

Chapitre 12 – Bilans d'énergies, premier principe de la thermodynamique

Plan du cours

- I Conservation de l'énergie lors d'une transformation
 - I.1 Transformation thermodynamique
 - I.2 Énergie du système
 - I.3 Premier principe
- II Transfert d'énergie : travail
 - II.1 Travail des forces de pression
 - II.2 Diagramme de Clapeyron
- III Transfert thermique
 - III.1 Différents modes de transferts thermiques
 - III.2 Flux thermique
 - III.3 Loi de Newton
- IV Bilan d'énergie
 - IV.1 Enthalpie
 - IV.2 Calorimétrie

Ce qu'il faut savoir et savoir faire

- Citer les différentes contributions microscopiques et macroscopiques à l'énergie d'un système.
- Analyser qualitativement les différents termes intervenant dans l'écriture du premier principe.
- 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.
- 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.
- Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final.
- 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.
- Conduire un bilan d'énergie sur un système modélisé par un gaz parfait ou par une phase condensée incompressible et indilatable.
- Exprimer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final.
- Exprimer l'enthalpie $H_m(T)$ du gaz parfait à partir de l'énergie interne.
- Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.

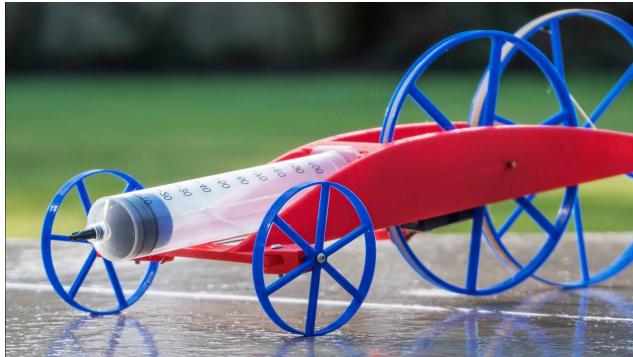
Questions de cours

- Définir le vocabulaire usuel des transformations : isochore, isotherme, isobare, monobare, mono-therme, adiabatique.

- Énoncer le premier principe en définissant soigneusement tous les termes.
- Définir l'enthalpie d'un système et donner ses propriétés. Exprimer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et l'état final.
- Dans le cas d'un gaz parfait, exprimer C_p et/ou C_v à partir du coefficient isentropique γ et de la relation de Mayer.
- Définir la résistance thermique d'un matériau en introduisant soigneusement les grandeurs utilisées (schéma!) et leurs unités.
- Donner la valeur de la capacité thermique massique de l'eau.

Documents

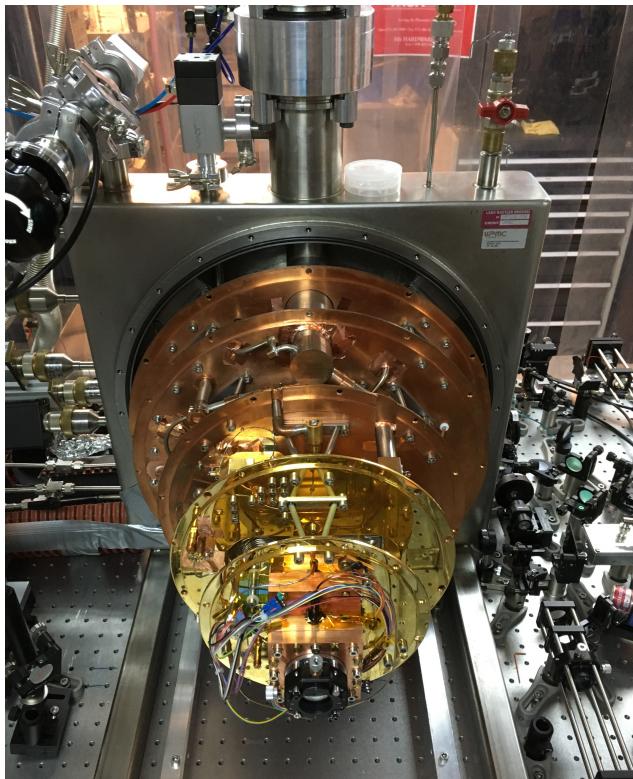
Document 1 – Voiture à pression atmosphérique



Ce projet n'est qu'un exemple des nombreuses créations souvent farfelues de Tom Stanton. Dans ses vidéos, il présente leur fabrication et les problèmes rencontrés pendant la conception. Le dimensionnement de ses réalisations passe très souvent par une étude physique des phénomènes mis en jeu... Et il y en a beaucoup !

<https://youtu.be/KWAvj8ATXmE>

Document 2 – Transferts thermiques et très basses températures



Le cryostat à dilution représenté ci-contre permet de refroidir des échantillons jusqu'à 30 mK avec un mélange d'hélium $^3\text{He}/^4\text{He}$. De telles températures ne peuvent être atteintes qu'en maîtrisant soigneusement tous les transferts thermiques.

Il comporte cinq platines dont la température est de plus en plus basse : 200 K, 100 K, 4 K, 1 K et 30 mK. Elles sont en cuivre et les deux dernières recouvertes d'or, tous deux excellents conducteurs thermiques, afin d'assurer une bonne thermalisation sur chaque platine. Elles sont reliées entre elles par des piliers en inox et en fibre de verre, qui sont de mauvais conducteurs thermiques, pour limiter la **conduction thermique** entre les platines.

Les platines sont chacune recouvertes d'un écran (photo de droite). Ils s'imbriquent à la manière des poupees russes et font office de boucliers thermiques, qui empêchent le **rayonnement thermique** « chaud » d'atteindre la zone froide (voir aussi webb.nasa.gov).

Une fois fermé, le cryostat est pompé jusqu'à atteindre une pression de l'ordre de 10^{-9} bar de manière à limiter, entre autre, la **convection thermique**. Le refroidissement est par ailleurs obtenu en faisant circuler un fluide cryogénique : l'hélium.

Document 3 – « Température ressentie »

Un sol en carrelage paraît plus froid qu'un parquet en bois, même si les deux ont la même température. Pourquoi ? Quelques éléments de réponse ici : <https://youtu.be/8bUNGLp048>.

Applications

Application 1 – Nature des transformations

1. Préciser la nature des transformations suivantes (isochore, isobare, monobare, isotherme ou monotherme). En déduire qualitativement, la température et la pression du système à l'état final. S'agit-il d'une transformation réversible ?
 - un glaçon laissé sur une coupelle à l'extérieur ;
 - un ballon de baudruche qui passe d'une salle chauffée à l'extérieur en hiver ;
 - une bouteille de gaz comprimée que l'on ouvre.
2. Comment qualifier la transformation associée à l'utilisation d'un briquet pneumatique ? Comment pourrait-on la rendre réversible ?

<https://youtu.be/4qe1Ueifkg?t=14>

3. On s'intéresse à un lancer de poids : s'agit-il d'une transformation réversible si l'on néglige les frottements ? Qu'en est-il si l'on prend en compte les frottements ?

Application 2 – Différentes contributions

Donner un exemple de transformation permettant de faire varier chacune des contributions à l'énergie totale d'un système thermodynamique.

Application 3 – Travail des forces de pression

Un gaz voit son volume varier de V_0 à $2V_0$ au cours d'une transformation réversible réalisée dans des conditions telles que la pression vérifie : $P = P_0 + \alpha(V - V_0)$, où P_0 , V_0 et α sont des constantes.

1. Donner, sans calcul, le signe du travail W reçu par le gaz.
2. Exprimer W sous la forme d'une intégrale.
3. Sans calculer l'intégrale, donner l'expression de W en fonction de P_0 , V_0 et α .
4. Retrouver cette expression en calculant l'intégrale.

Application 4 – Transfert thermique et cuisson

1. Citer un procédé de cuisson dans lequel l'aliment reçoit majoritairement du transfert thermique par conduction, par convection puis par rayonnement.
2. On cuit un œuf en le plongeant dans une casserole d'eau bouillante. Indiquer le mode de transfert thermique dominant pour le système {œuf}, le système {œuf+eau} et enfin pour le système {jaune d'œuf}.

Application 5 – Double vitrage

La résistance thermique d'une vitre peut se calculer avec la formule

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

où e est son épaisseur, S sa surface et λ la conductivité thermique du matériau. On considère une pièce à la température $\theta_{\text{int}} = 20^\circ\text{C}$, alors que la température de l'extérieur est $\theta_{\text{ext}} = 5^\circ\text{C}$.

Les transferts thermiques entre la pièce et l'extérieur se font à travers une vitre carrée de côté $a = 60\text{ cm}$, d'épaisseur $e = 3,0\text{ mm}$, constituée d'un verre de conductivité thermique $\lambda = 1,15\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. On néglige les flux à travers les autres parois de la pièce et on se place en régime stationnaire.

1. Définir la résistance thermique de la vitre et calculer sa valeur. En déduire le flux thermique sortant de la pièce.
2. Que deviendrait ce flux si on collait deux vitres identiques l'une contre l'autre ?

On remplace maintenant ce simple vitrage par un double vitrage, constitué de deux vitres identiques à la précédente, séparées par une couche d'air de conductivité thermique $\lambda' = 0,025\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, d'épaisseur $e' = 10\text{ mm}$.

3. Déterminer la nouvelle valeur du flux thermique.
4. Calculer les températures sur les deux surfaces verre/air à l'intérieur du double vitrage.

Application 6 – Capacités thermiques et coefficient isentropique

1. À l'aide de la relation de Mayer, exprimer les capacités thermiques molaires à volume constant $C_{v,m}$ et à pression constante $C_{p,m}$ d'un gaz parfait en fonction du coefficient isentropique γ et de la constante des gaz parfaits R .
2. Exprimer $C_{v,m}$ et $C_{p,m}$ en fonction de R pour un gaz parfait monoatomique.
3. Exprimer $C_{v,m}$ et $C_{p,m}$ en fonction de R pour un gaz parfait diatomique. Calculer γ .

Application 7 – Capacité thermique massique du fer

Plutôt que de donner la capacité thermique d'un calorimètre, on donne la masse d'eau qui aurait la même capacité thermique : c'est la **valeur en eau** du colorimètre.

On verse dans un calorimètre, de valeur en eau 20 g , une masse $m_{\text{eau}} = 400\text{ g}$ d'eau très froide et on mesure la température qui se stabilise après quelques instants. On trouve $\theta_0 = 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. On introduit dans le calorimètre un échantillon de fer, que l'on a préalablement pesé (masse $m_{\text{Fe}} = 200\text{ g}$) et qui est initialement à la température d'une étuve thermostatée $\theta_1 = 85,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. On vérifie que l'échantillon est bien entièrement couvert d'eau. On attend que la température se stabilise et on mesure la température finale $\theta_f = 6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1. Déterminer la valeur et la capacité thermique massique c_{Fe} du fer.
2. Commenter la valeur obtenue par rapport à la valeur tabulée : $c_{\text{Fe}} = 452\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Application 8 – Un buveur de café un tantinet tatillon

Un amateur de café ajoute un sucre de masse $m = 10\text{ g}$ et de capacité thermique massique $c = 500\text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ dans sa tasse contenant un volume $V = 40\text{ mL}$ de café. Initialement, la température du café est $\theta_c = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ alors que le sucre est à température ambiante θ_s .

1. Exprimer, puis calculer la température θ_f du café sucré.

Pour lui, cette baisse de température est inadmissible, intolérable, insupportable ! Il envisage trois méthodes pour obtenir un café sucré à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$:

- lâcher le sucre d'une hauteur h suffisante ;
 - lancer le sucre dans la tasse avec une vitesse v suffisante ;
 - prendre un café initialement à une température θ'_c plus élevée que $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Exprimer, puis calculer chacun des paramètres h , v et θ'_c dans les trois méthodes. Conclure.