TD 19 – Transferts d'énergie – 1er principe de la thermodynamique

Ce qu'il faut savoir et savoir faire

→ Connaître le vocabulaire relatif à la nature d'une transformation
→ Calculer le travail des forces de pression
→ Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron
→ Appliquer le 1er principe de la thermodynamique à un système fermé
→ Exprimer l'énergie interne d'un gaz parfait ou d'une phase condensée incompressible et indilatable
→ Exprimer l'enthalpie d'un gaz parfait ou d'une phase condensée incompressible et indilatable
→ Exprimer le 1er principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare
→ Connaître et savoir utiliser les lois de Laplace

J'apprends mon cours : *Questions de cours, exercices 1, 2, 3, 4, 6*

Questions de cours

Q1. Définir l'énergie interne.
Q2. Définir les transformations suivantes : isochore, monotherme, isotherme, monobare, isobare, adiabatique.
Q3. Donner l'expression du travail des forces de pression pour une transformation quelconque.
Q4. Comment peut-on interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans le diagramme de Clapeyron ?
Q5. Décrire les trois types de transfert thermique.
Q6. Énoncerlepremier principe dans le cas général ; dans le cas fréquent (système macroscopiquement au repos) et pour une transformation monobare avec équilibre mécanique initial et final.
Q7. Déterminer le travail des forces de pression et le transfert thermique reçu sur les transformations suivantes : isochore ; isobare ; et isotherme d'un gaz parfait.
Q8. Donner la définition de l'enthalpie. Quelle est son unité ?
Q9. Donner la définition de la capacité thermique à volume constant et à pression constante. Quelle est leur unité ?
Q10. Quelle propriété présente l'énergie interne et l'enthalpie d'un gaz parfait ?

Exercices

Exercice 1 : Echauffement des freins d'une voiture ★☆☆
Ref. 0150

✓ *Transfert thermique*

Une voiture de 836 kg roulant à 72 $km.h^{-1}$ s'arrête brusquement à l'aide de ses quatre freins à disques. En assimilant ces derniers à des cylindres de 10 cm de rayon et de 1 cm d'épaisseur, de masse volumique 8 $g.cm^{-3}$, de capacité thermique massique 0,42 $J.g^{-1}.K^{-1}$, calculer leur élévation de température en supposant que toute l'énergie dissipée est absorbée par les disques.

Exercice 2 : Mise en contact de deux solides ♥ ★☆☆
Ref. 0151

✓ *Energie interne d'un solide*

On considère deux solides supposés incompressibles et indilatables, le premier de masse m_1, de capacité thermique massique c_1 à la température T_1, le second de masse m_2 et capacité thermique massique c_2 à T_2. On met en contact ces deux solides et on les isole thermiquement de l'extérieur. À l'équilibre thermique, les deux solides atteignent la même température T_f.

1) En considérant le système total $\Sigma = \{1 + 2\}$ et à l'aide de l'additivité de l'énergie interne, déterminer l'expression de la variation d'énergie interne totale ΔU.
2) En déduire à l'aide du 1er principe l'expression de T_f.
3) Que vaut-elle si $m_2 \gg m_1$? Comment peut-on alors définir un thermostat ?
4) En considérant le système $\{1\}$, déterminer l'expression du transfert thermique entre les deux solides.

Exercice 3 : Cycle thermodynamique d'un gaz parfait ★☆☆
Ref. 0152

✓ *Travail des forces de pression*

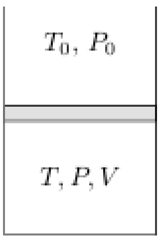
On considère $n = 0{,}5\ mol$ d'un gaz parfait diatomique contenu dans un cylindre vertical fermé par un piston pouvant coulisser. Le gaz est initialement pris sous la pression $P_0 = 1\ bar$ et la température $T_0 = 293\ K$.

1) On amène très lentement la pression du gaz à $P_1 = 5\ bar$ en maintenant sa température constante. On suppose la transformation réversible. Quel est le travail des forces de pression ?
2) Puis, en maintenant la pression constante, on échauffe le gaz jusqu'à la température $T_2 = 343\ K$. Quel est le travail des forces de pression ?
3) En isolant thermiquement les parois du cylindre, on détend le gaz pour l'amener à la température $T_3 = 192\ K$ et à la pression $P_3 = 0{,}653\ bar$. Quel est le travail des forces de pression ?
4) On ramène finalement le gaz à l'état initial. Quel est le travail des forces de pression ?

Exercice 4 : Transformations d'un gaz parfait ♥ ★★☆
Ref. 0153

✓ *Travail des forces de pression*

On considère un système composé d'une quantité de matière n de gaz parfait diatomique enfermée dans une enceinte. Cette enceinte est fermée par un piston de surface S et dont on négligera la masse, pouvant coulisser sans frottement. L'ensemble est situé dans l'atmosphère, dont on note T_0 et P_0 la température et la pression. On note I l'état initial. L'objectif est de comparer deux transformations du système : l'une brutale et l'autre lente.



Donnée : capacité thermique molaire à volume constant $C_{V,m} = 5R/2$.

Commençons par la transformation brutale : on lâche brusquement une masse M sur le piston, qui se stabilise en un état intermédiaire

1) Le meilleur modèle pour la transformation est-il isotherme ou adiabatique ? Peut-on en déduire un résultat sur la température T_1 ?
2) Déterminer la pression P_1.
3) Établir le bilan énergétique de la transformation en explicitant chacun des termes.
4) En déduire les caractéristiques T_1, P_1, V_1 de l'état 1.

On observe qu'en fait l'état 1 n'est pas un réel état d'équilibre : le piston continue de bouger, mais beaucoup plus lentement, jusqu'à atteindre l'état 2 qui est l'état final.

5) Quel phénomène, négligé précédemment, est responsable de cette nouvelle transformation du système ?
6) Déterminer les caractéristiques T_2, P_2, V_2 de l'état 2.
7) Déterminer le travail reçu par le système, puis sa variation d'énergie interne et en déduire le transfert thermique reçu au cours de la transformation $1 \rightarrow 2$.
8) En déduire le travail total et le transfert thermique total reçus au cours de la transformation brusque.

Comparons maintenant à une transformation lente : la même masse M est lâchée très progressivement sur le piston, par exemple en ajoutant du sable « grain à grain ».

9) Quelle hypothèse peut-on faire quant à la nature de la transformation ? Que peut-on en déduire sur la température du système au cours de la transformation ?
10) Déterminer la pression dans l'état final et en déduire le volume. Commenter.
11) Établir le bilan énergétique de la transformation en explicitant chaque terme. Comparer à la transformation brutale. Commenter.

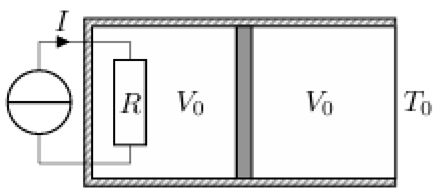
Exercice 5 : Chauffage par une résistance ♥

★★☆
Ref. 0154

- ✓ *Travail électrique*
- ✓ *Lois de Laplace*

Un récipient de volume total fixe $2\,V_0$ ($V_0 = 10\,L$) est divisé en deux compartiments par un piston mobile (de surface S) sans masse pouvant coulisser sans frottement. Les parois du compartiment de droite permettent les transferts thermiques, alors que celles du compartiment de gauche ainsi que le piston sont calorifugées. Initialement, l'air (gaz parfait de rapport $\gamma = 1{,}4$) contenu dans chacun des deux compartiments est à la température $T_0 = 300\,K$ et à la pression $P_0 = 10^5\,Pa$, l'air extérieur au récipient étant à T_0. À l'intérieur du compartiment de gauche se trouve une résistance $R = 10\,\Omega$. Cette résistance est parcourue par un courant continu $I = 1{,}0\,A$. On arrête le courant après une durée τ dès que la pression dans le compartiment de gauche vaut $P_1 = 2\,P_0$. Les transformations sont supposées quasi-statiques.

1) Déterminer l'état final des gaz dans chaque compartiment à la fin de l'expérience ?
2) Quelle hypothèse peut-on faire sur la transformation subie par le gaz du compartiment de droite ?
3) Quel travail des forces de pression W_2 a été reçu par le compartiment de droite ? Et celui W_1 reçu par le compartiment de gauche ?
4) Que vaut le transfert thermique Q_2 échangé entre le compartiment de droite et le thermostat extérieur ?
5) Calculer la durée τ du chauffage.



6) Reprendre les questions précédentes en considérant l'enceinte et le piston calorifugés.

Exercice 6 : Double vitrage ♥

★☆☆
Ref. 0155

- ✓ *Résistance thermique*
- ✓ *Conduction thermique*
- ✓ *Transfert conducto-convectif*

Cet exercice a pour objectif d'estimer la puissance perdue au travers d'une fenêtre en double vitrage à montant en bois. Cette vitre a pour largeur $L = 80\ cm$ et pour hauteur $H = 1\ m$. On adopte pour le vitrage un modèle à trois couches :

- Une première couche de verre, d'épaisseur $e_v = 4\ mm$
- Une couche d'air, d'épaisseur $e_a = 16\ mm$
- Une seconde couche de verre identique à la première.

Le montant en bois a une surface totale $S_b = 0{,}2\ m^2$ et une épaisseur $e_b = 60\ mm$.
On prend également en compte le phénomène de conducto-convection à l'interface la fenêtre et l'air extérieur, décrite par la loi de Newton de coefficient conducto-convectif $h = 10\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

Données : conductivités thermiques du verre $\lambda_v = 1{,}0\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, de l'air $\lambda_a = 2{,}7 \cdot 10^{-2} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ et du bois $\lambda_b = 0{,}15\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

1) Représenter le schéma électrique équivalent à la fenêtre.
2) Calculer la résistance thermique totale des trois couches constituant le vitrage. En déduire la résistance thermique de la fenêtre.
3) En plein hiver, la température de l'habitation est $T_{int} = 20°C$ et la température extérieure $T_{ext} = 5°C$. Quelle est la puissance thermique perdue au travers de la fenêtre ?
4) Déterminer la température de surface de la fenêtre, côté extérieur.

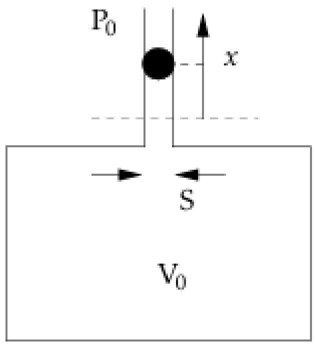
Exercice 7 : Expérience de Rüchardt ♥

★★★
Ref. 0156

- ✓ *Oscillations*
- ✓ *Lois de Laplace*

Une bille de masse $m = 30\ g$ peut coulisser sans frottement dans un tube de verre de faible section $S = 4\ cm^2$. Ce tube surmonte un récipient, le volume de gaz à l'équilibre est $V_0 = 10\ L$. L'ensemble est plongé dans l'atmosphère, de pression uniforme $P_0 = 1\ atm$. Le récipient et la portion de tube sous la bille contiennent de l'air qu'on assimilera à un gaz parfait (de coefficient γ constant). On écarte la bille de sa position d'équilibre de x_0 ($x_0 S << V_0$) à l'instant $t = 0$ et on la relâche sans lui communiquer de vitesse initiale : elle oscille. On désigne par x l'écart par rapport à la position de repos précédente.

On suppose de plus que pendant les premières oscillations, les frottements sont négligeables et la pression dans la bouteille uniforme. On supposera donc que la transformation est adiabatique réversible.



1) Quelle est la pression P_i de l'air à l'équilibre ?
2) Exprimer la pression de l'air à l'instant t en fonction de γ, P_i, V_0, S, x.
3) Exprimer la résultante des forces pressantes exercées sur la bille.
4) Déterminer l'équation différentielle suivie par la position x de la bille pour des oscillations de petite amplitude. On donne le développement limité : $(1+\varepsilon)^\alpha \simeq 1 + \alpha\varepsilon \; si \; \varepsilon \ll 1$.
5) En déduire la fréquence f de ces petites oscillations. Que vaudra f pour un gaz diatomique ($\gamma = 1.4$) aux températures usuelles ?
6) Ce phénomène est également à l'œuvre dans le dispositif du résonateur de Helmholtz, dont une illustration triviale est le son produit quand on souffle sur le goulot d'une bouteille. C'est la colonne d'air dans le goulot qui joue alors le rôle de la bille. Déterminer les ordres de grandeur pertinent et en déduire une estimation de la fréquence des sons ainsi produits, pour une bouteille de bière par exemple.

Exercice 8 : Chauffage d'une chambre ♥

★★☆
Ref. 0157

- ✓ *Régime transitoire thermique*
- ✓ *Résistance thermique*

La chambre d'une étudiante est séparée de l'extérieur par des murs en béton. La température régnant à l'extérieur est supposée constante égale à $T_0 = 280\ K$. La température $T(t)$ à l'intérieur de la chambre et ses murs est supposée uniforme mais non constante. La puissance perdue par la pièce à cause des fuites thermiques est égale à $P_{th} = \frac{T(t)-T_0}{R}$ avec $R = 2,00 \times 10^{-2}\ K \cdot W^{-1}$ la résistance thermique des parois, et elle est chauffée par un radiateur délivrant une puissance $P = 2{,}00\ kW$. La capacité thermique du système $\{\ chambre + murs\ \}$ est $C = 1{,}50\ J \cdot K^{-1}$.

À l'instant t = 0, la température est $T(0) = T_0$ et l'étudiante allume le radiateur.

1) À l'aide de la version infinitésimale du premier principe, établir l'équation différentielle vérifiée par la température est l'écrire sous la forme $\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_p}{\tau}$, où on exprimera τ et T_p.
2) Déterminer l'expression de la fonction $T(t)$ et tracer son allure.
3) Exprimer puis calculer la température dans le local une fois le régime stationnaire établi. Faut-il augmenter ou diminuer la puissance du radiateur ?

Exercice 9 : Thermodynamique avec ressort

★★★
Ref. 0158

- ✓ *Travail électrique*
- ✓ *Energie potentielle élastique*

On étudie un dispositif expérimental forme d'un cylindre horizontal aux parois indéformables, de rayon intérieur r_{int} et de rayon extérieur r_{ext}, fermé de part et d'autre par deux pistons de masses et d'épaisseur négligeables.

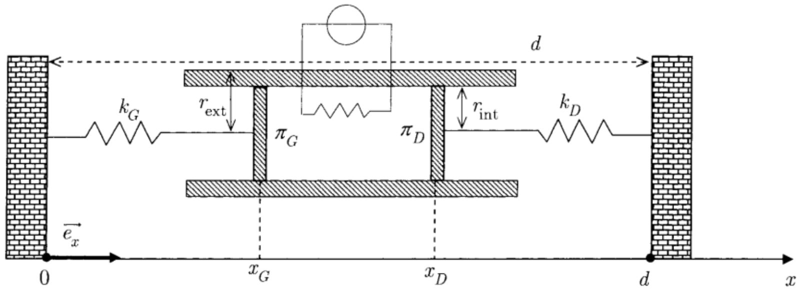


Fig. 1 – Dispositif expérimental

Le cylindre est fixe, les pistons sont mobiles sans frottement. Sur le piston de gauche, note π_G, est accroché un ressort horizontal de constante de raideur k, dont l'autre extrémité est fixe. De même, sur le piston de droite, note π_D, est accroché un ressort horizontal de même constante de raideur k, dont l'autre extrémité est aussi fixe. Un axe (Ox) muni du vecteur unitaire permet de repérer les positions x_G et x_D des pistons. On note x_{G0} et x_{D0} les positions des pistons quand les deux sont au repos et ont pour longueur leur longueur à vide.
Dans toute la suite, on note : $L = x_{D0} - x_{G0}$

Le cylindre contient n moles de gaz assimilé à un gaz parfait, de coefficient adiabatique γ constant. A l'extérieur du cylindre, on a créé un vide assez poussé, de sorte qu'il n'y a pas de forces de pression liées à une atmosphère extérieure au cylindre. Le cylindre et les pistons sont parfaitement calorifugés.
Une résistance chauffante traverse le cylindre et apportera de l'énergie d'origine électrique, notée W_{el}.

Etat initial *A* : la résistance chauffante n'est pas branchée ; la pression du gaz vaut P_A.

1) Déterminer les positions d'équilibre des pistons, x_{DA} et x_{GA} en fonction de P_A, de la surface S des pistons et de la constante de raideur k.
2) En déduire le volume V_A du gaz. Faire l'application numérique.
3) En déduire la température T_A du gaz. Faire l'application numérique.

On branche la résistance chauffante. Le gaz atteint au bout d'un certain temps un nouvel état d'équilibre, noté B. Le volume final est alors mesure et vaut : $V_B = \alpha V_A$.

4) Calculer la valeur numérique de V_B.
5) Déterminer les positions d'équilibre des pistons, x_{DB} et x_{GB} en fonction de la pression P_B du gaz dans l'état d'équilibre B, de la surface S des pistons et de la constante de raideur k.
6) En déduire la pression P_B du gaz en fonction de k, s, L et V_B. Faire l'application numérique.
7) En déduire la température T_B du gaz. Faire l'application numérique.
8) Déterminer le travail mécanique reçu par le gaz de la part des deux ressorts. Faire l'application numérique. Commenter le signe.
9) Déterminer l'énergie électrique W_{el} fournie par la résistance chauffante.

***Données numériques** :*
$L = 0{,}40\, m;\ r_{int} = 5{,}0\, cm;\ k = 5{,}0.10^2\ N.m^{-1}, \alpha = 1{,}3$
$Constante\ des\ GP :\ R = 8{,}3\, J.K^{-1}.mol^{-1};\ \gamma = 1{,}4\ ; n = 0{,}02\, mol\ ;\ P_A = 1{,}0.10^4\ Pa$