DM de physique n° 8

Exercice 1 : Balance de Kibble

La balance de Kibble est constituée de deux plateaux accrochés à un fléau qui peut pivoter autour de l'axe (Cy). La masse m à mesurer est posée sur l'un des plateaux. On suppose la balance parfaitement équilibrée (fléau horizontal) en l'absence de masse m. Son principe de fonctionnement est donné sur la figure 1. On supposera que la balance est symétrique par rapport au plan (xCz).

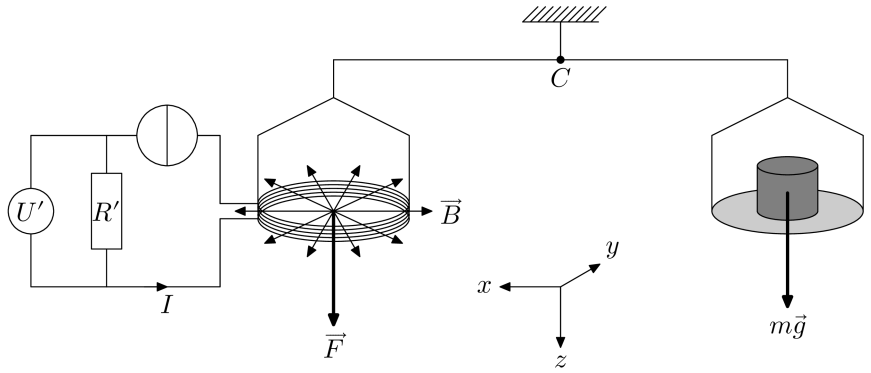


Figure 1 : Principe de la balance de Kibble. Le courant I est imposé par une source idéale de courant réglable

L'autre plateau est constitué d'une bobine plate comportant N spires horizontales, circulaires et concentriques. Elle est placée dans l'entrefer d'un aimant. Dans la zone des spires le champ magnétique produit par cet aimant est horizontal, radial et sortant par rapport à leur axe de révolution (Oz) et de valeur B uniforme. L'axe (Oz) est vertical, orienté vers le bas. On note ℓ la longueur totale du fil des spires.

1. Quel est l'origine de la force subie par la bobine lorsqu'elle est parcourue par un courant ? Indiquer sur un schéma simplifié l'orientation du courant permettant l'équilibrage de la balance une fois la masse m posée comme sur la figure 1.

2. Exprimer la force $\vec{F}$ qui agit sur la bobine.

3. On règle l'intensité du courant dans la bobine à une valeur I pour équilibrer la balance en présence de la masse m posée. Établir l'expression de m en fonction de I, g, B et ℓ.

4. La bobine comporte 600 spires réparties sur un cylindre de diamètre moyen égal à 260 mm. On prendra $B = 1{,}0\,\mathrm{T}$ et $\left|I\right| = 10\,\mathrm{mA}$. Calculer m.

En réalité, la masse m est placée du même côté du fléau que la bobine. Une tare de masse M est déposée sur le plateau à l'opposé de la bobine pour équilibrer la balance en l'absence de masse m et de courant I. En pratique, après avoir équilibré la balance avec la tare de masse M, on ajoute une masse m' sur le même plateau que la tare et on équilibre l'ensemble avec un courant I_1. On ajoute ensuite la masse m du côté de la bobine et on équilibre avec un courant I_2.

5. Établir la relation qui remplace celle de la question 3. Quel peut être l'intérêt de cette nouvelle opération ?

6. Si l'on prend $m' = m/2$, quelle relation a-t-on entre les intensités ?

Exercice 2 : Cycle de Diesel

Le moteur des locomotives diesel fut inventé en 1892 par l'ingénieur allemand Rudolf Diesel. Les premières locomotives « Diesel-mécanique » où la puissance est transmise par l'intermédiaire d'une boite de vitesse à pignons furent rapidement remplacées par des locomotives « Diesel-électrique » où le moteur diesel, en tournant, entraîne un alternateur. Ce dernier fournit de l'énergie à plusieurs moteurs électriques de traction. On modélise le fonctionnement d'un moteur Diesel en considérant un système fermé, constitué de n moles de gaz parfait diatomique, décrivant le cycle réversible dont les caractéristiques sont décrites ci-dessous.

— *Admission* A_0A : la soupape d'arrivée de l'air est ouverte, celles d'arrivée de gasoil et celle d'échappement des gaz sont fermées. La pression est $P_{\text{atm}} = 1,00 \cdot 10^5\,\text{Pa}$ et la température $T_{\text{atm}} = 300\,\text{K}$. Le volume passe de $V_{\min}$ à $V_{\max}$ de façon isobare.

— *Compression* AB : les soupapes sont fermées. Le volume de l'air admis passe de $V_{\max}$ à $V_{\min}$ de manière adiabatique et réversible.

— *Injection et combustion* BC : les soupapes sont fermées, sauf celle d'injection du gasoil. Une petite quantité de gasoil est injectée et la combustion se produit. Le volume augmente jusqu'à V_C. On modélise cette phase par une évolution isobare.

— *Détente* CD : les soupapes sont toutes fermées. L'injection cesse en C et le mélange subit une détente adiabatique et réversible jusqu'à atteindre un volume $V_{\max}$.

— *Refroidissement* DA : la soupape d'échappement est ouverte. La pression diminue brutalement jusqu'à P_{atm}, le volume restant constant.

— *Éjection* AA_0 : la soupape d'échappement est ouverte, les autres fermées. Le volume passe de $V_{\max}$ à $V_{\min}$ de façon isobare.

1. Représenter le cycle de Diesel $A_0 - A - B - C - D - A - A_0$ dans le diagramme de Watt (P,V).

2. On définit le rapport volumétrique de compression $x = V_{\max}/V_{\min}$, ainsi que le rapport volumétrique de détente $y = V_{\max}/V_C$. Exprimer les pressions P_B et P_D en fonction de P_{atm}, x, y et du rapport $\gamma = C_{pm}/C_{vm}$, des capacités thermiques molaires à pression et volume constant du gaz considéré.

3. Définir le rendement thermodynamique, noté η_D, pour ce moteur et l'exprimer en fonction des températures T_A, T_B, T_C, T_D et du rapport γ.

4. Montrer que $\eta_D = 1 - \dfrac{1}{\gamma}\dfrac{x^{-\gamma} - y^{-\gamma}}{x^{-1} - y^{-1}}$ puis faire l'application numérique en utilisant les données en fin d'énoncé. En réalité, le rendement observé est de l'ordre de $0,45$. Commenter.

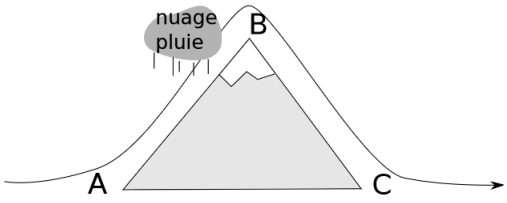
5. Une locomotive à moteur Diesel roule à vitesse constante $v = 140\,\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. Le moteur tourne à la vitesse angulaire, elle aussi constante, de $2000\,\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$, un tour correspondant à un cycle du moteur. Calculer la puissance mécanique moyenne du moteur de la locomotive (en utilisant la valeur du rendement réellement observé) ainsi que sa consommation de gasoil en litres pour 100 km. On utilisera les données en fin d'énoncé.

Données :

Volume maximal du gaz dans le cycle de Diesel	$V_{\max} = 57\,\text{L}$
Rapport volumétrique de compression	$x = V_{\max}/V_{\min} = 20$
Rapport volumétrique de détente	$y = V_{\max}/V_C = 7$
Rapport des capacités thermiques	$\gamma = C_{pm}/C_{vm} = 1,4$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,314\,\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
Enthalpie de combustion massique du gasoil	$\Delta_{\text{comb}}h = 46,8\,\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Masse volumique du gasoil	$\rho_{\text{gas}} = 840\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Exercice 3 : Effet de Foehn

L'effet de Foehn est un phénomène météorologique qui se produit lorsqu'un vent transportant de l'air humide rencontre un massif montagneux. On observe alors des précipitations sur le versant amont tandis que l'air est plus chaud et sec sur le versant aval. On étudie dans cet exercice un mécanisme simplifié de cet effet.



On considère une portion fermée d'air atmosphérique humide de volume V, située en A au niveau de la mer d'altitude $z = 0$, contenant une masse d'air sec m_{as} et une masse de vapeur d'eau m_e. La pression atmosphérique est la somme des pressions partielles de l'air sec et de la vapeur d'eau : $P = p_{as} + p_e$. On assimile l'air sec et la vapeur d'eau à des gaz parfaits.

Données pour l'eau : Masse molaire : $M_e = 18\,\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$, enthalpie de vaporisation supposée indépendante de la température : $L_{\mathrm{vap}} = 2,3 \cdot 10^3\,\mathrm{kJ \cdot kg^{-1}}$, pression de vapeur saturante à la température T_A : $P_{\mathrm{sat}}(T_A) = 2,0\,\mathrm{kPa}$. On suppose que les variations de la pression de vapeur saturante de l'eau avec la température sont données par la loi suivante :

$$\ln\left[\frac{P_{\mathrm{sat}}(T)}{P_{\mathrm{sat}}(T_A)}\right] = \frac{M_e L_{\mathrm{vap}}}{R}\left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T}\right)$$

Données pour l'air sec : Masse molaire : $M_{as} = 29\,\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$, rapport des capacités thermiques molaires à pression et volume constant : $\gamma = C_{pm}/C_{vm} = 1,4$, supposé identique à celui de la vapeur d'eau.

Données pour l'air humide en A : $P_A = 1,0\,\mathrm{bar}$, $T_A = 290\,\mathrm{K}$, degré hygrométrique $H_A = 70\%$.

On suppose que dans la partie ascendante du courant atmosphérique, avant l'apparition des précipitations, la température varie avec l'altitude de la manière suivante : $T(z) = T_A - bz$ avec $b = 9,8\,\mathrm{K \cdot km^{-1}}$.

1. On appelle humidité absolue le rapport $x = m_e/m_{as}$ des masses de vapeur d'eau et d'air sec dans un air humide. Montrer qu'au point A, avec une approximation à justifier, on a :

$$x_A = H_A \frac{P_{\mathrm{sat}}(T_A)}{P_A} \frac{M_e}{M_{as}}$$

Déterminer numériquement x_A en grammes d'eau par kilogramme d'air sec.

2. On suppose que l'air humide ascendant évolue de manière adiabatique et réversible. À une certaine altitude z_S de température T_S, l'air devient saturé en vapeur d'eau. Montrer que la température T_S est solution de l'équation :

$$\ln\beta + K_1\left(\frac{1}{\beta} - 1\right) + K_2 = 0$$

avec $\beta = T_S/T_A$ et K_1, K_2 deux constantes à exprimer en fonction de γ, L_{vap}, M_e, R, T_A et H_A.

3. La résolution numérique de cette équation donne $\beta = 0,975$. Déterminer numériquement T_S puis z_S.

4. Pour simplifier on suppose que toute la vapeur d'eau présente dans l'air humide se liquéfie à l'altitude z_S. On suppose également qu'au cours de la liquéfaction les échanges thermiques s'effectuent uniquement entre la masse d'eau m_e et la masse d'air sec m_{as}. On suppose ainsi que le volume V d'air humide est thermiquement isolé du reste de l'atmosphère.

Déterminer littéralement et numériquement la température de l'air sec T'_S après liquéfaction complète de la vapeur d'eau.

5. On suppose que le sommet du massif montagneux est plus élevé que z_S et qu'une fois la vapeur d'eau liquéfiée, celle-ci s'évacue sous forme de nuage et de pluie. L'air restant est sec, il passe par le sommet B puis redescend vers C, toujours de manière adiabatique et réversible. On suppose que la pression atmosphérique en C est identique à celle en A.

Déterminer la température de l'air au point C. Commenter.