φ 7 : Énergie échangée par un système au cours d'une transformation

Énergies : conversions et transferts

Plan

Capacités exigibles

Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable.
Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron ou de Watt.
Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection et rayonnement.
Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant fournie.
Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible et indilatable en contact avec un thermostat : établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la température du système.
Utiliser les expressions fournies des lois du déplacement de Wien et de Stefan-Boltzmann pour expliquer qualitativement l'effet de serre.

Documents

TD-φ 7

Exercices

Un système, initialement en équilibre macroscopique, peut subir une transformation et parvenir à un nouvel état d'équilibre (mécanique et thermique), à la suite d'interactions avec le milieu extérieur, on parle alors de **transformation thermodynamique**. Nous considérerons toujours dans ce chapitre un **système fermé** noté Σ.

I Transformations thermodynamiques

A) Transformations finies et infinitésimales

Définition 1 : Transformation finie

Une transformation est dite *finie* si les variations des grandeurs sont *macroscopiques*. Ces variations seront notées par le symbole *delta majuscule* : $\Delta p = p_\mathrm{f} - p_\mathrm{i}$, $\Delta T = T_\mathrm{f} - T_\mathrm{i}$, ...où les indices f et i signifient *final* et *initial*.

Définition 2 : Transformation élémentaire

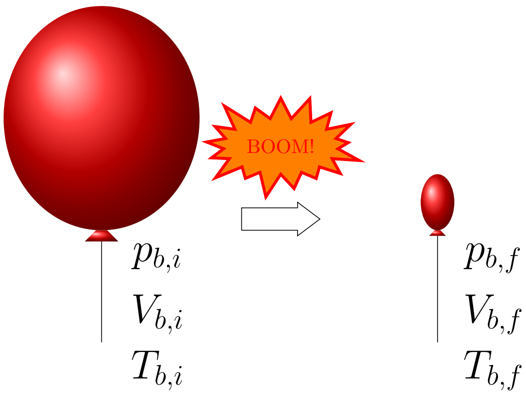
Une transformation est dite *infinitésimale* ou *élémentaire* si les variations des grandeurs sont *infinitésimales*. Ces variations seront notées par le symbole « d » de la différentielle.

Remarque

Il existe des grandeurs pour lesquelles la notion de variation n'a aucun sens. Le travail d'un force ou le transfert thermique (chaleur) reçu en sont des exemples : on ne parle pas de variation de chaleur reçue entre deux instants mais de chaleur élémentaire reçue. C'est pour signifier cette différence entre « variation élémentaire » et « grandeur élémentaire échangée » que l'on emploie ces deux symboles, respectivement d et δ, on écrira donc toujours δQ et δW.

B) Transformations brutales

On souhaite dégonfler un ballon, la première possibilité est de le faire éclater le ballon. Il y a deux états d'équilibre, l'état initial avec les variables d'état pour le ballon ($p_{b,i}$, $T_{b,i}$, $V_{b,i}$) et l'état final ($p_{b,f}$, $T_{b,f}$, $V_{b,f}$). Entre ces deux états, on ne peut définir les grandeurs p_b, T_b et V_b.



Ainsi, si on désire traduire graphiquement la transformation dans un diagramme des paramètres d'état, [a] nous ne pourrons placer que deux points : l'état initial et l'état final (Figure 1). La transformation *brutale* est qualifiée d'*irréversible* car elle ne permet pas de revenir *spontanément* en arrière (on imagine mal le ballon se reformer spontanément et récupérer le gaz qu'il contenait) [b].
Seules les grandeurs $\Delta p = p_{b,f} - p_{b,i}$, $\Delta T = T_{b,f} - T_{b^i}$ et $\Delta V = V_{b,f} - V_{b,i}$ sont accessibles.

a. Ici on a choisi les paramètres p et T mais tout autre paramètre pertinent qui permet d'expliquer la transformation peut être exploité.

b. *Attention* : ceci ne signifie pas qu'un opérateur extérieur ne puisse pas revenir en arrière : un expérimentateur suffisamment patient pourrait recoudre le ballon et isoler le gaz (par exemple si c'était de l'hélium) pour le replacer dans le ballon. Mais ce faisant, il fournirait un effort pour réaliser l'opération.

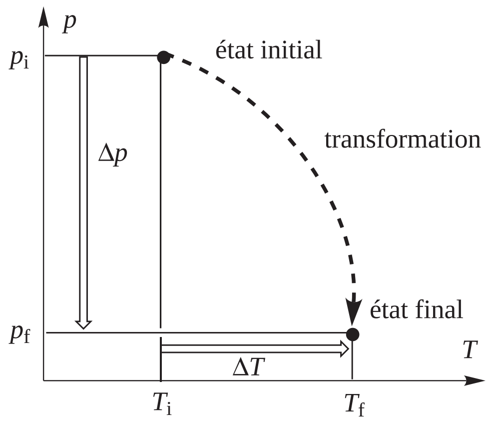
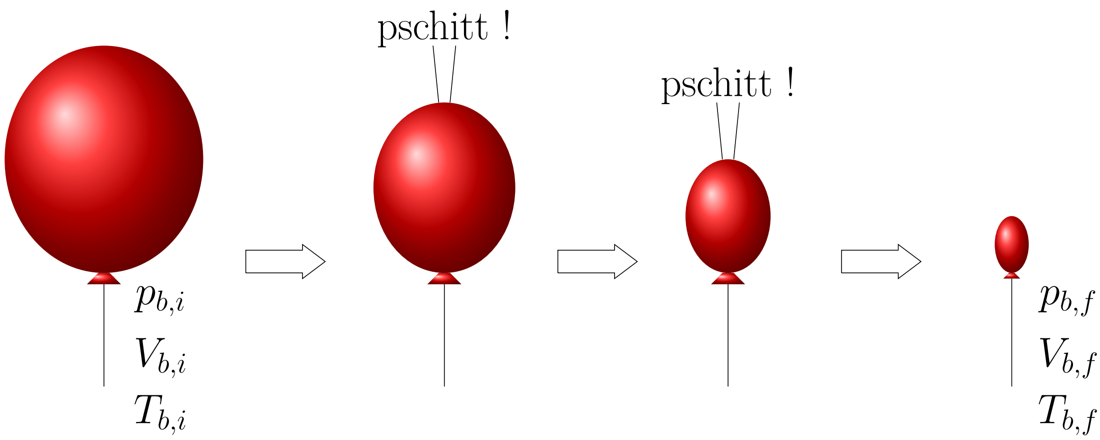


Figure 1 – Paramètres d'état lors d'une transformation irréversible brutale.

C) Transformations lentes ou quasi-statiques

On souhaite dégonfler un ballon, cette fois-ci, on fait un tout petit trou dans le ballon. Le ballon se dégonfle très lentement.



La transformation étant lente, on peut considérer que *la transformation finie est une succession de transformations infinitésimales* entre des états d'équilibre très proches les uns des autres. L'avantage d'imaginer une telle transformation est qu'on pourra définir à chaque instant les petites variations $\mathrm{d}p$, $\mathrm{d}T$, $\mathrm{d}V$, ...des paramètres du système (Figure 2), et donc *on pourra effectuer du calcul différentiel.*

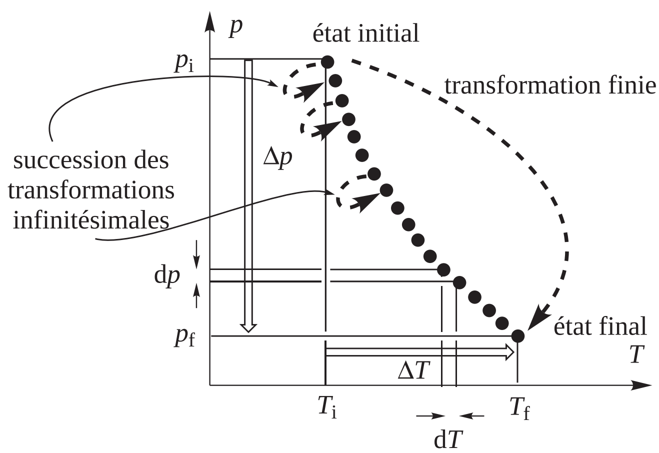


Figure 2 – Paramètres d'état lors d'une transformation lente quasistatique.

Définition 3 : Transformation quasistatique

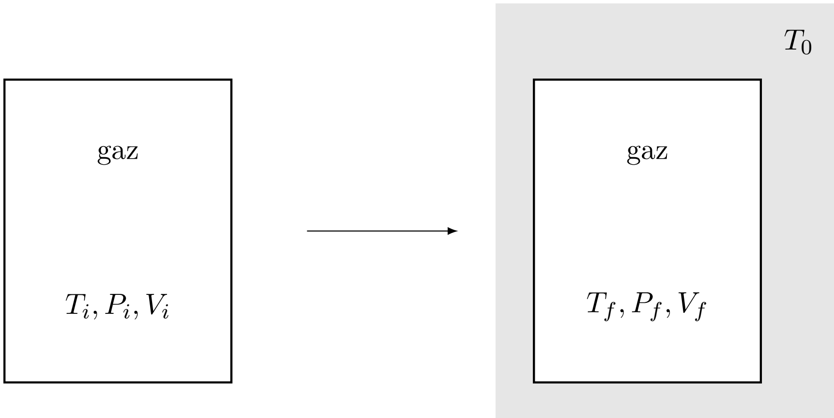
On appelle transformation quasi-statique une transformation passant d'un état d'équilibre initial A à un état d'équilibre final B de manière suffisamment lente pour que cela se fasse par une succession d'états d'équilibre infiniment voisins.

D) Transformation isochore

Définition 4 : Transformation isochore

Exemple

Soit un gaz, considéré parfait, dans un récipient indéformable de volume initial $V_i = V_f = V$. On lui fait subir une transformation isochore en le plaçant dans un milieu extérieur à la température constante égale à T_0.



La transformation est terminée quand :

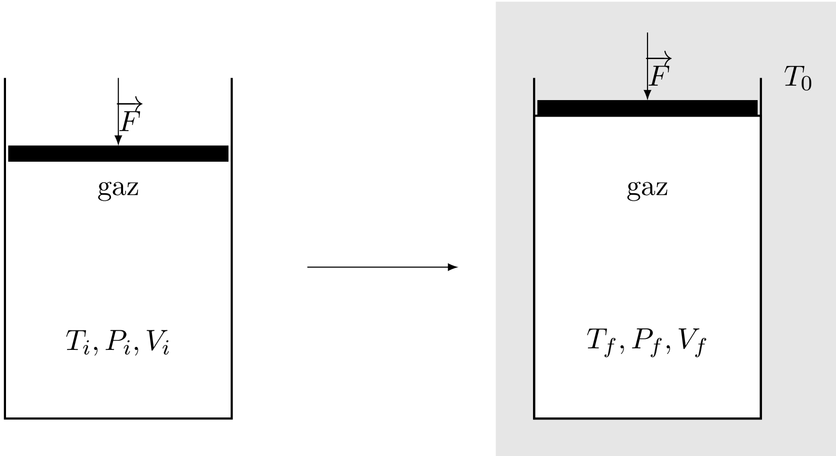
On en déduit la pression finale, grâce à l'EEGP :

E) Transformation isobare

Définition 5 : Transformation isobare

Exemple

Soit un gaz, considéré parfait, dans un récipient fermé par un piston sur lequel est exercé une force constante $\overrightarrow{F}$. On lui fait subir une transformation isobare ($P_i = P_f = P = \dfrac{F}{S}$ avec S la surface du piston) en le plaçant dans un milieu extérieur à la température constante égale à T_0.



La transformation est terminée quand :

On en déduit le volume finale, grâce à l'EEGP :

F) Transformation monobare

Définition 6 : Transformation monobare

G) Transformation isotherme

Définition 7 : Transformation monobare

H) Transformation monotherme

Définition 8 : Transformation monobare

I) Transformation adiabatique

Définition 9 : Transformation adiabatique

C'est une transformation au cours de laquelle le *système n'échange pas de chaleur* avec le milieu extérieur.

✔ Exemple

J) Principe du transfert entre un état initial et un état final

Un système **fermé** passant d'un état d'**équilibre initial** 1 à un état d'**équilibre final** 2, échange du travail mécanique $W(1 \to 2)$ et de l'énergie thermique sous forme de chaleur $Q(1 \to 2)$ avec le milieu extérieur :

— $W(1 \to 2)$: **transfert d'énergie mécanique**

— $Q(1 \to 2)$: **transfert thermique**

$W(1 \to 2)$ et $Q(1 \to 2)$ sont comptées **positivement** s'ils sont **reçus** par le système.
$W(1 \to 2) < 0$ ou $Q(1 \to 2) < 0$ signifie que le système **cède** de l'énergie (sous forme mécanique ou thermique) au milieu extérieur.

II Travail des forces de pression $W(1 \to 2)$

Nous distinguerons deux cas :

— Les transformations **quelconques** (« brutales ») pour lesquelles le travail **reçu** par le système dépend fondamentalement du milieu extérieur Σ_{ext} qui devra être soigneusement analysé,

— Les transformations **quasi-statiques** (« lentes ») pour lesquelles le travail reçu par le système peut être calculé à partir des variations des variables d'état du système Σ.

A) Transformations quelconques

A.1 Démonstration sur un exemple simple

Considérons un cylindre de section S, fermé par un piston P, d'axe horizontal $\vec{u}_x$ et contenant un gaz constituant le système Σ. Le piston est en contact avec l'atmosphère extérieure P_{ext}.

Initialement le système est dans un état d'équilibre (le piston est bloqué). On libère le piston et le système évolue jusqu'à un nouvel état d'équilibre final où le piston est immobile.

La transformation passe par des états hors équilibre et la pression du gaz n'est pas uniforme. En revanche, la pression extérieure reste constante et uniforme. Elle exerce sur le piston une force constante :

Pour calculer le travail des forces de pression exercées par le système Σ (gaz à l'intérieur du piston sur le piston lui-même), appliquons la relation fondamentale de la dynamique au piston P :

Entre t et $t+\mathrm{d}t$, le volume du gaz a varié de $S\mathrm{d}x = \mathrm{d}V$ volume élémentaire. Intégrons alors la relation (9.4) entre l'instant initial et l'instant final :

SI les frottements peuvent être négligés :

Propriété 1 : Travail constant des forces de pression

$$W(i \to f) = \int_i^f -P_{\text{ext}}\mathrm{d}V = -P_{\text{ext}}(V_f - V_i) = -P_{\text{ext}}\Delta V \qquad \textbf{(travail fini d'une force de pression)}$$

Remarque

Écrire une relation similaire au niveau infinitésimal demande plus de précautions. En effet, entre l'instant t et l'instant $t+\mathrm{d}t$, l'énergie cinétique varie donc $\mathrm{d}\mathscr{E}_c \neq 0$.

SI la masse du piston peut être négligée, alors on obtient :

Propriété 2 : Travail élémentaire des forces de pression

$$\delta W = \delta W_{\text{ext}} = -P_{\text{ext}}\mathrm{d}V \qquad \textbf{(travail élémentaire d'une force de pression)}$$

A.2 Cylindre vertical

Exemple

Soit un cylindre vertical placé dans l'air à la pression atmosphère P_{atm}. Il est fermé au moyen d'un piston de masse m et de section S, et contient un gaz à la pression P. Comment exprimer la « pression exercée par le milieu extérieur » en fonction des données ?

B) Transformation quasi-statique

B.1 Sur un exemple simple

Considérons le même système mais la transformation s'effectue lentement, par une suite continue d'états d'équilibre infiniment voisins. À chacun de ces états, la pression P au sein du gaz est uniforme.
Concrètement, cela signifie qu'à chaque instant il faut ajuster la force exercée par l'opérateur sur le piston pour que l'équilibre mécanique soit établi à chaque instant. L'accélération du piston est alors nulle.
À chacun de ces instants, le système exerce sur le piston une force :

$$\vec{F}(\text{gaz} \to \text{P}) = PS\vec{u}_x$$

Le milieu extérieur exerce sur le piston une force :

$$\vec{F}(\text{ext} \to \text{P}) = -P_{\text{ext}}S\vec{u}_x = -PS\vec{u}_x$$

D'après le principe des actions réciproques. Donc à chaque instant, $P = P_{\text{ext}}$.
Attention : dans ce cas, P_{ext} n'est pas constant : l'opérateur ajuste à chaque instant la force qu'il exerce sur le piston !

Propriété 3 : Travail élémentaire des forces de pression lors d'une transformation quasi-statique

$$\delta W = -P\mathrm{d}V \qquad \text{(pour une transformation quasi-statique)}$$

B.2 Gaz parfait en évolution isotherme (T=cste)

À chaque instant, l'équilibre thermique est établi or cela prend du temps : la transformation est nécessairement lente donc quasi-statique. Ainsi :

Propriété 4 : Travail des forces de pression lors d'une transformation isotherme d'un gaz parfait

$$W(1 \to 2) = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

C) Représentation dans les axes de Clapeyron $P = f(V)$

Le travail échangé avec l'extérieur au cours d'une transformation quasi-statique est représenté par **l'aire A de la surface sous la courbe** figurant la transformation. Avec deux cas possibles :

Lors d'une transformation **cyclique**, le travail échangé avec l'extérieur est représenté par l'**aire intérieure au cycle** :

— Le travail est **négatif** si le cycle est parcouru dans le **sens horaire** ; il est alors dit « **moteur** » ; **le système fournit du travail au milieu extérieur**.

— Le travail est **positif** si le cycle est parcouru dans le **sens trigonométrique** ; il est alors dit « **récepteur** » ; **le système reçoit du travail du milieu extérieur**.

D) Cas des phases condensées

Dans le modèle des phases condensées incompressibles et indilatables, V est constant soit d$V = 0$. Nous retiendrons donc le résultat suivant :

Propriété 5 : Travail des forces de pression pour une phase condensée

III Transfert thermique ou chaleur $Q(1 \to 2)$

A) Principe

La chaleur s'interprète comme un **échange d'énergie d'origine microscopique**.
Dans de nombreux cas, la chaleur apparaît à la suite de la **diminution de l'énergie mécanique**. Citons par exemple, le freinage d'un véhicule, la chute des corps dans l'air, l'amortissement d'un oscillateur (pendule, ressort ...), la rentrée d'une capsule spatiale dans l'atmosphère ...
L'origine des **forces dissipatives** se trouve au niveau des **interactions à l'échelle microscopique**, dans les régions de **contact**. Un bilan de toutes ces interactions montrerait que l'énergie globale est conservée mais qu'une partie est distribuée entre les particules constitutives du corps. Il se produit des mouvements microscopiques désordonnés, ce qui caractérise la production de **chaleur**.
La chaleur n'apparaît pas seulement à la suite de la disparition d'énergie mécanique. Elle peut être fournie par des **réactions chimiques**, de l'énergie chimique se transformant en énergie thermique.
Une résistance électrique, recevant de l'énergie sous forme de travail électrique, cède intégralement cette énergie sous forme de chaleur (**effet Joule**).
On obtient aussi de la chaleur à partir d'énergie électromagnétique (**rayonnement thermique**).

B) Conséquences

L'augmentation de cette énergie désordonnée dite « d'agitation thermique »se manifeste le plus souvent par :

- un accroissement de la température,
- un changement d'état.

C) Processus des transferts thermiques

Un corps en équilibre thermodynamique ne possède pas de chaleur mais de l'énergie. La chaleur est une façon de transférer de l'énergie.
On ne parlera donc pas de transfert de chaleur, mais de **transfert thermique**.
On distingue :

- la **conduction** : c'est un **transfert thermique par contact**. En chauffant un conducteur thermique à une extrémité, l'autre extrémité s'échauffe également. L'origine de la conduction réside dans les vibrations des corpuscules qui gagnent de proche en proche toute la masse d'un corps. Il n'y a pas de déplacement macroscopique de matière.
- la **convection** : associée au **mouvement d'un fluide** sous l'influence d'un gradient de température. C'est un processus assez proche de la conduction, mais avec cette fois un déplacement de matière.
- le **rayonnement** : un corps chaud émet un **rayonnement électromagnétique**. Lorsque l'onde arrive sur un autre corps, une interaction électrique se produit sur chaque particule chargée. Une élévation de la température du corps résulte de cette interaction onde-matière.

Définition 10 : Flux thermique

D) Transfert thermique par conduction

D.1 Loi de Fourier

Propriété 6 : Loi phénoménologique de Fourier unidimensionnel

D.2 Résistance thermique - Analogie électrocinétique

Conduction électrique	**Conduction thermique**
Charge élémentaire reçue δq	Chaleur élémentaire reçue δQ
Courant électrique $I = \dfrac{\delta q}{\mathrm{d}t}$	Flux thermique $\Phi_{\mathrm{th}} = \dfrac{\delta Q}{\mathrm{d}t}$
Différence de potentiels électriques $U_{AB} = V_A - V_B$	Différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$

Définition 11 : Résistance thermique conductive

Définition 12 : Conductance thermique

Propriété 7 : Association de résistance en série et en parallèle

Les règles d'association sont les mêmes qu'en électricité :

- Si des matériaux sont placés en série (l'un à la suite de l'autre et traversés par le même flux), la résistance équivalente s'écrit :

$$R_{th,eq} = R_{th,1} + R_{th_2}$$

- Si des matériaux sont placés en dérivation (l'un à côté de l'autre avec un partage du flux), la résistance équivalente répond à l'équation :

$$\frac{1}{R_{th,eq}} = \frac{1}{R_{th,1}} + \frac{1}{R_{th_2}}$$

E) Échange thermique conducto-convectif - Loi de Newton

La conduction n'est pas suffisante lorsqu'il s'agit de transfert thermique dans un fluide en mouvement (typiquement un échange thermique entre un radiateur et l'air de la pièce), on parle alors d'échange **conducto-convectif**.

Propriété 8 : Loi de Newton

Définition 13 : Résistance de conducto-convection

Exercice 1

Calculer les résistances thermiques d'une vitre simple vitrage et d'une vitre double vitrage. On prendra une surface $S = 1\,\mathrm{m}^2$ et une épaisseur unitaire des vitres $e_\mathrm{v} = 5\,\mathrm{mm}$. Dans le double vitrage, les vitres sont séparées par une lame d'air $e_\mathrm{a} = 5\,\mathrm{mm}$. On donne $\lambda_\mathrm{air} = 2.3 \times 10^{-2}\,\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$ et $\lambda_\mathrm{verre} = 1.2\,\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$.

F) Approche descriptive du rayonnement thermique

F.1 Modèle du corps noir

Le modèle du corps noir sert de fondement à l'étude des transferts thermiques par rayonnement. Le modèle idéal est le suivant :

Définition 14 : Le corps noir

Un corps noir est un corps qui absorbe l'intégralité du rayonnement électromagnétique qu'il reçoit (aucune réflexion ni transmission).

Remarque

Un « corps gris » absorbe et réemet une fraction α (avec $0 \leq \alpha \leq 1$) du rayonnement qu'il reçoit. Ainsi le corps noir, pour lequel $\alpha = 1$, est le meilleur émetteur possible

Définition 15 : Rayonnement d'équilibre

Le rayonnement d'équilibre à la température T est le rayonnement du champ électromagnétique qui existe dans une enceinte fermée vide dont la paroi est opaque et maintenue à une température constante T. Chaque élément de surface de la paroi émet dans l'enceinte un rayonnement thermique modélisé par le rayonnement d'un **corps universel** appelé **corps noir**.

Définition 16 : Albédo

On appelle **albédo** A le rapport du flux d'énergie lumineuse réfléchie sur le flux d'énergie incidente.

Corps	corps noir	océan	sol	forêts	sable	nuage	neige	miroir parfait
Albédo A	$0\,\%$	$\simeq 10\,\%$	$\simeq 10\,\%$	$\simeq 15\,\%$	$\simeq 35\,\%$	$> 50\,\%$	$> 60\,\%$	$100\,\%$

Table 1 – Ordres de grandeur d'albédo de différents corps.

F.2 Lois du rayonnement

Propriété 9 : Loi de Wien

Le flux surfacique passe par un maximum pour une longueur d'onde λ_m dépendant de la température tel que :

$$\lambda_m T \approx 2900\,\mu\mathrm{m\,K}$$

La loi de Stefan-Boltzman permet d'exprimer le flux surfacique du rayonnement en fonction de la température :

Propriété 10 : Loi de Stefan

$$\varphi_S = \frac{\Phi_{th,radiatif}}{S} = \sigma T^4$$

avec σ la constante de Stefan qui vaut $\sigma = 5.670 \times 10^{-8}\,\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}$

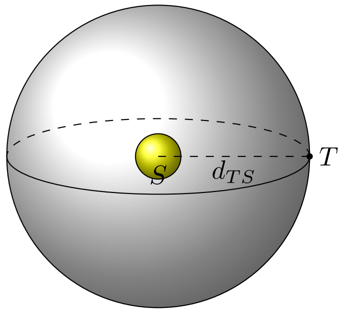
Exemple

Commençons par calculer le rayonnement thermique de flux surfacique du soleil reçu par la Terre, noté Φ_S.

Calcul de la puissance émise par le soleil :

Calcul de la puissance surfacique reçue par la Terre :

Le Soleil émet dans toutes les directions de l'espace, sa puissance totale émise $\mathscr{P}_S$ se répartit donc uniformément sur une sphère.



Calcul de la puissance totale reçue par la Terre :

En supposant que les rayons solaires sont parallèles entre eux, la Terre reçoit la même puissance qu'un disque de rayon $R_T = 6.4 \times 10^6$ m placé perpendiculairement à l'axe Terre-Soleil. La puissance reçue par la Terre est donc :

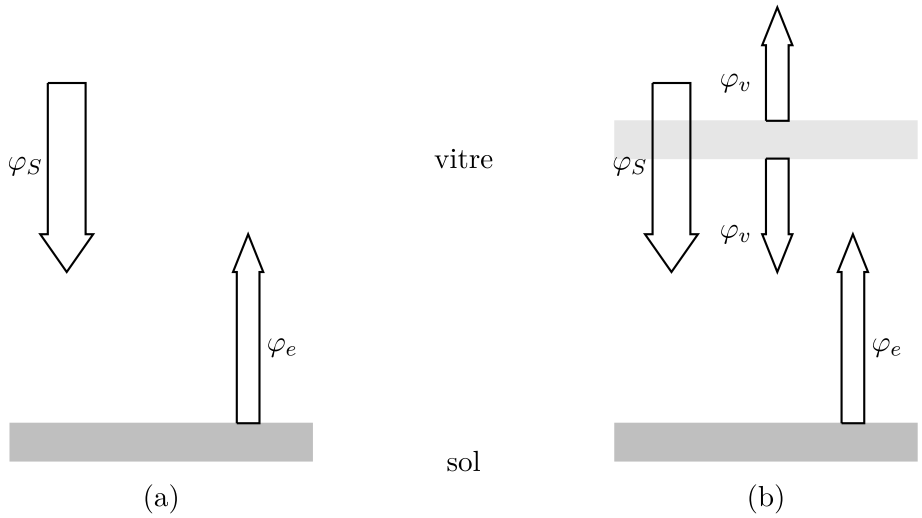
Calcul du flux solaire surfacique reçu par la Terre :

F.3 Application à l'étude de l'effet de serre

Dans toute cette partie, nous assimilerons le sol à un corps noir émettant un rayonnement thermique de flux surfacique φ_e. Nous supposerons aussi qu'il s'agit d'une sphère parfaite de rayon $R_T = 6400\,\text{km}$.

F.4 Effet de serre dû à une vitre idéale

Comparons la température d'une surface S du sol, avec et sans vitre :



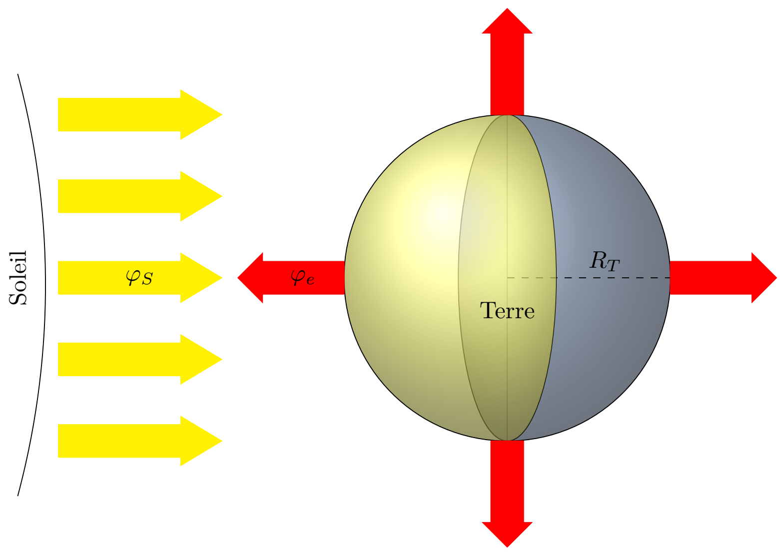
Situation sans vitre (a) :

Situation avec vitre (b) :

F.5 Température d'équilibre de la Terre sans atmosphère

Bilan radiatif sans atmosphère

La Terre reçoit une fraction $(1 - A)$ du flux solaire (avec A l'albedo).



F.6 Température d'équilibre de la Terre avec atmosphère

On prend en compte l'atmsophère d'épaisseur négligeable ($e_{\text{atm}} \approx 30\,\text{km}$) face au rayon de la Terre. On peut donc considérer que la surface de l'atmosphère est égale à celle de la Terre, avec $S_T = 4S_d$.

Tout comme pour la vitre idéale, on considère que[1] :

— L'atmosphère transmet intégralement le rayonnement solaire ;

— L'atsmophère absorbe intégralement le rayonnement de la Terre.

On suppose que la Terre a une température uniforme à sa surface égale à T_0 et que l'atmosphère a une température uniforme égale à T_1.

Bilan radiatif avec atmosphère

Bilan 1 :

1. Ces deux hypothèses trouvent leur justification dans le fait que la longueur d'onde correspond au maximum d'émission des deux corps en jeu (le Soleil et la Terre) sont très différentes l'une de l'autre.

Bilan 2 :

F.7 Amélioration du modèle de l'effet de serre

En réalité, une partie du rayonnement UV est absorbée par l'ozone stratosphérique, et une partie du rayonnement IR est absorbée par l'eau. On supposera que l'atmosphère absorbe une fraction α (ici 33%) du rayonnement solaire, la Terre absorbe donc une fraction $1-\alpha$. On a alors le nouveau système :