

Terminale Spécialité Physique-Chimie	Thème : Energie et ses transferts	M.KUNST-MEDICA	
<u>Chapitre 18 : Gaz parfait et bilan d'énergie d'un système</u>		Cours livre p 305 à 307 et p 326 à 329	

Objectifs et trame du chapitre (9 séances)

I. Description d'un système thermodynamique, modèle du gaz parfait.

Cours (I- a et b)

Activité de modélisation n°16.1 : Comportement de deux gaz de nature différente (1 séance)

Capacités visées :

- Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique.
- Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz.
- Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.

Cours (I- c)

II. L'énergie interne d'un système.

Activité documentaire n°16.2 : Température et énergie interne (1 séance)

Capacités visées :

- Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.
- Prévoir le sens d'un transfert thermique

III. Le premier principe de la thermodynamique et bilan d'énergie.

Activité expérimentale n°16.3 : Étude énergétique d'un chauffe-eau électrique (2 séances)

Capacités visées :

- Distinguer, dans un bilan d'énergie, la variation de l'énergie du système et les transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.
- Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique.
- Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.
- Prévoir le sens d'un transfert thermique

IV. Modes de transferts thermiques.

Activité documentaire n°16.4 : Les modes de transferts thermiques (0,5 séance)

Capacités visées :

- Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement.

Activité documentaire n°16.5 : Résistance thermique d'une double fenêtre (Devoir maison)

Capacités visées :

- Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement.
- Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.

V. Température terrestre moyenne.

Activité documentaire n°16.6 : Température terrestre moyenne (1 séance)

Capacités visées :

- Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée. Discuter qualitativement l'effet de serre sur la température terrestre moyenne.

VI. La loi de Newton.

Cours

Activité exercice 16.7 : 14-16 p 335-336

Capacités visées :

- Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.
- Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température en fonction du temps.
- Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants.

Synthèse des activités :

Vidéo cours Stella : Étude d'un système thermodynamique

<https://www.youtube.com/watch?v=gXCwk1fR1ec>



Vidéo cours Stella : Transferts thermiques

[http https://www.youtube.com/watch?v=TsJtZB34OG0](http://https://www.youtube.com/watch?v=TsJtZB34OG0)



I. Description d'un système thermodynamique, modèle du gaz parfait.

a) Notions de base

1 - L'énergie

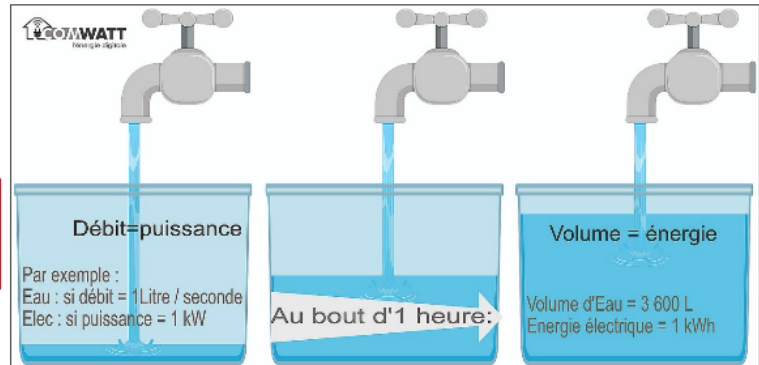
L'énergie est définie en physique comme la capacité d'un système à produire un travail, entraînant un mouvement ou produisant par exemple de la lumière, de la chaleur ou de l'électricité.

L'énergie s'exprime en joules (dans le système international d'unités) ou souvent en kilowatts-heures (kW.h ou kWh).

2 - La puissance

La puissance en W correspond à un débit d'énergie. C'est donc la quantité d'énergie délivrée en une seconde. La relation vue les années précédentes est donc :

$$E = P \times \Delta t \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} P \text{ la puissance en W} \\ E \text{ l'énergie en J} \\ \Delta t \text{ la durée en s} \end{array}$$



3 - Le rendement

Le rendement correspond au rapport de l'énergie utilisée par le système étudiée sur l'énergie consommée. On en déduit la formule :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{consommée}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{consommée}}}$$

b) Système thermodynamique

SYSTEME THERMODYNAMIQUE

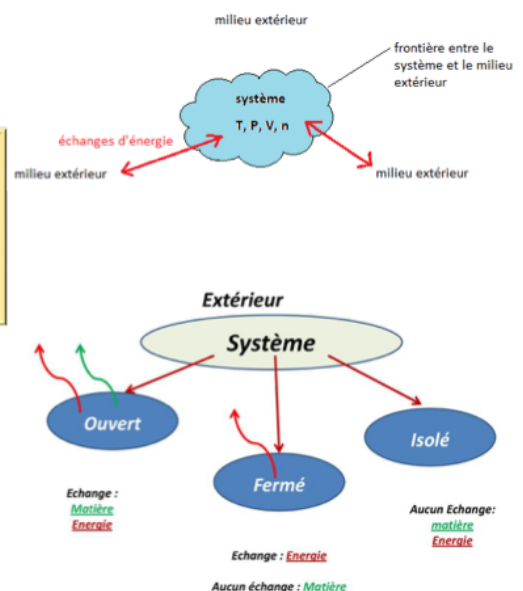
La **thermodynamique** est la branche de la physique traitant des transferts thermiques entre un **système thermodynamique** et le **milieu extérieur**.

Définition

Un système thermodynamique est une zone définie de l'espace contenant un **grand nombre d'entités chimiques** (molécules, atomes, ions) et caractérisé par sa température T (en K), sa pression P, son volume V et sa quantité de matière n. Tout le reste est alors nommé « milieu extérieur ».

Ce système thermodynamique peut être :

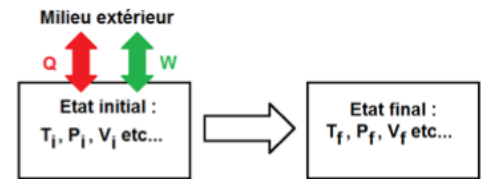
- **ouvert** s'il peut échanger de l'**énergie** et de la **matière** avec le milieu extérieur (ex : un bêcher où se déroule une transformation chimique) ;
- **fermé** s'il ne peut échanger que de l'**énergie** avec le milieu extérieur (ex : un erlenmeyer bouché où se déroule une transformation chimique) ;
- **isolé** s'il ne peut échanger ni énergie, ni matière avec le milieu extérieur (ex : l'univers).



CONVENTION DE SIGNES

Cet échange d'énergie entre le système et le milieu extérieur peut se faire de deux manières :

- le **travail** d'une force non conservative **W**;
- Un **transfert thermique Q**.



Si le système **reçoit** de l'énergie du milieu extérieur, elle est **comptée positivement** : $W > 0$ et/ou $Q > 0$.

Si le système **cède** de l'énergie au milieu extérieur, elle est **comptée négativement** : $W < 0$ et/ou $Q < 0$.



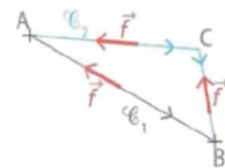
Rappels :

Une **force non conservative** est une force dont le travail dépend du chemin suivi.

Exemple :

Une force de frottement $\vec{f}$ est un exemple de force non conservative. Si sa norme f est constante, son travail sur un chemin rectiligne s'écrit : $W_{AB}(\vec{f}) = -f \times L$ où L est la longueur du parcours pour aller de A à B.

Dans l'exemple du document 2, $W_{AB}(\vec{f})$ peut s'écrire $-f \times AB$ si le trajet suivi est le chemin direct, ou $-f \times (AC + CB)$ si le trajet passe par C. Ces deux valeurs sont différentes car A, B, C ne sont pas alignés, donc $\vec{f}$ est une force non conservative.



Doc 2 Chemins $\mathcal{C}_1$ et $\mathcal{C}_2$ suivis pour aller de A à B.

Une **force conservative** est une force dont le travail entre deux points est indépendant du chemin suivi entre ces deux points : il ne dépend que de leurs positions.

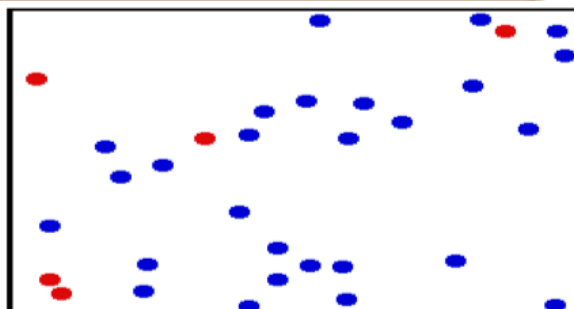
Le poids d'un objet de masse m est une force constante. Son travail d'un point A d'altitude y_A à un point B d'altitude y_B peut s'écrire :

$$W_{AB}(\vec{P}) = mg (y_A - y_B).$$

c) Modèle du gaz parfait

LE MODELE DU GAZ PARFAIT

Un gaz est composé de **molécules en mouvement** désordonné, très espacées les unes des autres et **entrent en collision avec les parois** du récipient qui contient le gaz (et entre elles).



Définition

Un **gaz parfait** est un modèle permettant de simplifier les calculs. On considère qu'un gaz est parfait si :

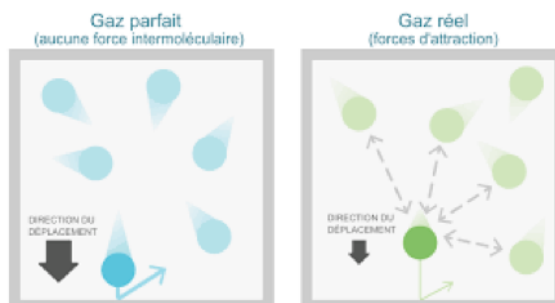
- Les entités chimiques qui le constituent (atomes, molécules) sont considérées comme étant **ponctuelles** (volume de l'entité nulle $V = 0$)
- Si on peut **négliger les interactions** (chocs, interactions électriques, interactions gravitationnelles, ...) entre les entités qui le constituent ;
- Seules les chocs entre ces entités et les parois du système seront pris en compte.

LIMITES DU MODELE DU GAZ PARFAIT

En réalité, un atome (ou une molécule) a un volume non nul qui fait qu'il (ou elle) aura forcément des chocs avec les autres.

Les interactions entre molécules ne peuvent pas toujours être négligées (ex : liaisons hydrogènes, liaisons de Van der Waals, ...).

On peut considérer un gaz comme approchant le modèle du gaz parfait seulement dans le cas d'un **gaz dilué** (peu d'entités, et éloignées les unes des autres) à de **faibles pressions**.

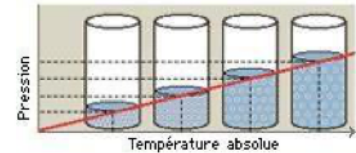
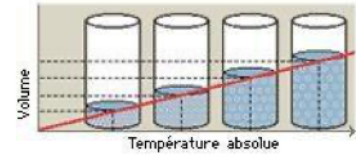
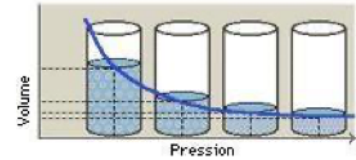


L'EQUATION DU GAZ PARFAIT

La loi des gaz parfaits permet de décrire un tel gaz :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} P : \text{pression du gaz (en Pa)} \\ V : \text{volume occupé par le gaz (en m}^3\text{)} \\ n : \text{quantité de matière du gaz (en mol)} \\ R = 8,31 \text{ J. K. mol}^{-1} : \text{constante des gaz parfaits} \\ T : \text{température (en K)} \end{array} \right.$



FORCE PRESSANTE ET PRESSION

Par ces chocs sur les parois, les molécules du gaz exercent une action mécanique sur celles-ci. Cette action mécanique est modélisée par une force nommée **force pressante**.

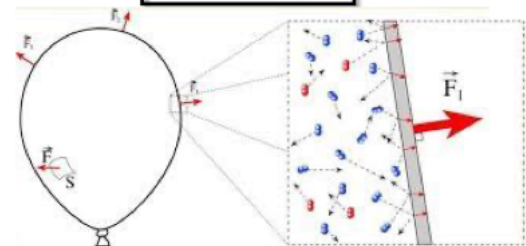
- **Direction** : perpendiculaire à la paroi
- **Sens** : du gaz vers la paroi
- **Valeur** : dépend de l'intensité du choc
- **Point d'application** : centre de la surface de contact entre le gaz et la paroi



Si la force pressante modélise l'action mécanique sur toute la surface de la paroi, on définit aussi la **pression** qui est la force pressante par unité de surface :

$$P = \frac{\|\vec{F}\|}{S}$$

Pression en Pascal (Pa) ← Force pressante en Newton (N) → Surface en m²



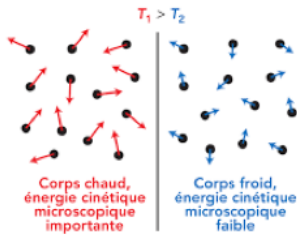
TEMPERATURE ET PRESSION

La **température T** est une grandeur qui définit un système au niveau macroscopique.

Définition

Au niveau microscopique, la température correspond à **l'agitation des molécules** qui le constituent.

Ainsi, plus les molécules ont une grande vitesse au niveau microscopique et plus la température du système au niveau macroscopique sera élevée.



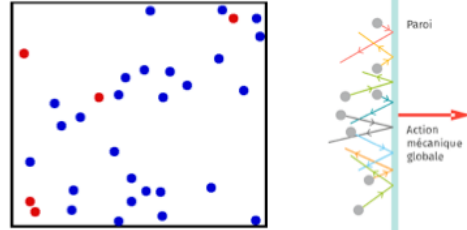
La **pression P** est une grandeur qui définit un système au niveau macroscopique.

Définition

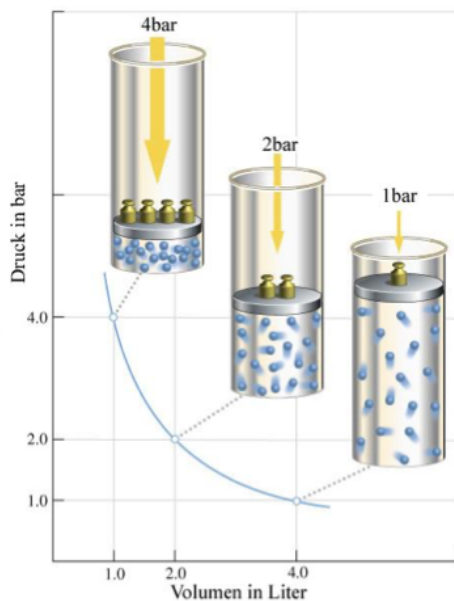
Au niveau microscopique, la pression correspond aux **chocs des molécules sur la paroi** du système.

Ainsi, la pression sera d'autant plus importante que :

- la vitesse des molécules est élevée ;
- la quantité de matière n du gaz est élevée ;



LOI DE BOYLE-MARIOTTE



A température constante et pour une quantité de matière donnée, le produit de la pression P par le volume V du gaz est constant :

$$PV = nRT \Rightarrow \boxed{PV = \text{cte}}$$

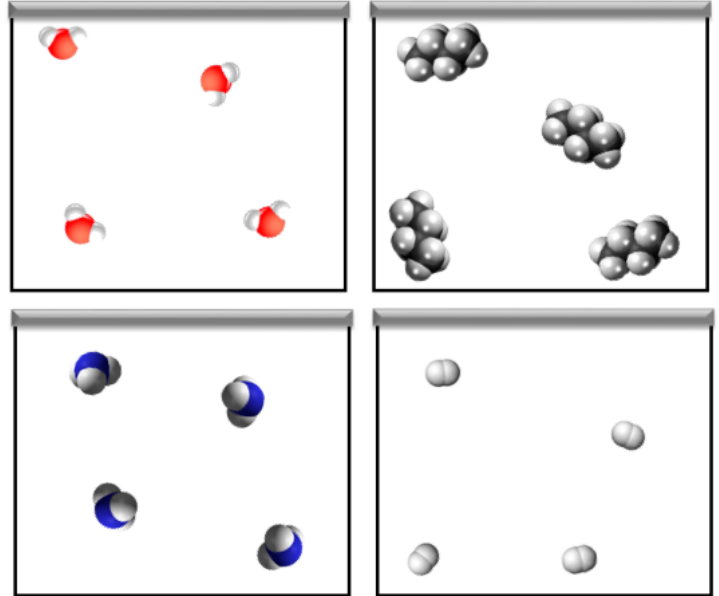
Cette loi n'est valable qu'à des faibles pressions

LOI D'AVOGADRO-AMPERE

A pression et à température données, un même nombre de molécule (ou une même quantité de matière) occupera **toujours le même volume**, quel que soit le gaz :

$$PV = nRT \Rightarrow V = \frac{RT}{P} \cdot n$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{V}{n} = \text{cte}}$$



VOLUME MOLAIRE V_m

Une mole de gaz occupe un volume de 24 litres à une température de 25°C (298 K) et à pression atmosphérique ($P_{\text{atm}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) car :

$$PV = nRT \Rightarrow \frac{V}{n} = \frac{RT}{P} \Rightarrow \boxed{V_m = \frac{V}{n} = \frac{RT}{P}}$$

$$\text{A. N : } V_m = \frac{8,31 \times 298}{1,013 \cdot 10^5} \Rightarrow V_m = 24,4 \text{ L}$$

II. L'énergie interne d'un système.

a) L'énergie interne

ENERGIE TOTALE D'UN SYSTEME

En mécanique, nous nous intéressons principalement au milieu extérieur du système qui influe sur le système (ex : forces extérieures) et aux **phénomènes macroscopiques** (visibles à l'œil nu).

En thermodynamique, nous nous intéressons aussi à l'intérieur du système et aux **phénomènes microscopiques**. Ainsi, l'énergie totale du système est :

$$E_{\text{tot}} = E_c + E_p + E_{c,\text{micro}} + E_{p,\text{micro}}$$
$$\Rightarrow \mathbf{E_{\text{tot}} = E_m + E_{c,\text{micro}} + E_{p,\text{micro}}}$$

Lorsqu'un système subit des frottements, son énergie mécanique ne se conserve pas car une partie de celle-ci est alors transférée à ses entités chimiques (ou à celles du milieu extérieur) sous forme d'énergie cinétique microscopique $E_{c,\text{micro}}$.

ENERGIE DES ENTITES

L'énergie cinétique microscopique $E_{c,\text{micro}}$ est liée à la vitesse (ou agitation) de ces entités. Au niveau macroscopique, on peut lier cette **agitation** à la **température** du système.

L'énergie potentielle microscopique $E_{p,\text{micro}}$ est liée à l'**interaction** entre ces entités :

- Interaction entre les atomes d'une même molécule (liaisons covalentes, liaisons hydrogènes intramoléculaires, ...);
- Interaction entre les molécules (ex : liaisons de Van der Waals, liaisons hydrogènes intermoléculaires,)
- Interaction entre des ions ;
- ...

ENERGIE INTERNE U D'UN SYSTEME

Définition

On nomme « énergie interne U » d'un système la somme de toutes les énergies cinétiques et potentielles de toutes les entités chimiques composant le système :

$$U = E_{c,micro} + E_{p,micro}$$

$$E_{tot} = E_c + E_p + E_{c,micro} + E_{p,micro}$$

$$\Rightarrow \boxed{E_{tot} = E_m + U}$$

Le nombre de ces entités étant gigantesque (de l'ordre de la mole : 10^{24} entités), il est impossible de connaître avec exactitude l'énergie interne U d'un système mais on peut en connaître **sa variation** :

$$\Delta E_{tot} = \Delta E_m + \Delta U$$

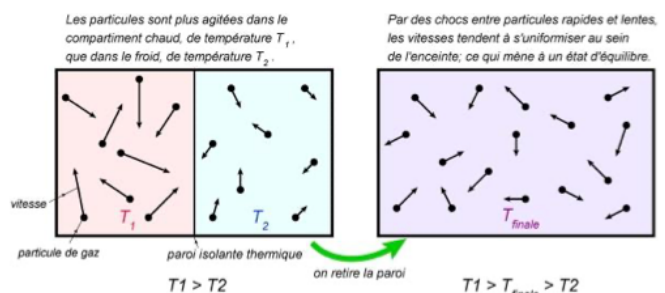
$$\Rightarrow \Delta U = \Delta E_{tot} - \Delta E_m$$

b) Variation d'énergie interne d'un système incompressible.

CAPACITE THERMIQUE C

La variation d'énergie interne d'un système a pour effet d'augmenter ou diminuer l'agitation des entités chimiques du système et ainsi, de la température du système. **Pour un système incompressible** ($V = cte$), on a ainsi :

$$\boxed{\Delta U = Q = C \cdot \Delta T} \quad \text{ou} \quad \boxed{dU = \delta Q = C \cdot dT}$$



Définition

La capacité thermique C représente sa **capacité à stocker de l'énergie interne** pour pouvoir la céder plus tard. Elle correspond ainsi à **l'énergie (W ou Q) à fournir à un système pour augmenter sa température de 1 K (ou 1 °C).**

Cette grandeur dépend de l'espèce chimique composant le système et de sa masse.

Nous connaissons la capacité thermique massique c de chaque espèce chimique. Pour l'eau liquide : $c_{eau} = 4185 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

La capacité thermique C et la **capacité thermique massique c** sont liés par la relation :

$$C = m \cdot c$$

Rappel : $T(K) = \theta(^{\circ}C) + 273,15$

CAPACITE THERMIQUE C

Exemple :

On chauffe une casserole d'eau contenant deux litres d'eau ($V = 2,0 \text{ L}$) liquide et que sa température augmente de 60°C .

1. Quel est le système considéré ? La casserole d'eau.
2. Est-il ouvert, fermé ou isolé ? Ouvert, sauf s'il y a un couvercle hermétique.
3. Calculez la variation d'énergie interne du système.

$$\Delta U = C \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta U = m \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T \Rightarrow \Delta U = \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T$$
$$\text{A.N : } \Delta U = 1,0 \times 2,0 \times 4185 \times 60$$
$$\Rightarrow \Delta U = 5,0 \cdot 10^5 \text{ J}$$

4. Quelle est l'énergie thermique reçue ou cédée par le système ? $Q = +5,0 \cdot 10^5 \text{ J}$ (énergie reçue)
5. Quel est le travail reçu ou cédé par le système ? $W = 0 \text{ J}$

III. Le premier principe de la thermodynamique et bilan d'énergie.

VARIATION D'ENERGIE INTERNE ΔU

Définition

Le premier principe de la thermodynamique stipule que, pour un système au repos ($E_m = 0$) la variation d'énergie interne d'un système est due à la somme des transferts thermiques Q entre le système et le milieu extérieur, et au travail des forces non conservatives W échangé entre le système et le milieu extérieur :

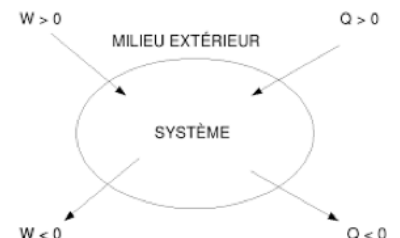
$$\Delta U = W + Q \quad \text{ou} \quad dU = \delta W + \delta Q$$

Exemple :

Si un système reçoit un travail W_1 de 100 J et une énergie thermique Q_1 de 250 J alors que, dans le même temps, ils cède un travail W_2 de 150 J et une énergie thermique Q_2 de 300 J, sa variation d'énergie interne sera de :

$$\Delta U = W_1 + W_2 + Q_1 + Q_2 \quad \text{avec} \quad \begin{cases} W_1 = +100 \text{ J} \\ W_2 = -150 \text{ J} \\ Q_1 = +250 \text{ J} \\ Q_2 = -300 \text{ J} \end{cases}$$
$$\Rightarrow \Delta U = 100 - 150 + 250 - 300$$
$$\Rightarrow \Delta U = -100 \text{ J}$$

Le système aura donc cédé 100 J au milieu extérieur.

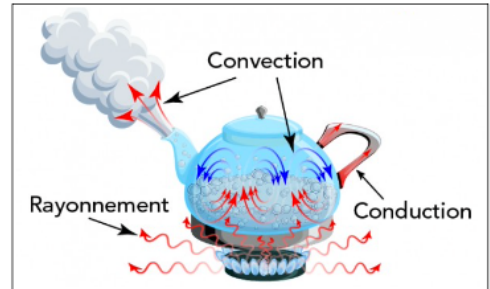


IV. Modes de transferts thermiques.

C'est un échange de chaleur d'un corps chaud vers un corps froid. Cet échange spontané ne se fait que dans le sens chaud → froid. Il est **irréversible** et a lieu jusqu'à l'équilibre des températures des deux corps.

1 – Modes de transfert thermique

- **Conduction** : transfert de proche en proche. L'agitation des atomes de l'objet chaud est transmise, par chocs, à l'objet froid. Ce mode de transfert a lieu principalement entre deux solides en contact.
- **Convection** : uniquement dans les fluides. Les différences de densité dues aux différences de température provoquent des mouvements macroscopiques dans le fluide. Ces mouvements tendent à homogénéiser la température en mélangeant le fluide froid avec le fluide chaud.
- **Rayonnement** : tout corps à une température supérieure à 0 K émet un rayonnement électromagnétique (1ère S, loi de Wien). L'absorption de ces radiations par un autre corps pourra provoquer une élévation de sa température. C'est par ce mode de transfert que le Soleil communique une partie de sa chaleur à la Terre.



2 – Flux thermique

Le flux thermique est noté P_{th} (ou Φ): c'est la puissance (en W) de l'échange d'énergie Q (en J) entre les 2 corps. Comme toujours, la puissance est l'énergie échangée par unité de temps. Donc :

$$P_{th} = \frac{Q}{\Delta t} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} P_{th} \text{ la puissance en W} \\ Q \text{ l'énergie thermique échangée en J} \\ \Delta t \text{ le temps en s} \end{cases}$$

3 – Résistance thermique

La résistance thermique R_{th} est le facteur de proportionnalité entre la différence de température $T_C - T_F (\geq 0)$ entre les deux corps et le flux thermique P_{th} :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{th}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} R_{th} \text{ la résistance thermique en } K.W^{-1} \\ T_C \text{ et } T_F \text{ les températures des systèmes en K (ou } ^\circ C) \\ P_{th} \text{ la puissance en W} \end{cases}$$

V. Température terrestre moyenne.

La température moyenne de la surface terrestre, conséquence des transferts d'énergie entre la Terre, son atmosphère et l'extérieur, peut être déterminée à l'aide d'un bilan d'énergie du système {Terre et atmosphère} et du premier principe de la thermodynamique.

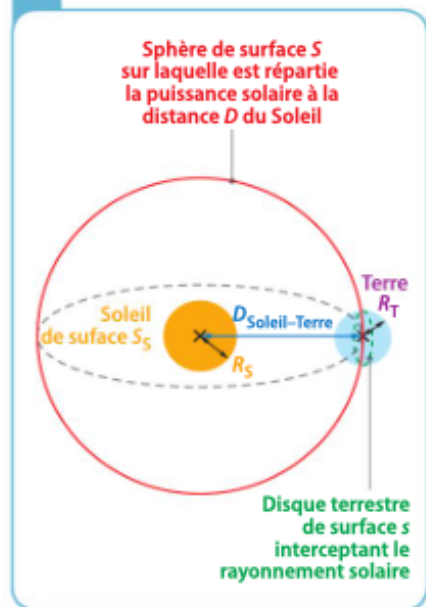
a. Bilan quantitatif d'énergie du système {Terre et atmosphère}

- Le Soleil et la Terre sont assimilés à des **corps noirs** sphériques, incompressibles, échangeant de l'énergie par rayonnement et sans échange de matière avec l'extérieur. L'effet de la Lune est négligé.
- Dans le référentiel héliocentrique (schéma B), la distance $D_{\text{Soleil-Terre}}$ et la vitesse du système {Terre et atmosphère} sont considérées comme constantes. Donc la somme des énergies macroscopiques du système (potentielle d'interaction avec le Soleil et cinétique) est constante, et le système n'échange aucune énergie par travail de force non conservative : $W = 0$.
- De plus, en régime permanent indépendant du temps, le système est à l'équilibre thermique, car sa température est également supposée constante : quels que soient les états initial et final, $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$.
- Les transferts thermiques avec l'extérieur sont : Q_T , reçu de la part du Soleil par le système ; Q_R et Q_E , renvoyés et émis par le système.

Vocabulaire

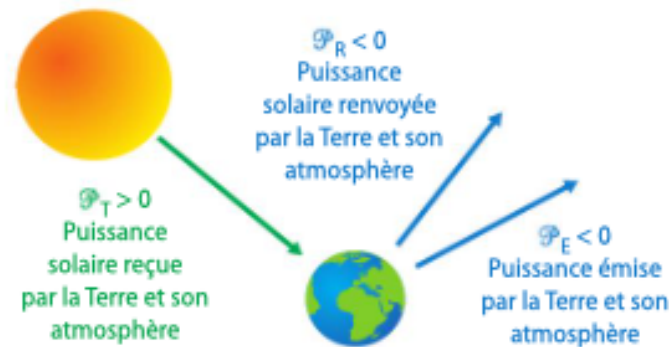
Un **corps noir** de température constante réémet tout le rayonnement qu'il absorbe.

B Répartition du rayonnement solaire



b. Application du premier principe de la thermodynamique au système {Terre et atmosphère}

- Entre un état initial et un état final, le premier principe de la thermodynamique s'écrit : $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q_T + Q_R + Q_E$
Or $\Delta U_{i \rightarrow f} = 0$, d'où : $Q_T + Q_R + Q_E = 0$
- En divisant par la durée Δt , il vient le bilan de flux ou de puissances thermiques : $\mathcal{P}_T + \mathcal{P}_R + \mathcal{P}_E = 0$.



On divise ce bilan par la surface du système pour obtenir un bilan de puissances thermiques surfaciques : $p_T + p_R + p_E = 0$.

- On considère le système {Terre et atmosphère} comme un corps noir et on utilise la loi de Stefan-Boltzmann (loi **C**) pour exprimer la puissance émise par le système en fonction de la température :

$$-p_E = \sigma \times T_T^4 \text{ avec } p_E < 0$$

On isole la température moyenne de la Terre $T_T = \left(\frac{-p_E}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$ d'où :

$$T_T = \left(\frac{p_T + p_R}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Pour déterminer la température moyenne de la Terre, il faut écrire le **bilan de puissance** du système {Terre et atmosphère}, issu du **premier principe de la thermodynamique**.

C Loi de Stefan-Boltzmann

La puissance par unité de surface ou puissance surfacique p émise par un corps noir est liée à sa température par la relation :

$$p = \sigma \times T^4$$

T en K

p en $W \cdot m^{-2}$

avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ la constante de Stefan-Boltzmann, et p comptée ici positivement.

c. Albédo et effet de serre

L'**albédo** α est une grandeur sans unité qui caractérise l'aptitude d'une surface à renvoyer, par diffusion et/ou réflexion, le rayonnement qui lui parvient :

puissance $\mathcal{P}_r$ renvoyée
par la surface S en W

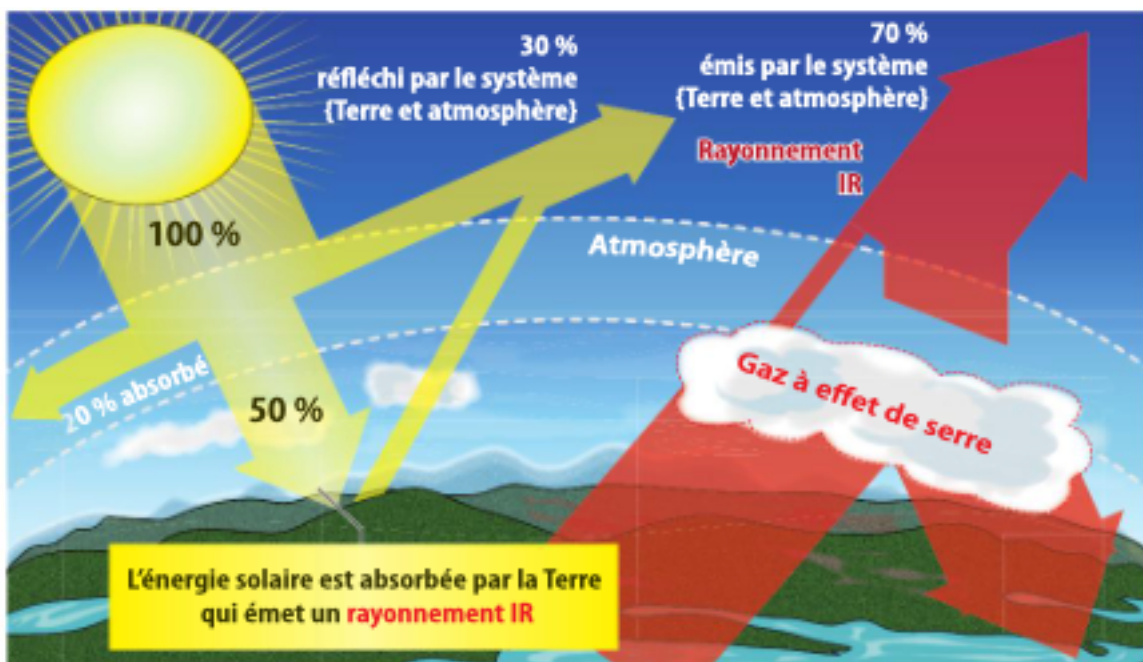
$$\alpha = \frac{|\mathcal{P}_r|}{\mathcal{P}_i}$$

puissance $\mathcal{P}_i$ incidente sur
cette même surface en W

La température terrestre moyenne actuelle est 15 °C. L'albédo et l'effet de serre ont une grande influence sur cette température (tableau **D**).

Une diminution de l'albédo du système {Terre et atmosphère} entraîne une élévation de la température terrestre moyenne.

Une augmentation de l'effet de serre entraîne une élévation de la température terrestre moyenne.



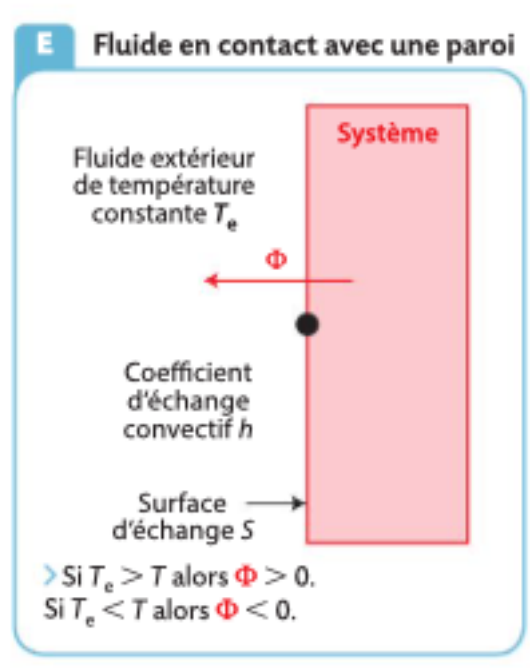
L'effet de serre est dû aux gaz de l'atmosphère (principalement l'eau et le dioxyde de carbone) qui absorbent et renvoient vers la Terre une partie des radiations infrarouges qu'elle émet.

VI. La loi de Newton.

A) Modèle de la loi de Newton

Lorsque le principal mode de transfert thermique est la **convection** dans le fluide, la **loi de Newton** modélise le flux thermique Φ à partir d'observations expérimentales. Elle relie le flux thermique convectif Φ et la différence de température ($T_e - T$) entre :

- le système dont la surface d'échange S avec le milieu extérieur a pour température T supposée uniforme ;
- le milieu extérieur de température T_e constante, appelé **thermostat**.



- Cette loi, avec les notations du schéma **E**, s'écrit :

$$\Phi \text{ en W} \quad \Phi = h \times S \times (T_e - T) = h \times S \times (\theta_e - \theta)$$

$h \text{ en } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \text{ ou } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$S \text{ en } \text{m}^2$

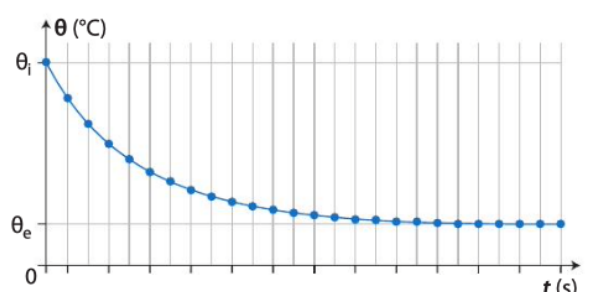
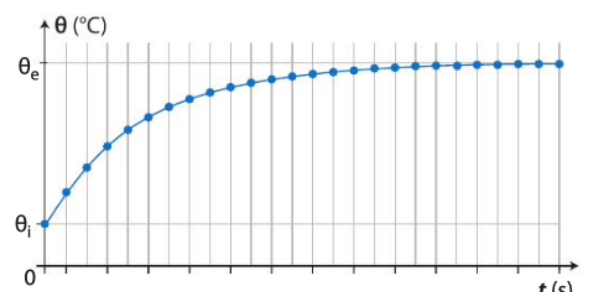
$T \text{ en K}$

$\theta \text{ en } ^\circ\text{C}$

h est le coefficient d'échange convectif entre le système incompressible et le milieu extérieur, l'un des deux étant fluide. Il dépend notamment de la nature du fluide.

B) Bilan d'énergie d'un système incompressible.

- Le système incompressible étudié à la température θ échange de l'énergie **uniquement par transfert thermique convectif** avec le thermostat ou milieu extérieur à la température θ_e **constante**, l'un des deux étant fluide.
- Ce système est au repos macroscopique sans échange de matière avec l'extérieur.
- θ_i est la température du système dans l'état initial.

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
- D'après le premier principe de la thermodynamique, entre un état initial i et un état final f : $\Delta U_{i \rightarrow f} = Q$ - Or pour une durée Δt suffisamment courte : $Q = \Phi \times \Delta t$ - De plus, d'après la loi de Newton, $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$ d'où : $Q = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t$ - On a également, pour un système incompressible de masse m dont la variation de température est $\Delta \theta$: $\Delta U_{i \rightarrow f} = m \times c \times \Delta \theta$ avec c la capacité thermique massique du système. - La relation devient $m \times c \times \Delta \theta = h \times S \times (\theta_e - \theta) \times \Delta t$ soit : $\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} \times (\theta_e - \theta)$ - Lorsque Δt tend vers zéro, la limite de $\left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t}\right)$ est égale à la dérivée de θ par rapport au temps t notée $\frac{d\theta}{dt}$. Il vient : $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta + \frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$ C'est l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système.	En mathématiques, les solutions d'une équation $y' = ay + b$ (avec $a \neq 0$) sont de la forme $y = K \times e^{ax} - \frac{b}{a}$ avec K une constante d'intégration réelle. Pour résoudre l'équation différentielle, il faut remplacer la fonction y par θ, la variable x par le temps t, la constante a par $-\frac{h \times S}{m \times c}$ et la constante b par $\frac{h \times S}{m \times c} \times \theta_e$. - Les solutions de l'équation différentielle sont de la forme : $\theta = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + \theta_e$ - Pour déterminer la constante K, il faut utiliser les conditions initiales sur la température. À $t = 0$ s, la température du système est $\theta = \theta_i$ donc : $\theta_i = K \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times 0} + \theta_e$ Or $e^0 = 1$, ce qui conduit à : $K = \theta_i - \theta_e$. - La solution de l'équation différentielle est donc : $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{a \times t} + \theta_e$ avec $a = -\frac{h \times S}{m \times c}$ $\tau = -\frac{1}{a}$ est appelé temps caractéristique de l'évolution de la température du système, exprimé en seconde.
Allure de la courbe donnant la température d'un système en contact avec un thermostat, en fonction du temps	
Refroidissement du système incompressible : $\theta_i > \theta_e$ 	Réchauffement du système incompressible : $\theta_e > \theta_i$ 

L'essentiel

Le modèle du gaz parfait et quelques limites

- Ce modèle est limité à des gaz à faible pression et dont les entités ponctuelles n'interagissent pas.
- Le volume V du gaz, sa pression P , sa température T et sa quantité de matière n sont liés par l'équation d'état :

$$P \times V = n \times R \times T$$

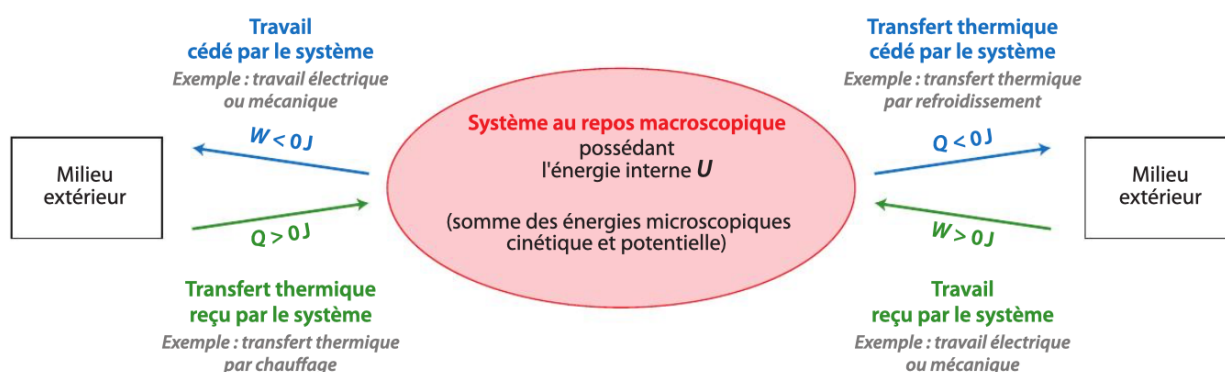
n en mol
 P en Pa
 V en m^3
 T en K
 Constante des gaz parfaits en $Pa \cdot m^3 \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$

Grandeur macroscopique	Propriété microscopique
Température T (en K)	Agitation des entités du gaz
Pression P (en Pa) faible	Peu de chocs et uniquement entre entités et parois
Masse volumique $\rho = \frac{m}{V}$ (en $kg \cdot m^{-3}$) faible	Entités éloignées les unes des autres

L'énergie interne et les modes de transfert d'énergie

Les entités microscopiques qui constituent un système possèdent de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle.

Deux modes de transfert de l'énergie :
 – le travail W
 – le transfert thermique Q



Le premier principe de la thermodynamique

Énoncé du premier principe

Variation d'énergie interne d'un système qui n'échange pas de matière avec l'extérieur, au repos macroscopique ($\Delta \mathcal{E}_m = 0$)

Somme des transferts d'énergie entre système et milieu extérieur par travail W et/ou transfert thermique Q

=

$$\Delta U_{i \rightarrow f} \text{ en J} \quad \Delta U_{i \rightarrow f} = W + Q \quad W \text{ et } Q \text{ en J}$$

Variation d'énergie interne $\Delta U_{i \rightarrow f}$

Pour un système incompressible de masse m et de capacité thermique massique c , dont la température varie :

$$\Delta U_{i \rightarrow f} \text{ en J} = m \times c \times (T_f - T_i) = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$$

m en kg
 c en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ou $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
 T en K
 θ en $^\circ C$

Le transfert thermique

Modes de transfert thermique			
	Conduction	Convection	Rayonnement
Milieu(x)	Surtout les solides	Surtout les fluides	Tous, y compris le vide
Transfert	De proche en proche	Via des courants de fluide	Via l'émission, l'absorption de photons

Flux Φ ou puissance $\mathcal{P}_{th}$ thermique

$$\Phi \text{ et } \mathcal{P}_{th} \text{ en W} \quad \Phi = \mathcal{P}_{th} = \frac{Q}{\Delta t} \quad \begin{matrix} Q \text{ en J} \\ \Delta t \text{ en s} \end{matrix}$$

Résistance thermique R_{th}

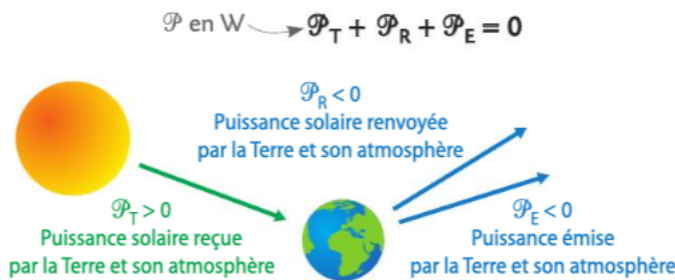
Positive, elle caractérise l'opposition d'un milieu au transfert thermique entre deux points A et B respectivement à la température T_A (ou θ_A) et T_B (ou θ_B).

$$\Phi = \frac{T_A - T_B}{R_{th}} = \frac{\theta_A - \theta_B}{R_{th}}$$

$T \text{ en K}$ $\theta \text{ en } ^\circ\text{C}$
 $\Phi \text{ en W}$ $R_{th} \text{ en K} \cdot \text{W}^{-1}$ $R_{th} \text{ en } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$

La température terrestre moyenne

Bilan radiatif terrestre issu du premier principe de la thermodynamique



Albédo α

$\mathcal{P}_r$: puissance renvoyée par la surface S en W

$$\alpha = \frac{|\mathcal{P}_r|}{\mathcal{P}_i}$$

$\mathcal{P}_i$: puissance incidente sur cette même surface en W

La température terrestre moyenne :

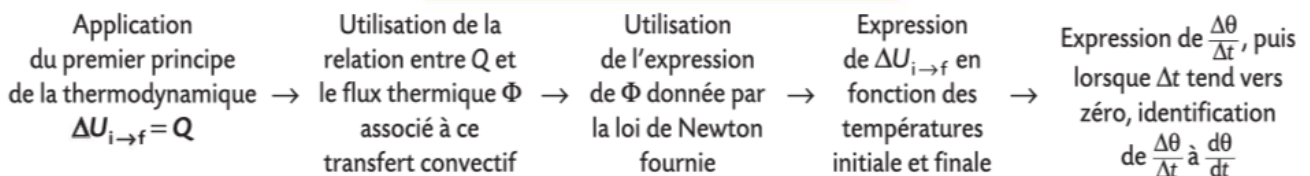
- augmente avec l'effet de serre ;
- diminue avec l'albédo.

La loi de Newton

Évolution de la température θ (ou T) d'un système incompressible en fonction du temps

Le système incompressible échange uniquement par transfert thermique convectif Q avec un milieu extérieur de température constante (thermostat), le système ou le milieu extérieur étant fluide.

Établissement de l'équation différentielle



Résolution de l'équation différentielle

