

Chapitre 11 : Thermodynamique

« La thermodynamique est une discipline étrange. La première fois que vous la découvrez, vous ne comprenez rien. La deuxième fois, vous pensez que vous comprenez, sauf un ou deux points. La troisième fois, vous savez que vous ne comprenez plus rien, mais à ce niveau vous êtes tellement habitué que ça ne vous dérange plus. »



Arnold Sommerfeld, vers 1940 (Mathématicien spécialisé dans la Physique théorique).

I) Notion de système

a) Définitions

Définitions

- La partie de l'Univers que l'on étudie est appelée **système**. Le reste de l'Univers est appelé **milieu extérieur** ou **environnement** ;

On distingue trois types de systèmes :

- Un système est dit « **ouvert** » s'il peut échanger de la matière et de l'énergie avec le milieu extérieur ;
- Un système est dit « **fermé** » s'il ne peut pas échanger de matière avec l'extérieur. En revanche, il peut échanger de l'énergie avec ce milieu extérieur ;
- Un système est dit « **isolé** » s'il ne peut pas échanger de la matière, ni de l'énergie avec le milieu extérieur.

Un système peut être :

- **Microscopique** : les phénomènes que l'on étudie se déroulent à l'échelle des atomes, des molécules ou des ions ;
- **Macroscopique** : les phénomènes étudiés concernent un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions c'est-à-dire à la matière accessible à l'échelle humaine.

→ C'est la **constante d'Avogadro** N_A qui fait le lien entre les échelles microscopique (atomes, molécules, ...) et macroscopique : à partir de cette constante d'Avogadro, on définit alors plusieurs constantes macroscopiques comme la quantité de matière n (en mol), la masse molaire atomique M (en $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$), ...

$$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Exemples :



- **Un poêle à charbon est un système ouvert** : il peut échanger de la matière avec le milieu extérieur (apport de charbon et d'air, perte de CO_2 et de fumées formées de fines particules solides). Il peut également échanger de l'énergie avec l'environnement (gain d'énergie chimique stockée dans le mélange $\text{C} + \text{O}_2$, perte d'énergie thermique vers l'extérieur).
- **Le gaz emprisonné dans un cylindre avec un piston mobile (pompe à vélo fermée) est un système fermé** : il ne peut pas échanger de matière avec le milieu extérieur mais peut recevoir du travail lorsqu'une force extérieure pousse le piston vers l'intérieur. Ce gaz peut également échanger de l'énergie thermique avec l'extérieur (gain d'énergie si on expose le système froid au soleil, perte d'énergie si on plonge le système dans de l'eau glacée).
- **L'eau emplissant une bouteille thermos avec des parois imperméables à la chaleur (pas d'échange d'énergie thermique avec l'extérieur) et de volume invariable (pas d'échange de travail) est un système isolé.**



b) La masse volumique.

La masse volumique $\rho = \frac{M}{V}$ est le quotient de la masse en kg par son volume V en m³.
Elle s'exprime en kg.m⁻³

c) La température thermodynamique.

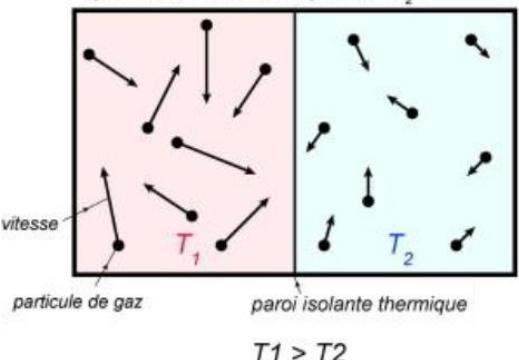
La température est une mesure macroscopique du degré d'agitation microscopique des particules du système : plus la température est élevée, plus l'agitation microscopique des particules est intense.

La température est donc une mesure d'une vitesse moyenne de l'agitation microscopique de particules élémentaires.

Les températures peuvent être repérées sur l'échelle Celsius (en C) : le 0 de l'échelle correspond à la glace fondante, le 100 à l'eau bouillante (à la pression atmosphérique normale). Elles peuvent surtout être mesurées en Kelvin (K), la température en K étant égale à la température en °C à laquelle on rajoute 273,15 K.

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

Les particules sont plus agitées dans le compartiment chaud, de température T_1 , que dans le froid, de température T_2 .



d) La pression.

Un fluide exerce sur une surface S de la paroi une force de pression \vec{F} perpendiculaire à S, dirigée vers l'extérieur et de norme $P \cdot S$, où P est par définition la pression du fluide.

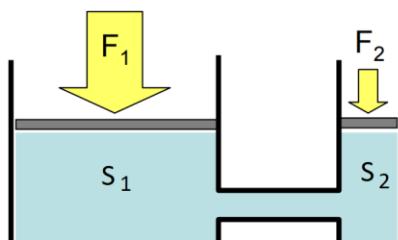
$$P = \frac{F}{S}$$

La pression s'exprime en Pascal (Pa), la force pressante (N) et la surface S (m²)

La pression se mesure en Pa (1 Pa=1 N/m²).

Les autres unités courantes sont :

- le bar (1 bar = 10⁵ Pa)
- l'atmosphère (1 atm = 101 325 Pa),
- le mm de colonne de mercure (760 mm Hg = 1 atm).



$$F_1 \cdot S_1 = P = F_2 \cdot S_2$$

Du point de vue microscopique, la pression peut se comprendre comme l'effet des chocs des particules sur les parois.

La pression est donc un effet mesurable des nombreux chocs par seconde sur la paroi.

e) Le modèle du gaz parfait.

Pour un gaz pur sous une seule phase, l'état d'équilibre du système est entièrement déterminé par trois variables thermodynamiques, par exemple n , V et T .

Le gaz parfait est un système thermodynamique idéal où l'on néglige les interactions entre particules. Pour un gaz parfait classique, l'équation d'état est : $\mathbf{P} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{T}$

P : la pression (Pa)

V : le volume (m^3)

n : la quantité de matière (mol)

T : la température absolue (K)

où $R = 8,31 \text{ J/K/mol}$ est la constante des gaz parfaits.

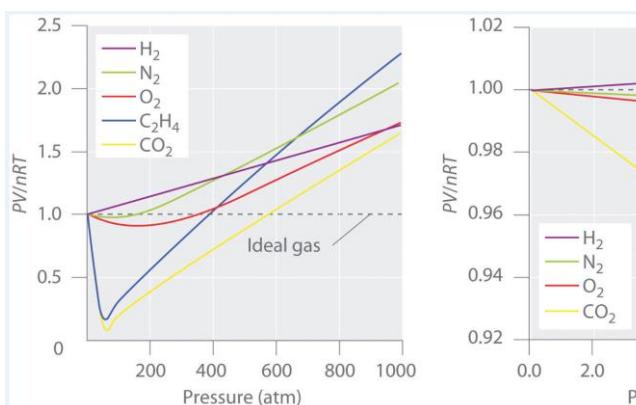
Le gaz parfait est une très bonne approximation des gaz réels usuels aux températures et pressions ordinaires.

Cependant, pour des valeurs importantes de la densité de matière, l'approximation des gaz parfaits décrit mal la réalité : la distance moyenne entre les particules diminue et les interactions entre-elles ne sont plus négligeables.

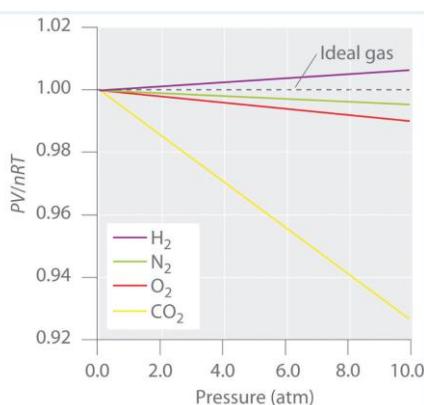
f) Limites du gaz parfait.

Pour expliquer les propriétés des fluides réels, il faut prendre en compte le volume des molécules et les forces intermoléculaires appelées forces de van der Waals qui sont des forces intermoléculaires attractives qui s'exercent sur les molécules d'un gaz.

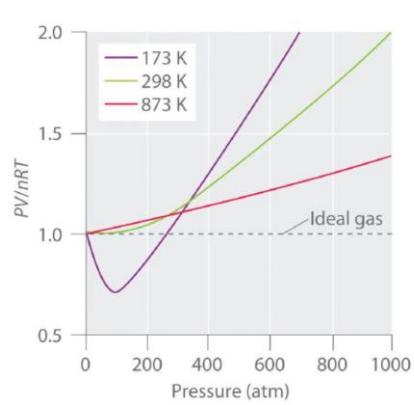
Si la pression est trop élevée ($P > 1 \text{ atm}$ ou $P > 10^5 \text{ Pa}$), le gaz ne se comporte plus comme un gaz parfait, car les molécules interagissent entre-elles.



Hautes pressions



Basses pressions



Cas du diazote à différentes températures

Interprétation des courbes

Diagramme « haute pression » : On constate que pour des pressions inférieures à 100 atm le dihydrogène et le diazote se comportent pratiquement comme un gaz parfait, mais s'éloignent rapidement du modèle dès que la pression augmente. Par contre, ce n'est pas le cas du dioxyde de carbone et de l'éthane (éthylène) qui ne se comportent jamais comme des gaz parfaits dès que la pression augmente.

On remarquera qu'à une pression de 400 atm, l'éthane C_2H_4 et le dioxygène O_2 se comportent comme des gaz parfaits.

Il en est de même pour l'éthane à 600 atm.

Diagramme « Basses pressions » : On peut considérer que le dihydrogène et le diazote, se comportent comme des gaz parfaits pour de faibles pressions (inférieures à 10 atm). Par contre, le dioxyde de carbone ne se comporte jamais comme un gaz parfait même pour des pressions légèrement supérieures à 1 atm.

Diagramme « cas du diazote » : Ce graphique rend compte de l'influence de la température sur le comportement du diazote.

On constate que pour des températures de -100°C à 25°C , le diazote à la pression de 1 atm, peut être considéré comme un gaz parfait. Par contre, à haute température 600°C , il ne se comporte pas comme un gaz parfait.

Informations pour aller plus loin (hors programme) : Ces différences de comportement sont dues aux forces intermoléculaires de Van der Waals qui sont importantes dans le cas du dioxyde carbone et de l'éthène en particulier.

II) Premier principe de la thermodynamique

1. Les transferts thermiques

Les échanges d'énergie entre un système et le milieu extérieur peuvent se produire de trois manières :

- **Échanges mécaniques** : le milieu extérieur peut exercer des forces sur le système. Si les points d'application de ces forces se déplacent, elles peuvent développer un travail W. Ce travail est algébrique. Si W est positif alors l'énergie totale du système augmente. Si W est négatif, l'énergie du système diminue ;
- **Échanges thermiques** : tout comme le système étudié, le milieu extérieur a une partie de son énergie associée à l'agitation thermique. Si l'agitation thermique de l'extérieur diminue, l'énergie du système augmente et inversement. Nous noterons Q l'échange d'énergie thermique entre l'extérieur et le système. Si $Q > 0$ alors l'énergie du système augmente ;
- **Échange d'énergie par rayonnement** : une serre reçoit de l'énergie provenant du rayonnement solaire. Son énergie totale augmente, essentiellement son énergie interne.

1.1. Définition

Définition :

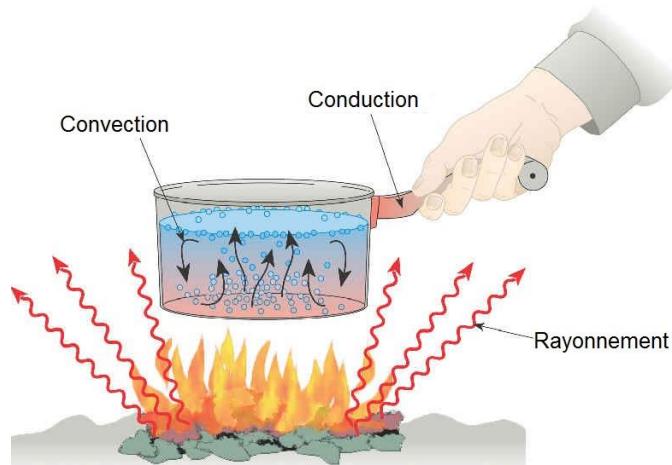
On appelle **transfert thermique**, un échange d'énergie sous forme de chaleur entre deux corps ayant des températures différentes ; **le transfert s'effectue TOUJOURS du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.**



Un transfert thermique peut avoir pour conséquence :

- Une variation de température des corps : la température du corps froid augmente, celle du corps chaud diminue jusqu'à atteindre un **équilibre thermique** ;
- Un changement d'état physique du corps sans variation de sa température.

Il existe trois modes principaux de transfert thermique :



A RETENIR :

Un transfert thermique est irréversible.

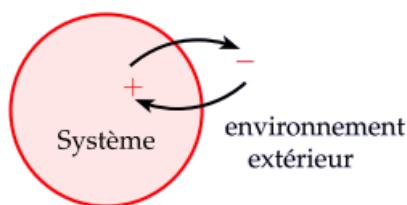
Remarques :

- La capacité thermique **C** s'exprime aussi en **joule par degré Celsius** (*symbole : J.°C⁻¹*) :

Symbole	C	c	C _m	Commentaire
Unité	J.°C ⁻¹	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹	J.mol ⁻¹ .°C ⁻¹	$c = C_m \times \frac{n}{m} = \frac{C_m}{M}$ (M = masse molaire du corps en g.mol ⁻¹)

- Par convention, l'énergie échangée est une grandeur algébrique :

- L'énergie **reçue** par un système du milieu extérieur est **positive** ;
- L'énergie **cédée** au milieu extérieur par un système est **négative**.



1.2. La convection

Les particules de matière sont en agitation permanente : dans les solides, les atomes et molécules vibrent constamment, tout comme dans les liquides et les gaz (ce qui explique les formes adaptées des liquides).

→ Plus un milieu matériel reçoit d'énergie thermique, plus cette agitation augmente. Cette agitation étant liée à la température, on parle d'**agitation thermique**.

A RETENIR :

Le phénomène de **convection** thermique s'explique par la propagation de proche en proche de l'agitation des particules dans le milieu : la convection thermique correspond, au niveau microscopique, au déplacement des particules au sein du liquide ou gaz.

1.3. La conduction thermique

C'est le seul mode de transfert thermique dans les solides.

A RETENIR :

La **conduction** thermique est le mode de transfert qui apparaît toujours dans un fluide ou un solide dès qu'il y a un gradient de température. Il s'agit d'un transfert thermique de proche en proche (sans déplacement de matière) par chocs microscopiques entre particules d'énergie différente, les particules les plus énergétiques transmettant de l'énergie cinétique à celles qui en ont moins.

1.4. Le rayonnement

Ce mode de transfert est le seul à pouvoir s'effectuer dans le vide.

A RETENIR :

Le **rayonnement** thermique, contrairement aux deux précédents, est un mode de transfert d'énergie ne nécessitant pas de milieu matériel. Le transport se fait par des ondes électromagnétiques : le corps chaud émet des photons, donc une onde qui est absorbée par le corps froid qui s'échauffe.

2. Capacité thermique

Définitions :

- La **capacité thermique** (ou capacité calorifique) est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température d'un kelvin. Elle se note **C** et s'exprime en **joule par kelvin** (*symbole : J.K⁻¹*) ;
- La **capacité thermique massique** (ou chaleur spécifique) est la quantité d'énergie à apporter (par échange thermique) pour éléver d'un kelvin la température d'un corps d'un kilogramme. Elle se note **c** et s'exprime en **joule par kilogramme-kelvin** (*symbole : J.kg⁻¹.K⁻¹*) :
$$c = \frac{C}{m}$$

$c = \frac{C}{m}$	C = capacité thermique (en J.K ⁻¹) m = masse du corps (en kg) c = capacité thermique massique (en J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
-------------------	---
- La **capacité thermique molaire** C_m est la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour éléver d'un kelvin la température d'une mole d'un corps. Elle se note C_m et s'exprime en **joule par mole.kelvin** (*symbole : J.mol⁻¹.K⁻¹*) :
$$C_m = \frac{C}{n}$$

$C_m = \frac{C}{n}$	C = capacité thermique (en J.K ⁻¹) n = quantité de matière du corps (en mol) C_m = capacité thermique molaire (en J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
---------------------	--

3. Notion d'énergie interne

Définition

- On appelle **énergie interne U** d'un système macroscopique l'ensemble de toutes les énergies stockées au niveau des particules microscopiques (énergie cinétique, électrostatique, . . .) ;

L'énergie interne **U** d'un système macroscopique (ensemble des entités microscopiques séparés du milieu extérieur par une interface) est égale à la somme de :

- l'énergie cinétique microscopique E_c (*microscopique*) de chaque particule du système. Elle est fonction de l'agitation thermique, donc de la température ;
- l'énergie potentielle d'interactions microscopiques E_P (*microscopique*) entre les particules due aux interactions gravitationnelle, électromagnétique, forte et faible entre les particules du système.

$$U = E_c \text{ (microscopique)} + E_P \text{ (microscopique)}$$

L'énergie interne d'un corps formé de molécules dépend de plusieurs facteurs :

- Elle dépend de la **température** liée à l'agitation microscopique, plus ou moins désordonnée, des molécules.
- Elle dépend de la **pression** liée à la violence des chocs.

→ A ces deux premiers facteurs correspondent une **énergie cinétique** moléculaire désordonnée.

- Elle dépend aussi de la structure du corps étudié :

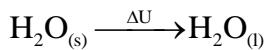
→ Structure intramoléculaire qui prend en compte les forces et les énergies de liaisons entre les atomes dans les molécules (énergie qui intervient dans les réactions chimiques comme, par exemple, les combustions).

→ Structure intermoléculaire qui intervient lorsque les liaisons et les énergies de liaison entre les molécules varient, notamment lors des changements d'état : fusion, vaporisation, sublimation et lors des transformations inverses.

Seules les variations ΔU de l'énergie interne d'un système sont mesurables et cette variation ne dépend pas des états intermédiaires mais uniquement de l'état initial et de l'état final du système.

Exemple :

L'énergie interne augmente lorsqu'on passe de la glace à l'eau liquide :



$$L_f = 333,9 \text{ J.g}^{-1}$$

Transformation endoénergétique⁽¹⁾ : $\Delta U = 6010 \text{ J.mol}^{-1}$ sous $P = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ et $T = 0^\circ\text{C}$.

⇒ À $P = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ et $T = 0^\circ\text{C}$, le milieu extérieur doit fournir 6010 J pour transformer 1 mol de glace (soit 18 g de glace) en 1 mol d'eau liquide. L'énergie interne de cette mole d'eau a varié de + 6010 joules.

A RETENIR :

Lorsqu'un système condensé (⇒ à l'état solide ou liquide) évolue d'un état initial à un état final, sans qu'il y ait changement d'état ni transformation chimique, on montre (en thermodynamique) que la variation ΔU de son énergie interne est proportionnelle à la variation de sa température ΔT entre l'état final et l'état initial :

$$\Delta U = C \times (T_{final} - T_{initial}) = C \times \Delta T$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \text{capacité thermique (en J.K}^{-1}\text{)} \\ T_{final} = \text{température de l'état final (en K)} \\ T_{initial} = \text{température de l'état initial (en K)} \\ \Delta U = \text{variation d'énergie interne (en J)} \end{array} \right.$$

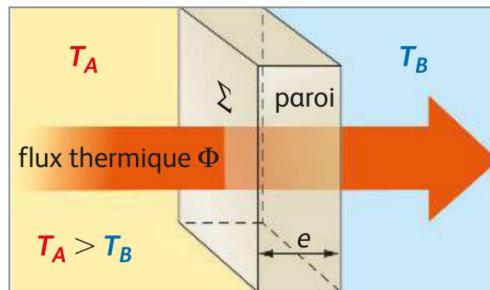
4. Flux thermique

4.1. Définition

Définitions

- La **conductivité thermique λ** d'un matériau caractérise sa capacité à conduire la chaleur : plus la valeur de λ est faible, plus le matériau est isolant ;
- Le **flux thermique Φ** (en W ou J.s^{-1}) à travers une paroi de surface S , d'épaisseur e , constituée d'un seul matériau de **conductivité thermique λ** , est proportionnel à la différence de température $\Delta T = (T_A - T_B)$ entre les deux faces :

$$\Phi = \frac{\lambda \times S}{e} \times \Delta T$$



4.2. Résistance thermique

Définitions

On nomme **résistance thermique** (noté R_{th}) la caractéristique de la paroi qui mesure sa capacité à limiter le transfert thermique. Plus une paroi est isolante, plus sa résistance thermique est grande.

On montre que la résistance thermique d'un matériau est liée au flux thermique à travers la paroi et à la différence de température entre les 2 faces du matériau par :



¹ Transformation qui se produit avec l'absorption d'énergie.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Phi}$$

$\Delta T = T_A - T_B$ = Variation de température (en K)
 Φ = Flux thermique (en W)
 R_{th} = Résistance thermique du matériau

On définit également la résistance **thermique surfacique R_s** , telle que : c'est la résistance thermique de la paroi pour une surface de 1 m^2 .

$$R_s = S \times R_{th}$$

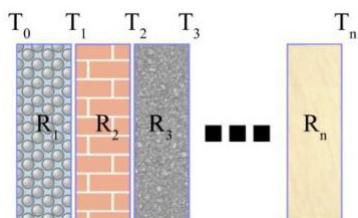
→ Un bon isolant a donc une forte résistance thermique.

Remarques :

- Le flux thermique Φ peut donc aussi s'écrire :

$$\Phi = \frac{S}{R_s} \times \Delta T \quad (\text{avec } S = \text{surface de la paroi})$$

- Dans le cas d'une paroi constituée de plusieurs couches de matériaux différents, les résistances thermiques s'additionnent.



La résistance totale de plusieurs parois accolées (ci-contre) est la somme des résistances thermiques de chaque paroi :

$$R_{totale} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

5. Bilan énergétique

Définition

Comme l'énergie mécanique E_m d'un système macroscopique résulte de l'énergie cinétique macroscopique $E_{c\ macro}$ et de l'énergie potentielle macroscopique E_{pp} , l'énergie totale E_{totale} d'un système est donc :

$$E_{totale} = E_{c\ macro} + E_{pp} + U = E_m + U$$

On a vu que l'énergie mécanique est une grandeur qui se conserve au cours du temps si le système n'est soumis qu'à des forces conservatives. Dans le cas où ces forces ne sont pas conservatives (forces pressantes dans un gaz, travail des forces de frottements, etc.), elle est égale au travail de ces forces.

A RETENIR : 1^{er} principe de la thermodynamique

La variation de l'énergie totale d'un système au cours d'une évolution est égale à la somme des transferts d'énergie dus aux travaux W , autres que ceux des forces conservatives, et des transferts thermiques Q échangés avec le milieu extérieur :

$$\Delta E_{totale} = \Delta U + \Delta E_m = W + Q$$

→ Si l'énergie du système se conserve alors : **$\Delta U = W + Q$** (1^{er} principe de la thermodynamique)

Cas d'un système isolé

Le système ne peut échanger ni matière, ni énergie avec le milieu extérieur. Néanmoins il possède déjà, en lui-même, de l'énergie.

A RETENIR :

L'énergie totale d'un système **isolé** est constante, bien que des transformations d'énergie d'un type en un autre type puissent avoir lieu à l'intérieur du système.

$$\Delta U = 0$$

Exemple : L'univers est un système isolé, son énergie totale est constante. Elle est la somme de toutes les formes d'énergie : énergie cinétique macroscopique, énergie potentielle macroscopique, énergie électrique, énergie magnétique, énergie nucléaire, énergie interne, etc.

→ Faire le **bilan d'énergie** d'un système consiste à exprimer la variation de l'énergie totale du système lors de son évolution.

Pour établir un bilan énergétique, on doit :

- Définir le système macroscopique étudié ;
- Déterminer la nature des transferts énergétiques (Travail W ou chaleur Q) entre le système et l'extérieur ;
- Déterminer le sens de ces transferts : l'énergie reçue par le système est comptée positivement, et celle cédée, négativement.

III) Bilan thermique du système Terre-atmosphère

Document 1 : Loi de Stephan de la puissance rayonnée

La loi de Stefan donne la puissance thermique (ou flux) rayonnée par un corps noir de température de surface T_s :

$$P_{th,ray} = \sigma \cdot T_s^4$$

Le flux s'exprime en W.m^{-2}

σ est la constante de Stephan $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.K^{-4}$

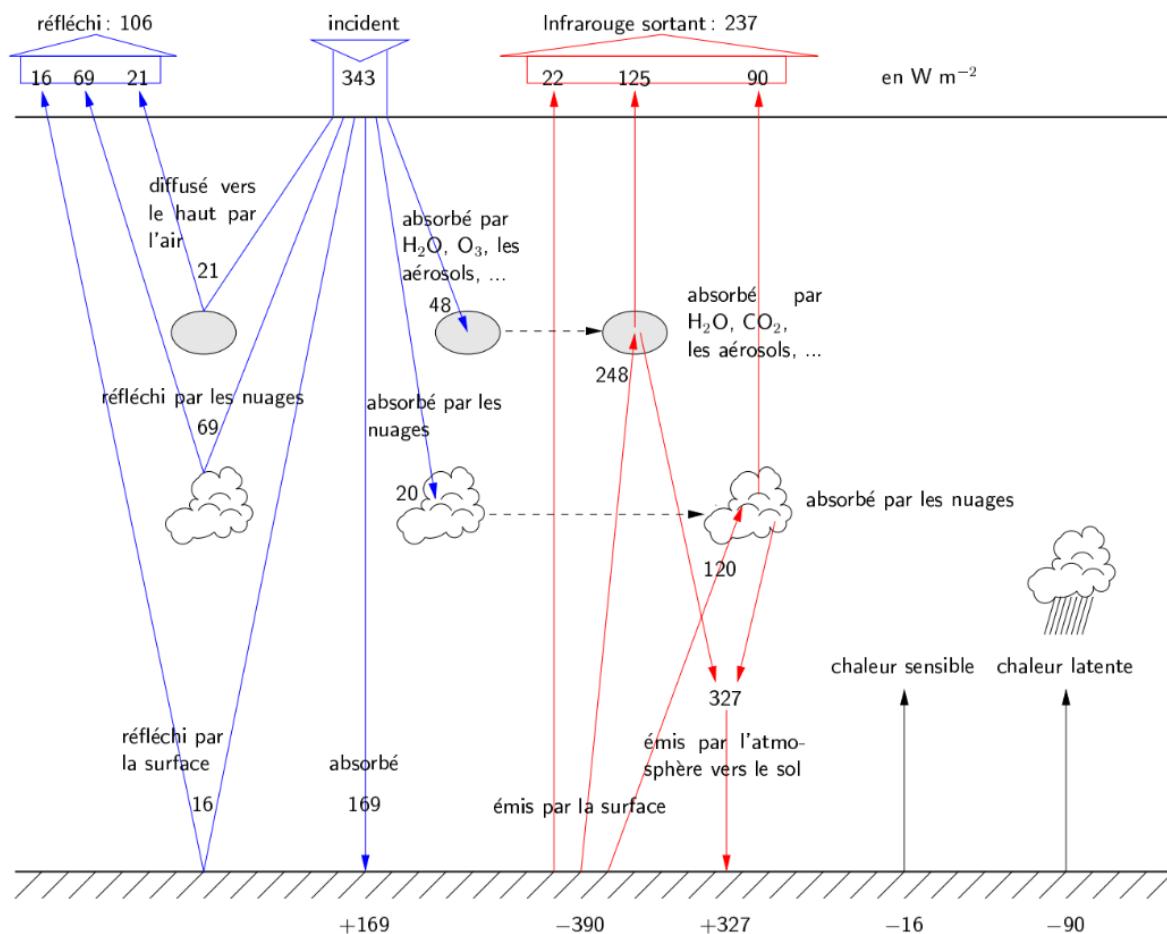
La température s'exprime en Kelvin

Document 2 : Définition d'un corps noir.

Un corps noir est un corps qui absorbe, sans la réfléchir ni la diffuser, toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit. Ainsi, une boîte avec une toute petite ouverture est généralement une bonne approximation d'un corps noir. Un tel "corps noir" reçoit de l'énergie, s'il n'en émettait pas, sa température augmenterait indéfiniment... Ceci est irréaliste, un corps noir réemet donc l'énergie qu'il a absorbée sous forme de rayonnements électromagnétiques. La quantité d'énergie réémise dépend de sa température. Ainsi, on a une "loi de rayonnement du corps noir" qui donne la valeur de l'énergie émise en fonction de la température du corps noir.

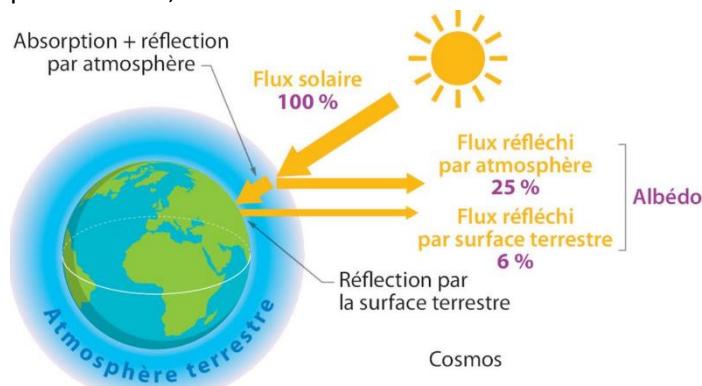
Document 3 : Bilan énergétique sur système Terre-Atmosphère

Le raisonnement du schéma suivant s'effectue sur une puissance radiative reçue sur la haute atmosphère de 343 W/m^2



Document 4 : albédo et coefficient d'absorption atmosphérique

- L'albédo du système Terre-atmosphère est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchie vers l'espace.** Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont les nuages, les surfaces de neige et de glace. L'albédo terrestre moyen vaut 0,34.
- L'atmosphère terrestre absorbe la fraction « a » du rayonnement terrestre, seule la fraction $(1 - a)$ est émise dans le cosmos.**
« a » est le coefficient d'absorption du rayonnement terrestre dans l'atmosphère : plus la quantité de gaz à effet de serre est grande dans l'atmosphère, plus a est grand. On prendra $a = 0,45$.



Document 5 : puissance reçue par une boule

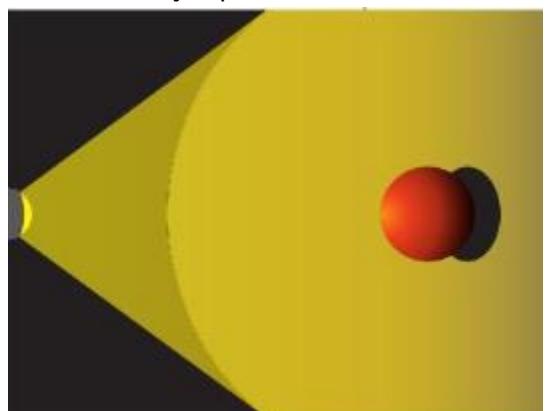
Dans l'obscurité, on braque une lampe vers un mur blanc. La puissance lumineuse reçue par le mur vaut P . Elle se répartit sur la surface d'aire S du mur éclairée par le faisceau.

On place une boule de rayon R dans

le faisceau de la lampe, au contact du mur.

L'ombre de la boule, un disque de rayon R , a pour aire s .

La puissance P'



reçue par la surface de la boule est alors une fraction de la puissance totale :

$$P' = \frac{S}{S} P$$

La puissance solaire reçue par la Terre est donnée par l'expression ci-dessus, avec $S = \pi R_T^2$, $S = 4\pi r^2$

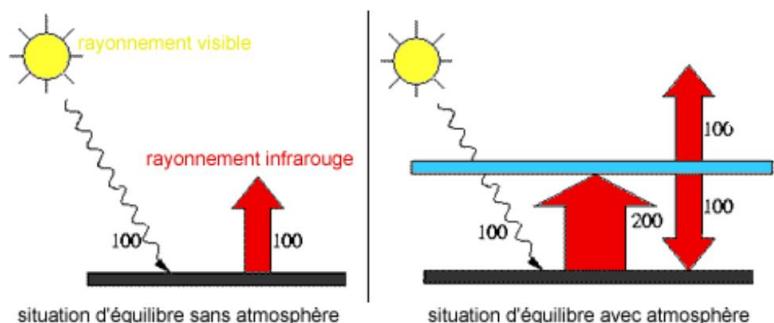
et P la puissance totale émise par le Soleil.

Document 6 : Définition de l'effet de serre.

Alors que la majorité de l'énergie solaire incidente est véhiculée dans les longueurs d'ondes visibles, la Terre émet essentiellement dans l'infrarouge. C'est ce rayonnement qui est absorbé par certains gaz de l'atmosphère, dit gaz à effet de serre. Une partie de cette énergie absorbée par l'atmosphère est renvoyée vers la surface de la Terre, ce qui augmente ainsi sa température.

Le terme d'« *effet de serre* » est employé par analogie avec ce qui se passe dans les serres des agriculteurs. L'atmosphère piège les infrarouges thermiques rayonnés par le sol de la même façon qu'une plaque de verre piège le rayonnement infrarouge émis par le sol et les plantes, augmentant ainsi la température du sol.

Malheureusement, l'analogie est trompeuse. Dans une serre, le réchauffement s'explique essentiellement par l'absence de convection (l'air chaud ne peut pas sortir) et non par l'absorption des radiations infrarouges.



Données • Rayon du Soleil : $R_S = 6,96 \times 10^8$ m • Rayon de la Terre : $R_T = 6,38 \times 10^6$ m • Distance Terre-Soleil : $r = 1,50 \times 10^{11}$ m

Bilan thermique du système Terre-atmosphère

1) Calculer la puissance émise par le Soleil sous forme de rayonnement.

$$P_{\text{ray},S} = \sigma T_S^4 \times 4\pi R_S^2 = 3,85 \times 10^{26} \text{ W}$$

2) En déduire la puissance solaire $P'_{ray,S}$ RECUE par la Terre.

$$P'_{ray,S} = \frac{\pi R_T^2}{4\pi r^2} P_{ray,i} = 1,74 \times 10^{17} \text{ W}$$

3) Calculer la puissance surfacique reçue par la Terre $p_S = \frac{P'_{ray,S}}{4\pi R_T^2}$
Est-ce en accord avec l'un des documents ?

$p_S = 340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ c'est en accord avec le document 3 qui donne 342 W/m^2

4) Calculer la puissance solaire absorbée P_a par le système Terre-atmosphère

$$P_a = (1 - A) P_{ray,i} = 1,15 \times 10^{17} \text{ W}$$

5) Exprimer la puissance rayonnée $P_{ray,T}$ par la Terre en fonction de la température moyenne de la Terre notée T_T

$$P_{ray,T} = \sigma T_T^4 \times 4\pi R_T^2$$

6) En déduire la puissance émise P_e par le système Terre-atmosphère vers le cosmos, après absorption partielle de l'atmosphère.

$$P_e = (1 - a) P_{ray,T} = (1 - a) \sigma T_T^4 \times 4\pi R_T^2$$

7) Etablir le bilan thermique à l'équilibre pour en déduire la température moyenne de la Terre notée T_T .

A l'équilibre thermique, $P_e = P_a$

$$(1 - a) \sigma T_T^4 \times 4\pi R_T^2 = P_a$$

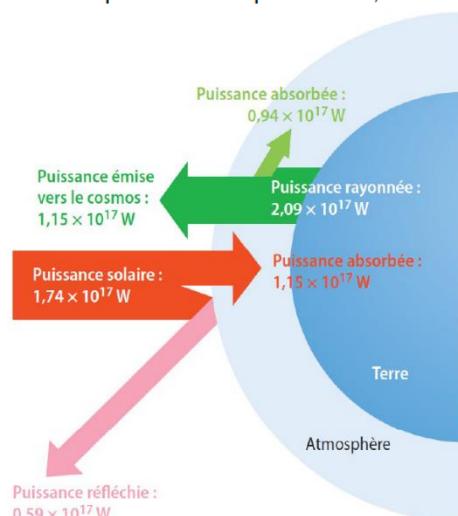
$$T_T = \sqrt[4]{\frac{P_a}{(1 - a) \sigma \times 4\pi R_T^2}} = 291 \text{ K}$$

$\theta_T = 18^\circ\text{C}$.

8) Conclusion

Faire un schéma qui indique les différents échanges énergétiques.

- On peut calculer la puissance émise et les autres puissances :
 - réfléchie : $1,74 \times 10^{17} - 1,15 \times 10^{17} = 0,59 \times 10^{17} \text{ W}$;
 - rayonnée par la surface de la Terre : $P_{ray,T} = 2,09 \times 10^{17} \text{ W}$;
 - émise vers le cosmos : $P_e = 1,15 \times 10^{17} \text{ W}$, qui est bien égale à celle absorbée venant du Soleil ;
 - et absorbée par l'atmosphère : $0,94 \times 10^{17} \text{ W}$.



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

1) Loi de « refroidissement » de Newton (loi phénoménologique).

Un thermostat est un système capable d'échanger de l'énergie sous forme de transferts thermiques sans que sa température ne soit modifiée.

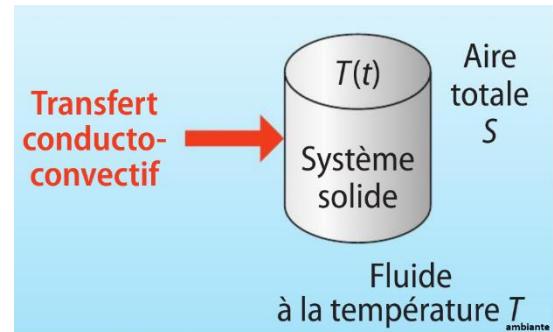
Loi phénoménologique de Newton

La loi phénoménologique de Newton permet de caractériser les échanges thermiques de nature conducto-convective d'une phase condensée (solide ou liquide) en contact avec un thermostat pendant une durée infinitésimale.

Le flux thermique (ou puissance thermique en J) conducto-convectif transféré à travers une surface S (en m^2) vaut :

$$P_{th,cc} = hS(T_{th} - T(t))$$

Avec h le coefficient de transfert conducto-convectif en $\text{W.K}^{-1}\text{m}^{-2}$, T_{th} la température du thermostat (K)



NB : on peut aussi exprimer les température en °C.

2) Mise en équation

- On plonge un corps solide (ou liquide) dans un fluide formant un thermostat de température T_{ambiante} .
 - Pendant la durée Δt , la température du corps varie de $T(t)$ à $T(t + \Delta t)$.
 - Son énergie interne vaut $\Delta U =$
 - D'après le premier principe :
- $$\Delta U = \quad \text{(car pas de travail autre que les échanges thermiques)}$$
- et on divise cette égalité par Δt ,
- On fait tendre $\Delta t \rightarrow 0$, il reste alors pour le terme de gauche la dérivée de T et $P_{th,cc} = \frac{\partial}{\partial t}$

$$\bullet \frac{dT(t)}{dt} + \frac{hs}{C} T(t) = \frac{hST_{\text{ambiante}}}{C}$$

- C'est une équation différentielle d'ordre 1 à coefficients constants et second membre constant du type $y'(t) + ky(t) = kT_{\text{ambiante}} = \text{constante}$ avec $k = hS/C$

3) Résolution de l'équation différentielle

La résolution s'effectue en deux étapes :

Etape n° 1 : Résolution de l'équation sans second membre, c'est-à-dire $\frac{dT}{dt} + k \cdot T = 0$ pour trouver la solution générale.

Etape n°2 : Détermination de la solution particulière de l'équation complète

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

Etape n° 1 : Solution générale.

Rappels mathématiques :

si $f(x) = 5x + 2$ alors $f'(x) = 5$

Réciproquement

si $f'(x) = 5$ alors $f(x) = 5x + K$
 K étant une constante à déterminer.

La primitive de $\frac{1}{x} dx$ est $\int \frac{1}{x} dx = \ln|x| + K$
 $\int \frac{1}{x} dx = \ln|x| + K$ si $x \neq 0$

Etape n° 2 : Solution particulière

Il reste à déterminer la constante A.

La solution complète de l'équation différentielle est donc :

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

Exemple :

Une barre de métal chauffée à $200^{\circ} C$ est laissée à refroidir pendant 3 minutes dans un local dont la température ambiante est de $20^{\circ} C$. On constate alors que la température de la barre est de $80^{\circ} C$. Dans combien de temps la température de la barre atteindra-t-elle $25^{\circ} C$?