque particule a sa propre vitesse. A la différence de l'énergie cinétique macroscopique, l'agitation thermique microscopique est désordonnée. Selon l'état physique de la matière, l'agitation thermique se présente sous différentes formes :

• **Pour les solides**, l'agitation thermique se traduit par des vibrations des atomes au sein de la matière, c'est-à-dire des mouvements de faible amplitude des atomes. Cette remarque s'applique bien aux cristaux constituant les métaux. Lorsqu'un tel matériau est chauffé, les vibrations sont transmises de proche en proche, ce qui permet d'expliquer microscopiquement la propagation de la chaleur dans les solides. Une manière imagée de se représenter cela est d'imaginer un ensemble de systèmes masse-ressort.



• **Pour les liquides**, l'agitation thermique se manifeste aussi par des vibrations, mais aussi par un mouvement des molécules les unes par rapport aux autres. Comme vu en 1ère, cela engendre l'établissement et la rupture continue de liaisons basses énergies (liaisons hydrogène ou de Van der Waals) entre les molécules du liquide.

• Pour les gaz, il n'y a pas de liaison intermoléculaire. Pour un gaz **monoatomique** (gaz rare), l'**agitation thermique correspond à l'énergie cinétique des atomes**. Cette agitation désordonnée est décrite par le modèle du **mouvement Brownien**, où les seules interactions entre particules sont les collisions qu'elles subissent entre elles. Quand un gaz chaud est mis en contact avec un gaz froid, les collisions assurent une progressive homogénéisation de la température, par un transfert d'énergie cinétique lors des chocs.



**Schématisme de l'agitation thermique dans un gaz**

Pour des gaz **polyatomiques** (diatomiques, etc.), l'agitation thermique se manifeste également via des **énergies de vibration** et de **rotation** des molécules.

D'une manière générale, quel que soit l'état physique du système, l'agitation thermique est nommée de la sorte car elle est liée à la notion de température. Autrement dit, **la température est une grandeur macroscopique rendant compte de l'agitation interne du système.**

### 1.3 Energie potentielle microscopique

L'énergie potentielle microscopique est issue de toutes les forces internes au système liées aux interactions intra et intermoléculaires.

Elle englobe l'**énergie chimique** et l'**énergie nucléaire**. Elles résultent respectivement de l'**énergie des liaisons chimiques** et de l'**énergie de masse des noyaux**. Ces énergies peuvent potentiellement être libérées (ou absorbées) lors de réactions chimiques ou nucléaires.

On peut également citer d'autres formes d'énergies potentielles microscopiques, résultant par exemple de **liaisons intermoléculaires**. Ces énergies varient lors d'un changement d'état de la matière : fusion, liquéfaction, etc.

### 1.4 Energie totale

L'énergie **globale** du système contient alors les deux composantes: **interne** et **macroscopique**.

$$E_{\text{totale}} = U + E_c + E_p$$

avec U : **Energie interne**  
 $E_c$  : énergie cinétique  
 $E_p$  : énergie potentielle

À l'échelle macroscopique:

- L'énergie cinétique est associée au **mouvement d'ensemble** du système dans un référentiel donné.
- L'énergie potentielle est associée aux **forces extérieures** dues aux interactions, sous l'effet d'un champs de **gravitation** ou d'un champ **électrique**, entre le système et son environnement.

## 1.5 propriétés de l'énergie interne

- L'énergie interne est une grandeur **extensive** (proportionnelle à la quantité de matière)
- L'énergie interne est une **fonction d'état**. Elle dépend de l'état d'équilibre thermodynamique dans lequel se trouve le système (température, pression, volume, quantité de matière).
- L'énergie interne n'est pas **mesurable**. Seule la **variation** d'énergie interne  $\Delta U$  peut être mesurée.
- U peut varier suite à des échanges de **matière** (cas des systèmes ouverts), à des processus interne au système (réactions **chimiques** ou **nucléaires**) ou à des échanges d'**énergie** avec le milieu extérieur (transfert de chaleur ou de travail)

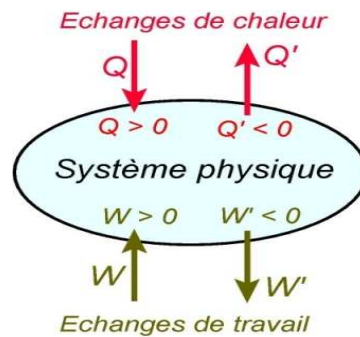
## 2. ENERGIE ECHANGEES PAR UN SYSTEME

### 2.1 convention de signe

Le système peut échanger de l'énergie avec son environnement extérieur sous deux formes :

- travail,
- chaleur.

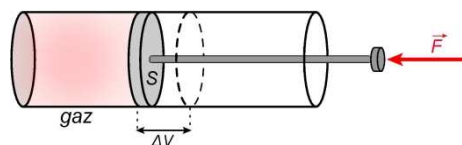
Pour comptabiliser les échanges d'énergies entre le système et son environnement, la convention est qu'une énergie **reçue** par le système est comptée positivement ; une énergie **cédée** par le système à son environnement est comptée négativement.



### 2.2 Le travail W

Un travail (en J) est une **énergie** (non thermique) **transférée d'un système à un autre**, via une « contrainte mécanique ». Ce terme concerne les **forces**. Dans ce cours, on considère les forces qui déforment le système, mais pas celles qui induisent un déplacement de celui-ci (Em conservée).

**Exemple typique** : un cylindre muni d'un piston, comprimant ou détendant un gaz.



Un opérateur exerce une force  $\vec{F}$  **constante** sur le piston. Le système { cylindre + piston + gaz contenu } **reçoit de l'opérateur un travail**  $W = - P \cdot \Delta V$ , où  $P = \frac{F}{S}$  est la pression (en Pa) induite par la force, s'exerçant sur le piston de surface  $S$  (en  $m^2$ ) et  $\Delta V$  (en  $m^3$ ) est la variation de volume du gaz contenu.

Démonstration : **à compléter**

$\Delta V < 0$  dans le cas d'une **compression**, donc  **$W > 0$**

$\Delta V > 0$  dans le cas d'une **détente**, donc  **$W < 0$**

Rq : La notion de travail est également élargie à d'autres types de contraintes, par exemple de nature électrique. On pourra alors prendre en compte le **travail engendré par un courant électrique**, dans un moteur, chauffage électrique, etc.

### 2.3 La quantité de chaleur Q

Q (en J) concerne une énergie apportée ou cédée par le système **sous forme de chaleur**.

Un transfert de chaleur correspond à une variation du **"désordre"** microscopique. **Le transfert de chaleur est directement lié à la température** : la chaleur ne peut passer que du système le **plus** « chaud » vers le système le **plus** « froid ».

Elle est transmise essentiellement par **trois processus d'échange thermique** :

- rayonnement (soleil),
- conduction thermique,
- convection

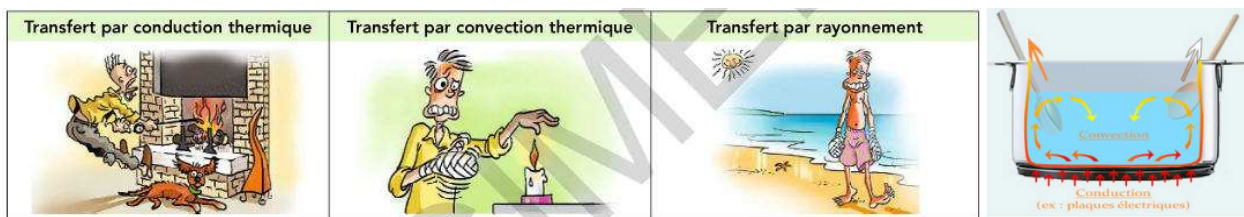
• **Par conduction** : l'agitation thermique se transmet de proche en proche dans la matière, mais **sans déplacement d'ensemble de celle-ci**. Elle se produit principalement dans les **solides**.

Exemple: casserole chauffée sur une plaque

• **Par convection** : l'agitation thermique se transmet de proche en proche dans la matière et avec **déplacement d'ensemble de celle-ci**. Elle se produit dans les **fluides**.

Exemple : sèche-cheveux (ou eau dans la casserole)

• **Par rayonnement** : l'absorption ou l'émission de rayonnement modifie l'agitation thermique. Ce mode de transfert s'effectue même dans le **vide**.



## 3. PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

### 3.1 Qu'est-ce que le premier principe de la thermodynamique ?

Le premier principe de la thermodynamique exprime la **conservation** de l'énergie de l'ensemble **{système + milieu extérieur}**.

### 3.2 Variation d'énergie interne d'un système

Si on considère un système physique fermé dont l'énergie mécanique se conserve. Alors,

$$\Delta E_{\text{totale}} = \Delta U$$

La variation d'énergie du système au cours de la réaction chimique est donc égale à la variation de son énergie interne.

Pour **respecter** le premier principe de la thermodynamique, une variation de l'énergie interne du système est balancée par une énergie échangée avec **le milieu extérieur** soit sous forme de **travail** W, soit sous forme de **chaleur** Q.

$$\Delta U = Q + W$$

### 3.3 Conséquences

- Si le système est **isolé**, c'est-à-dire s'il n'y a aucun échange avec le milieu extérieur,  $W = 0$  et  $Q = 0$ :  
 $\Delta U = 0$  : l'énergie interne reste **constante**.  
Cette propriété est celle utilisée en calorimétrie ou dans une bombe calorimétrique.
- Si la transformation est **cyclique**, le système revient à son état initial  $\Delta U = 0$ , l'énergie interne reste constante et:  $W + Q = 0$  donc  $W = -Q$
- Si le volume  $V$  est **constant** (transformation isochore) alors le travail est **nul**. D'où :  
 $\Delta U = Q$

## 4. CAPACITE THERMIQUE ET VARIATION DE L'ENERGIE INTERNE D'UN SYSTEME INCOMPRESSIBLE

### 4.1. définition

Hors changement d'état, la variation de l'énergie interne  $\Delta U$  d'un système est reliée à une variation  $\Delta T$  de la température du système par :

$$\Delta U = C \cdot \Delta T$$

$\Delta U$  : En joules (J)  
 $\Delta T$  : En Kelvin (K) ou en degrés ( $^{\circ}C$ )  
 $C$  : La capacité thermique en  $J \cdot K^{-1}$  ou  $^{\circ}C^{-1}$

Rq :

- Si la température du système augmente ( $\Delta T > 0$ ), son énergie interne **aussi** :  $\Delta U > 0$ .
- Si à l'inverse la température du système **diminue** ( $\Delta T < 0$ ), son énergie interne aussi :  $\Delta U < 0$ .
- Si le système n'échange que de la chaleur :  $\Delta U = Q$

La capacité thermique  $C$  d'un corps dans un état condensé (solide ou liquide) est l'énergie thermique qui faut lui apporter pour élever sa température **d'un degré Kelvin ou Celsius**

**Exemple:** la capacité thermique de l'eau est  $C = 4,18 \times 10^3 J \cdot K^{-1}$ . Calculer l'énergie thermique  $Q$  à apporter pour élever sa température de  $t_i = 20^{\circ}C$  à  $t_f = 100^{\circ}C$  :

à faire

### 4.2. capacité thermique massique

La capacité thermique  $C$  d'un corps est proportionnelle à sa masse  $m$  :

$$C = m \times c$$

$C$  : La capacité thermique en  $J \cdot K^{-1}$  ou  $^{\circ}C^{-1}$   
 $m$  : masse du corps en kilogramme (kg)  
 $c$  : capacité thermique massique du corps, en joule par kilogramme et par degré Celsius ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ).

La capacité thermique massique correspond à l'énergie thermique qu'il faut fournir à **un kilogramme** de corps pour élever sa température de  $1^{\circ}C$  ou 1 K.

**Exemple:**  $c$  (aluminium) =  $897 J \cdot ^{\circ}C^{-1} \cdot kg^{-1}$ ; Calculer l'énergie thermique à fournir pour élever la température d'un bloc d'aluminium de 4,5 kg de  $20^{\circ}C$  à  $800^{\circ}C$  :

à faire

## 5. TRANSFERT THERMIQUE PAR CONDUCTION

### 5.1. chaleur et flux thermique

- Entre un corps chaud à la température  $T_c$  et un autre plus froid à la température  $T_f$ , il peut se produire un transfert thermique : le corps froid **reçoit** de la chaleur tandis que le corps **chaud** cède de la chaleur.
- La puissance thermique  $P_{th}$  (ou **flux thermique** :  $\varphi$ ) est la chaleur échangée entre un corps chaud et un corps froid par **unité de temps**. C'est une grandeur positive qui s'exprime en **watt**, de symbole  $W$

$$P_{th} = \frac{Q}{\Delta t}$$

$P_{th}$  : puissance thermique (ou flux thermique  $\varphi$ ) (Watt :  $W$ )  
 $Q$  : Chaleur échangée entre un corps chaud et un corps froid (transfert thermique) en joules (J)  
 $\Delta t$  : variation de temps (en s)

#### Remarques :

Lorsque les températures  $T_c$  et  $T_f$  sont constantes au cours du temps on a aussi

$$P_{th} = \frac{T_c - T_f}{R_{th}}$$

$T_c$  et  $T_f$  en Celsius ( $^{\circ}C$ ) ou en Kelvins (K)  
et  $T_c > T_f$   
 $R_{th}$  : Résistance thermique en  $K \cdot W^{-1}$  ou  $^{\circ}C \cdot W^{-1}$

Pour avoir des flux positifs on met une barre de valeur absolue

$$P_{th} = \frac{|T_1 - T_2|}{R_{th}}$$

**Exemple:** la résistance thermique d'une vitre est  $R_{th} = 5,0 \times 10^{-3} K \cdot W^{-1}$ ; la température de la pièce est  $T_c = 22^{\circ}C$ , la température extérieure est  $T_f = 2^{\circ}C$ . Calculer le flux thermique et la chaleur perdue en 1h.  
à faire

### 5.3. Résistance thermique

#### a) En fonction du flux thermique

- Soit un corps chaud à la température  $T_c$  et un corps froid à la température  $T_f < T_c$ , séparés par une paroi plane (doc. 10).
- Un transfert thermique s'opère du corps chaud vers le corps froid, qui reçoit la chaleur  $Q$  pendant la durée  $\Delta t$ .
- Le flux thermique est proportionnel à la différence des températures  $T_c - T_f$ :

$$T_c - T_f = R_{th} \cdot P_{th} = R_{th} \cdot \frac{Q}{\Delta t}$$

$P_{th}$  : puissance thermique (ou flux thermique :  $\varphi$ ) (Watt :  $W$ )  
 $Q$  : Chaleur échangée entre un corps chaud et un corps froid (transfert thermique) en joules (J)  
 $\Delta t$  : Variation de temps (en s)  
 $T_c - T_f$  = différence de température en K ou  $^{\circ}C$   
 $R_{th}$  : Résistance thermique en  $K \cdot W^{-1}$  ou  $^{\circ}C \cdot W^{-1}$

**Remarque:**

- Cette loi est analogue à la loi d'Ohm en électricité

- plus la résistance thermique est importante plus le flux thermique est faible car  $\varphi = \frac{T_c - T_f}{R_{th}}$ . Or  $\varphi = \frac{Q}{\Delta t}$ , donc plus la résistance thermique est importante plus la chaleur échangée entre la source chaude et la source froide est faible. Un matériau possédant une résistance thermique élevée est un bon isolant.

**b) En fonction de la conductivité thermique**

La résistance thermique  $R_{th}$  d'une paroi plane dépend de la conductivité thermique  $\lambda$  du matériau, de son épaisseur  $e$  et de la surface  $S$  traversée par le flux

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S}$$

$R_{th}$  : Résistance thermique en  $K \cdot W^{-1}$   
 $e$  : épaisseur du matériau (m)  
 $S$  : surface traversée par le flux ( $m^2$ )  
 $\lambda$  : conductivité thermique du matériau ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

La conductivité thermique caractérise un matériau (doc. 11).

Matériau	$\lambda (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
Cuivre	400
Aluminium	250
Verre	1
Béton	1
Bois	0,1

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

**Remarque :**

Lorsque plusieurs parois sont accolées, la résistance thermique totale est égale à la somme des résistances thermiques de chaque paroi. On peut écrire :

avec  $R_{th-tot} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3} + \dots$

*Rq : loi analogue en électricité pour des résistances en série*

Les fabricants d'isolant indiquent en général la valeur de la résistance thermique ramenée à une surface de  $1 m^2$ ; elle est alors notée R et exprimée en  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$  mais cette unité est souvent omise.

## 6. TRANSFERT THERMIQUE PAR RAYONNEMENT

### 6.1. Loi de Stefan-Boltzmann

La loi de Stefan-Boltzmann ou de Stefan (du nom des physiciens Jožef Stefan et Ludwig Boltzmann) définit la relation entre le rayonnement thermique et la température d'un objet considéré comme un corps noir. Pour un corps noir, l'énergie totale émise est :

$$E = \sigma T^4$$

E : Energie totale émise ( $\text{W.m}^{-2}$ )

T : température (K)

$\sigma$  = Constante de Stefan Boltzman  $5.7 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

### 6.2. RAPPELS : Le modèle du corps noir

- Un corps noir est un objet théorique qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit (d'où son nom) et qui émet toutes les longueurs d'ondes lorsqu'il est chauffé.
- Son spectre d'émission est continu et ne dépend que de la température.

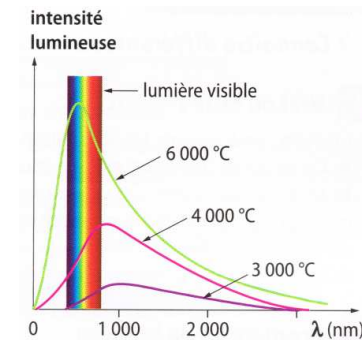


Fig. 1 : Profil spectral du corps noir

### 6.3 RAPPELS : La loi de Wien (loi du déplacement de Wien)

En 1893, Wilhelm Wien (1864 – 1928) montre expérimentalement que le spectre continu du rayonnement thermique, émis par un corps à la température T, a une intensité maximale pour une longueur d'onde  $\lambda_{\text{max}}$  qui est donnée par :

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,98 \cdot 10^{-3}}{T}$$

$\lambda_{\text{max}}$  : Longueur d'onde max en mètres (m).

T : température en Kelvins (K)

#### Remarques :

- La température s'exprime en kelvin (symbole : K). La relation entre la température T en kelvin (symbole : K) et la température  $\theta$  en degrés Celsius (symbole : °C) est :  $T = \theta + 273,15$

## 6.4. Température d'équilibre à la surface d'une planète

### 6.4.1. Définition

- La température d'équilibre à la surface d'une planète est la température théorique d'une planète considérée comme un **corps noir** et dont la seule source de chaleur serait l'étoile parente.
- Dans ce modèle, la présence ou absence d'une atmosphère (et donc de tout **effet de serre**) n'est pas considérée et l'on remplace la surface de la planète par une **surface idéalisée**.

### 6.4.2. Pour la Terre

S'il n'y avait ni atmosphère ni océan, mais seulement une terre solide, l'équilibre thermique serait atteint quand l'énergie rayonnée dans l'infrarouge et émise vers l'espace par la terre égalerait l'énergie reçue du soleil :  $E = 240 \text{ Wm}^{-2}$

### Calcul de la température de surface de la Terre

$$E = \sigma T^4$$

$$T = \left(\frac{E}{\sigma}\right)^{1/4} = \left(\frac{240}{5.7 \cdot 10^{-8}}\right)^{1/4} = \mathbf{255 \text{ K (soit } -18^\circ\text{C) !!!}$$

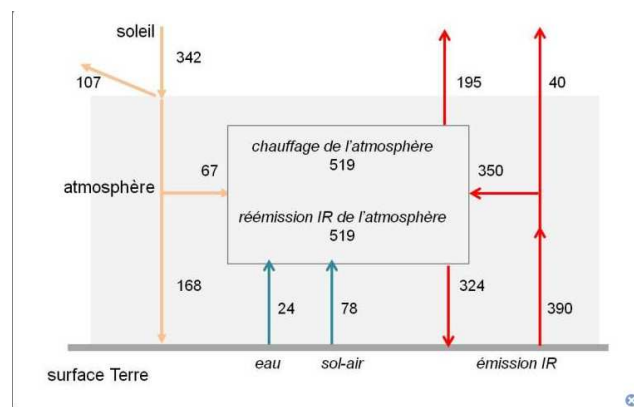
La température de surface plus élevée de la Terre (environ 15°C en moyenne) est due à l'effet de serre.

## 6.5. Bilan thermique du système Terre-atmosphère/Effet de serre

- La température sur la surface de la Terre est le résultat d'un équilibre thermique entre l'énergie qui chauffe la surface de la Terre et l'énergie que perd cette même surface.
- Il est intéressant de comprendre l'origine de ces apports et pertes de chaleur car un changement dans chacune de ces origines, qu'il soit naturel ou lié à l'homme, entraînera un nouvel équilibre thermique, et par conséquent modifiera la température moyenne sur Terre.

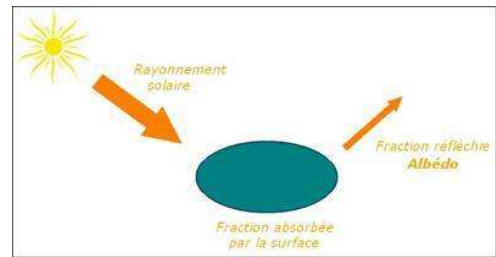
- Un bilan des flux de chaleur au niveau de la Terre et de l'atmosphère est indiqué dans la figure suivante.

Ce bilan tient compte de **l'effet de serre** (rayonnement IR absorbé par l'atmosphère et réémis vers le sol) et de **l'albédo**.

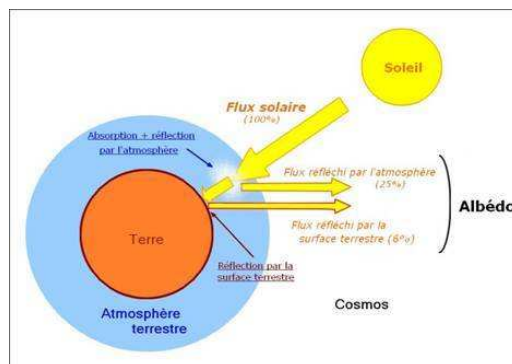


## 6.6 Influence de l'albédo sur la température terrestre moyenne

L'**albédo** est une grandeur sans dimension, représentant la fraction de l'énergie solaire globale **réfléchie** par une surface. Elle est exprimée en pourcentage ou par un chiffre compris entre **0** (toute la lumière est absorbée) et **1** (toute la lumière est réfléchie).



La Terre reçoit au total un flux solaire de  $340 \text{ W.m}^{-2}$  en moyenne. L'albédo, en réfléchissant une part importante de cette énergie ( $108 \text{ W.m}^{-2}$  soit 30%), a une influence importante sur sa température moyenne. Il se divise en deux parties : l'albédo dû **à l'atmosphère** ( $87 \text{ W.m}^{-2}$ , 25% du flux solaire total) et celui du **aux surfaces terrestres** ( $21 \text{ W.m}^{-2}$ , 6% du flux solaire total).



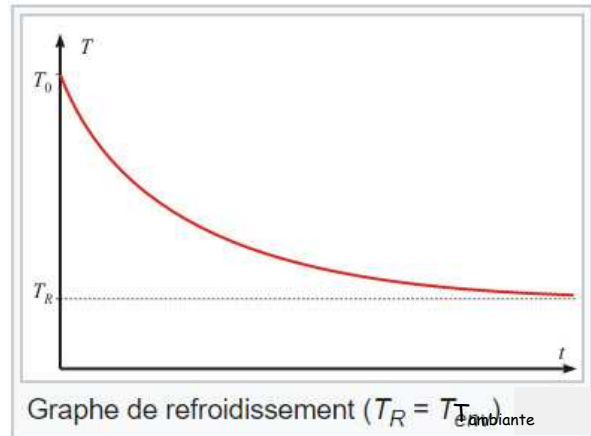
L'albédo terrestre vaut à peu près **0.3**, tous types de surfaces terrestres confondus (océan, végétation, nuages). Si la Terre était par exemple recouverte d'eau (albédo faible d'à peu près 0,08), sa température moyenne serait de **32°C** environ (contre 15°C en réalité)! Par ailleurs, si elle était totalement recouverte de glace (albédo 0,6), cette température atteint les **-52°C**.



## 7. LOI DE REFROIDISSEMENT DE NEWTON

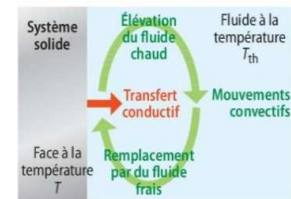
### 7.1. Enoncé

Un récipient d'eau chaude à la température  $T_0$ , placé dans une pièce à la température plus basse  $T_{\text{ambiante}}$ , va subir un transfert de chaleur de l'eau chaude vers la pièce et se refroidir. En fin de compte, l'eau se trouvera à la même température que son environnement.



Formalisme :

- l'eau chaude constitue ici un exemple de **système incompressible** (on observerait le même phénomène avec un système solide)
- l'air ambiant constitue un exemple de **thermostat** c'est-à-dire un système capable d'échanger de la chaleur avec un corps placé à son contact et dont la température reste **constante** (la mer constitue un autre bon exemple de thermostat).
- Les échanges thermiques mis en jeu sont complexes (on parle de **conducto-convection**). Ils sont modélisés par la loi de Newton.



### 7.2. Modélisation

Isaac Newton a établi un modèle du refroidissement en faisant l'hypothèse que le taux auquel l'énergie thermique est transférée d'un corps à un autre est **proportionnel** à la différence de température entre les deux corps :

$$\frac{dT}{dt} = -k \cdot (T - T_{\text{ambiante}})$$

$dT/dt$  représentant la **vitesse** de refroidissement, il est assez intuitif de penser que l'eau chaude refroidit d'autant plus vite que l'écart de température entre la boisson et l'ambiante est grande.

$k$  est une constante qui dépend de la **nature** du corps (volume, surface, matière). C'est le coefficient de **transfert** thermique.

$$\Leftrightarrow \frac{dT}{dt} = -k \cdot T + k \cdot T_{\text{ambiante}}$$

On obtient donc une **équation différentielle de la forme** :  $y' = ay + b$  avec  $a = -k$  et  $b = k \cdot T_{\text{ambiante}}$ . C'est à dire une équation différentielle du 1er ordre à coefficients constants avec un second membre constant

### 7.3. Résolution de l'équation différentielle

Equation différentielle du 1 <sup>er</sup> ordre sans 2 <sup>ème</sup> membre : $y' = ay$	Solution : $y = K e^{at}$ où $K$ est obtenue en prenant en compte les Conditions Initiales
Equation différentielle du 1 <sup>er</sup> ordre avec 2 <sup>ème</sup> membre : $y' = ay + b$	Solution : $y = K e^{at} - b/a$ où $K$ est obtenue en prenant en compte les Conditions Initiales

La résolution de l'équation différentielle, nous permet d'obtenir une décroissance exponentielle de la température en fonction du temps :

$$T = (T_0 - T_{\text{ambiante}})e^{-kt} + T_{\text{ambiante}}$$