

DM N°7 – REVISIONS DE THERMODYNAMIQUE

Niveau 1 : Problème N°1, Problème N°3 : partie II-2-B

Niveau 2 : Problème N°1 partie B), Problème N°2 partie A), Problème N°3 : partie II-2-B

Niveau 3 : Problème N°1 partie B), Problème N°2 partie B), Problème N°3

PROBLEME N°1 : AUTOUR DES ENERGIES

A) Énergie électrique au Large Hadron Collider du CERN

Le Grand Collisionneur de Hadrons (Large Hadron Collider ou LHC) est entré en fonctionnement en 2008. Il est situé dans un anneau de 27 kilomètres de circonférence et enterré à 100 m sous terre à la frontière franco-suisse, près de Genève. Le LHC est désormais le plus puissant des accélérateurs de particules au monde.

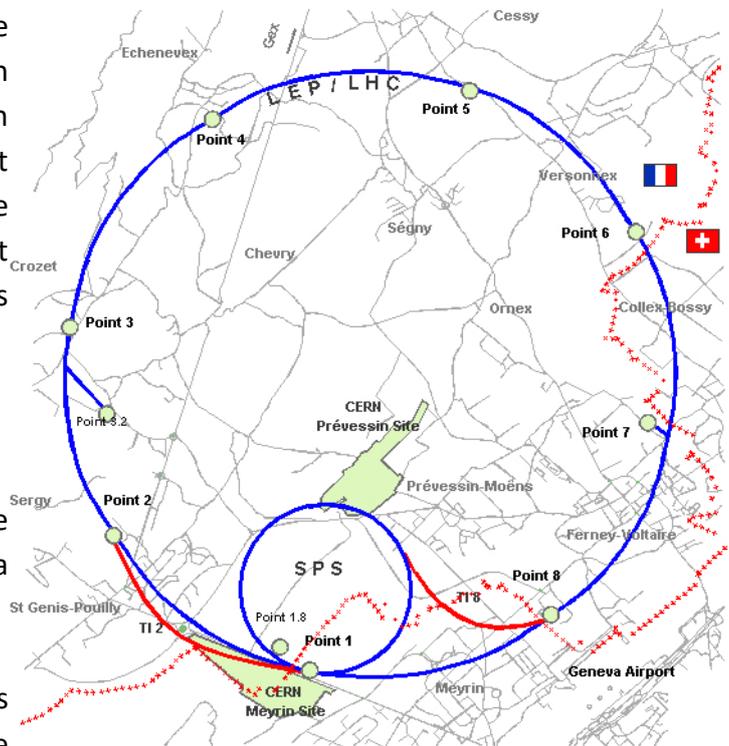


Figure 1 : Site du CERN, dans les environs de Genève. Le grand cercle représente la position du tunnel du LHC.

Dans les accélérateurs de particules, des protons (ou des ions) de très haute énergie circulant dans deux faisceaux tournant à contre-sens se choquent les uns contre les autres, dans le but de rechercher des indices de la supersymétrie, de la matière noire et de l'origine de la masse des particules élémentaires.

Les faisceaux se composent de paquets contenant des centaines de milliards de protons chacun. Voyageant quasiment à la vitesse de la lumière, ils sont injectés, accélérés, et maintenus en circulation pendant des heures, guidés par des milliers d'aimants supraconducteurs puissants. L'énergie des protons est transformée au moment du choc en une myriade de particules exotiques, que les détecteurs observent avec attention. Le 04 juillet 2012, les chercheurs ont annoncé l'observation du boson de Higgs dont l'existence était prédite par le modèle standard. On s'intéresse dans cette partie à quelques enjeux énergétiques au LHC.

Unités

Énergie	$1,00 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
	$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

Le LHC ne fonctionne pas de manière continue. Il fonctionne l'équivalent de 270 jours par an, et ce, 24 heures sur 24. Sa puissance consommée moyenne est de 120 MW.

1. On cherche à déterminer l'énergie consommée annuellement en joules. Poser le calcul puis choisir la bonne réponse parmi : $2,8 \cdot 10^9 \text{ J}$ / $2,8 \cdot 10^{12} \text{ J}$ / $2,8 \cdot 10^{15} \text{ J}$

Lors du fonctionnement du LHC, on dispose, dans chaque faisceau, d'environ $N_1 = 3,01 \cdot 10^{14}$ protons ayant chacun une énergie de $E_1 = 7,00 \text{ TeV}$.

2. Calculer l'énergie d'un faisceau en eV puis convertir le résultat en joules.

Dans le « guide du LHC » fourni par le CERN, on lit : « L'énergie totale de chaque faisceau est d'environ 340 MJ , ce qui correspond à l'énergie d'un train de 680 tonnes lancé à pleine vitesse. Une telle énergie suffit à faire fondre environ 500 kg de cuivre...»

3. Quel type d'énergie concernant le train est évoquée dans le texte ? Calculer la vitesse v du train associée à cette énergie.
4. La correspondance « énergie d'un faisceau-énergie du train » annoncée est-elle plausible ?

La température de fusion du métal cuivre vaut $T_f = 1084^\circ\text{C}$. La capacité thermique du cuivre est d'environ $c = 400 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ et son enthalpie de fusion est $\Delta_{fus}h = 200 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

5. Une énergie de 340 MJ est-elle suffisante pour faire fondre 500 kg de cuivre initialement à la température de 84°C ?

Afin de déterminer plus précisément cette capacité thermique du cuivre, on exploite la manipulation suivante. On rappelle les données suivantes pour l'eau :

Capacité thermique massique : $c_e \approx 4 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; masse volumique : $\rho = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

On place dans une enceinte calorifugée de capacité thermique $C_t = 50 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ un volume de 100 mL d'eau à la température ambiante de la pièce qui est à 20°C . On ajoute ensuite 100 g de cuivre chauffé au préalable à 80°C . Une fois l'équilibre thermique atteint, on mesure une température finale de $24,8^\circ\text{C}$.

6. En déduire l'expression littérale de la capacité thermique du cuivre. L'application numérique donne alors $c_{exp} = 395 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, tandis que la valeur théorique que l'on trouve dans la littérature est $c_{théo} = 385 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Proposer une explication à cet écart.

B) Cogénération – Moteur de Stirling

La cogénération est un principe de production simultanée d'électricité et de chaleur. Elle fait partie des techniques les plus efficaces énergétiquement pour l'utilisation des énergies fossiles et renouvelables.

L'idée de la cogénération se base sur le fait que la production d'énergie électrique dégage une grande quantité de chaleur, habituellement dissipée et perdue dans l'environnement. Pour compléter la demande en énergie thermique (chauffage, process industriel, etc.), elle propose d'utiliser les pertes de la production d'énergie électrique également comme source d'énergie thermique.

Les grands constructeurs de chaudière domestique ont donc mis au point des prototypes permettant d'une part, de chauffer l'habitat et d'autre part, de produire de l'énergie électrique.

Une chaudière à cogénération permet de faire fonctionner un **moteur de Stirling** que nous allons ici étudier. Ce moteur en translation un piston. L'énergie mécanique ainsi produite est convertie en énergie électrique par un dispositif non étudié dans le sujet.

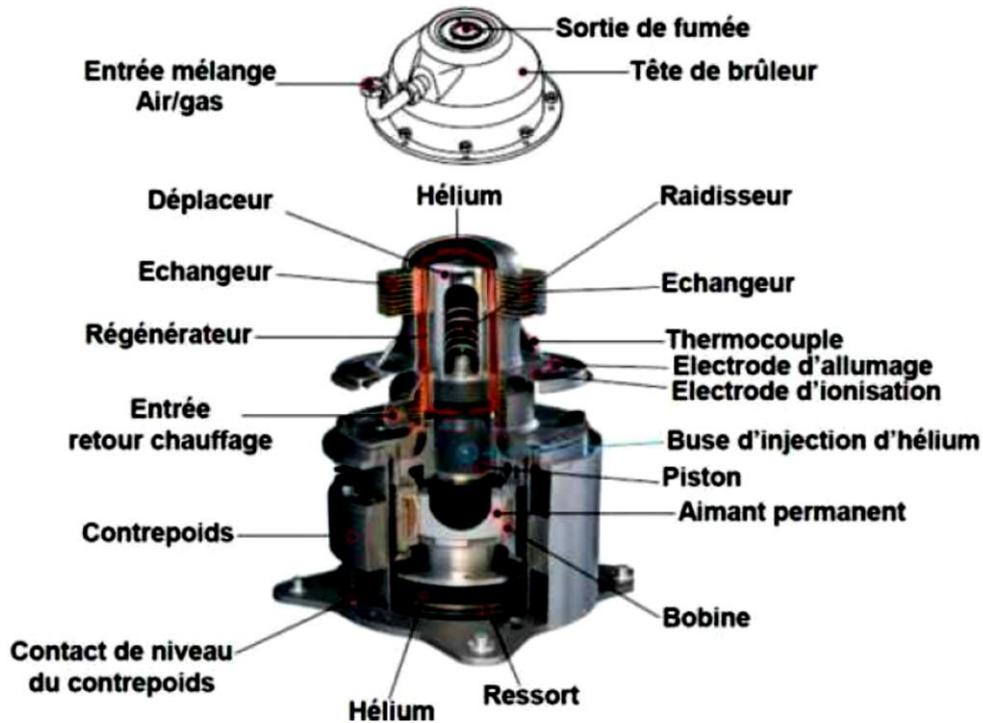


Figure 2 – Vue du cogénérateur étudié

Etude du moteur de Stirling

On considère $n = 40$ mmol d'hélium, assimilable à un gaz parfait de coefficient isentropique constant $\gamma = C_p / C_v = 1,66$, subissant un cycle modélisé par les évolutions suivantes à partir de l'état A de volume $V_A = 1$ L :

- Compression isotherme réversible au contact de la source S_f , jusqu'à l'état B, de volume $V_B = \frac{V_A}{4}$;
- Échauffement isochore au contact thermique de la source S_c jusqu'à l'état C ;
- Détente isotherme réversible au contact de la source S_c jusqu'à l'état D, de volume V_A ;
- Refroidissement isochore au contact thermique de la source S_f jusqu'à l'état A.

La source chaude S_c est maintenue à température constante $T_C = 930$ K par un brûleur alimenté en méthane et en air.

La source froide S_f est maintenue à température constante $T_f = 330$ K, en régime permanent de fonctionnement, par le retour d'eau froide des circuits de chauffage.

7. Représenter le schéma de principe du moteur de Stirling en précisant le sens réel des échanges et la nature des sources.
8. Calculer les valeurs numériques de température et de volume dans chacun des états. Donner la formule pour obtenir la pression à chaque état. On présentera les résultats dans un tableau.

Dans la suite, on prendra :

Etat	A	B	C	D
Pression	1,1 bar	4,4 bar	12,4 bar	3,1 bar

9. Représenter l'allure du cycle en coordonnées de Clapeyron (P, V).
10. Le cycle est-il moteur ou récepteur ? Justifier.
11. Rappeler les expressions des capacités thermiques d'un gaz parfait C_p et C_v en fonction de n, R et γ .
12. Déterminer pour la transformation $A \rightarrow B$ l'expression du travail W_{AB} et du transfert thermique Q_{AB} reçus par le fluide en fonction de n, R et T_f . Commenter le signe de W_{AB} .
13. Déterminer pour la transformation $B \rightarrow C$ l'expression du travail W_{BC} et du transfert thermique Q_{BC} reçus par le fluide en fonction de n, R, γ, T_f et T_c . Commenter le signe de Q_{BC} .
14. Déterminer pour la transformation $C \rightarrow D$ l'expression du travail W_{CD} et du transfert thermique Q_{CD} reçus par le fluide.
15. Déterminer pour la transformation $D \rightarrow A$ l'expression du travail W_{DA} et du transfert thermique Q_{DA} reçus par le fluide.
16. Exprimer le travail total W_t fourni par le moteur au cours d'un cycle, en fonction de n, R, T_f et T_c .
17. Le moteur produit du travail à partir de l'énergie thermique reçue au cours de la détente isotherme $C \rightarrow D$. Exprimer le rendement du moteur η_m uniquement en fonction de T_f et T_c et calculer sa valeur.
18. Calculer le travail total W_t fourni par le moteur au cours d'un cycle. Combien de cycles par seconde doit effectuer le moteur pour fournir une puissance P de 2 kW ?

PROBLEME N°2 : MESURES A L'AIDE D'UN SMARTPHONE

A) Vérification de la loi de Newton à l'aide d'un smartphone

Elle commence par vérifier la température de l'air, mais n'a pas de thermomètre. Son amie lui dit qu'elle peut probablement effectuer cette mesure à l'aide de son smartphone.

En effet, certains téléphones sont munis d'un capteur de température (pour certains smartphones il est aussi possible d'utiliser le capteur de température prévu pour surveiller la température de la batterie). Nous allons nous intéresser ici au temps de réponse d'un capteur de température présent dans un smartphone.

Dans la suite, nous allons assimiler ce capteur à une phase solide idéale (indilatable et incompressible) de capacité thermique C . On admettra la loi de Newton décrivant la puissance thermique \mathcal{P} algébriquement reçue par le capteur à la température T de la part du milieu extérieur à la température T_{ext} :

$\mathcal{P} = -a(T - T_{ext})$ où $a > 0$ est une constante.

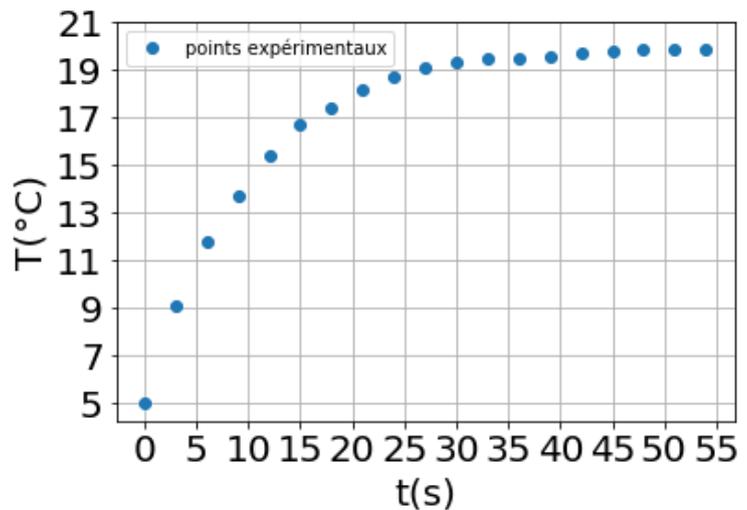
19. En appliquant le 1er principe des systèmes fermés au capteur de température, établir l'équation différentielle vérifiée par la température, en faisant apparaître une constante caractéristique τ dont on précisera l'expression en fonction des données du sujet.

On souhaite tester le modèle précédent. On place alors le téléphone étudié dans un réfrigérateur à la température $T_0 = 5^\circ\text{C}$ suffisamment longtemps pour que le capteur atteigne cette température T_0 .

A $t = 0$, on expose le téléphone à une température $T_{ext} = 20^\circ\text{C}$.

20. Donner l'expression de $T(t)$ en fonction de T_{ext}, T_0 et τ . Quelle est la signification physique de τ ?

Les valeurs des températures mesurées depuis l'instant $t = 0$ sont récupérées et permettent de tracer le graphe expérimental $T(t)$ ci-contre :



21. En déduire une valeur approchée de la constante τ , préciser la méthode utilisée pour déterminer τ .

B) Etude de l'oscillateur d'Helmholtz à l'aide d'un smartphone

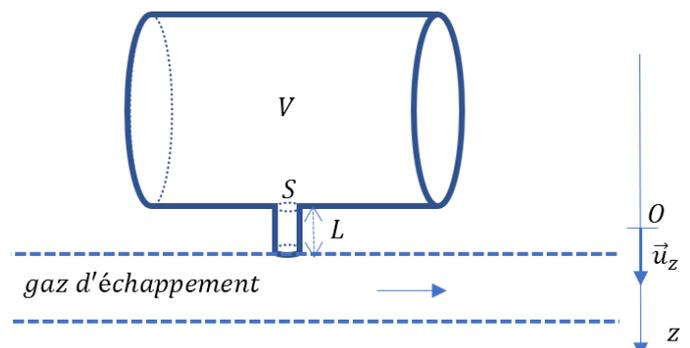
a) Mise en équation

Le résonateur d'Helmholtz est une cavité ouverte remplie d'air.

Ce gaz oscille notablement à une fréquence de résonance au niveau de l'ouverture lorsqu'il est stimulé. On fixe la géométrie de ces cavités pour régler la fréquence de résonance de l'onde acoustique. Ce procédé est utilisé dans certains tuyaux d'échappement afin de générer une onde acoustique à une fréquence souhaitée.



On va modéliser ce résonateur par un cylindre de volume $V \gg SL$ placé sur un autre cylindre de section S et de hauteur L (voir schéma ci-après). Le gaz contenu dans le cylindre de section S est affecté d'une masse m . Il peut être assimilé à un « bloc solide » de masse volumique ρ en oscillation. Le centre de masse de ce « bloc solide » est repéré par sa cote verticale z . En l'absence d'oscillation, on a $z = 0$.



Le volume V contient un gaz supposé parfait, à la pression $P(z) = P_0 + p(z)$ où P_0 représente la pression atmosphérique et $p(z)$ est la variation algébrique de pression liée aux oscillations, donc $p(z = 0) = 0$.

Les parois du récipient sont supposées calorifugées : les compressions et détentes de l'air dans V sont adiabatiques. Les oscillations sont suffisamment lentes pour être considérées comme mécaniquement réversibles. On travaille dans le référentiel lié au résonateur supposé Galiléen.

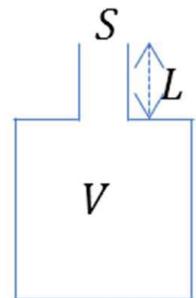
- 1) Justifier que la résultante \vec{f} des forces de pression s'exerçant sur la masse m est donnée par $\vec{f} = p(z)S\vec{u}_z$.

Les hypothèses de travail permettent d'appliquer les lois de Laplace, ainsi le produit $p(z)(V + Sz)^\gamma$ est une constante pendant les oscillations (γ est le coefficient isentropique du gaz défini comme le rapport des capacités thermiques massiques à pression constante et volume constant).

- 2) Montrer, en utilisant un développement limité à l'ordre 1, que $p(z) = -\frac{P_0\gamma Sz}{V}$.
- 3) En appliquant le principe fondamental de la dynamique à la masse m et en négligeant son poids ainsi que toute force dissipative, montrer que m vérifie l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique oscillant à la fréquence propre $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_0\gamma S}{\rho LV}}$.

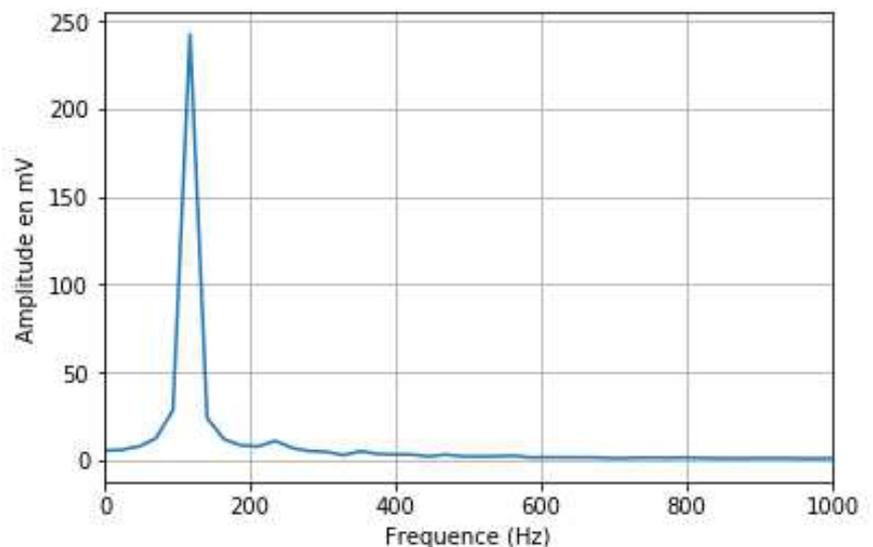
b) Vérification expérimentale

On peut réaliser un résonateur d'Helmholtz en utilisant une bouteille ayant le profil ci-contre. En soufflant à son embouchure et en capturant le signal acoustique émis à l'aide du microphone présent sur un téléphone portable, il est possible d'obtenir une tension u image de ce signal acoustique. Il est alors facile d'avoir le spectre $\hat{u}(f)$ de cette tension où f est la fréquence.



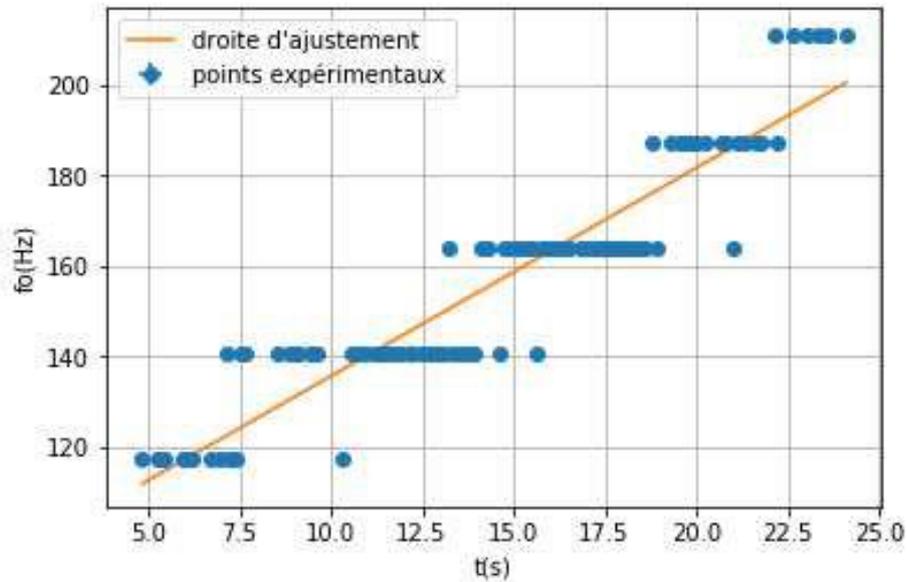
Avec une bouteille vide on obtient les résultats expérimentaux suivants :

- 4) En analysant le graphe ci-dessus, justifier le modèle de l'oscillateur harmonique établi au paragraphe précédent. En déduire une valeur approchée de la fréquence propre f_0 .



On remplit la bouteille précédente à l'aide d'un mince filet d'eau dont le débit volumique constant est D_v . Ce remplissage fait vibrer l'air présent dans la bouteille à la fréquence propre f_0 . On enregistre le signal acoustique émis au cours du remplissage de la bouteille initialement vide. On se limite à la situation telle que $V_{eau} \ll V$ où V_{eau} est le volume d'eau introduit dans la bouteille. On obtient alors les résultats expérimentaux suivants :

On remplit la bouteille précédente à l'aide d'un mince filet d'eau dont le débit volumique constant est D_v . Ce remplissage fait vibrer l'air présent dans la bouteille à la fréquence propre f_0 . On enregistre le signal acoustique émis au cours du remplissage de la bouteille initialement vide. On se limite à la situation telle que $V_{eau} \ll V$ où V_{eau} est le volume d'eau introduit dans la bouteille. On obtient alors les résultats expérimentaux suivants :



- 5) A l'aide du graphe ci-dessus, estimer la résolution en fréquence de ces mesures.
- 6) Etablir l'expression littérale de la fréquence du résonateur $f_0(t)$ en fonction du temps t et justifier que cette expression est en accord avec la régression linéaire proposée.

PROBLEME N°3 : SEJOUR A LA MONTAGNE

Ce problème propose d'étudier plusieurs phénomènes physiques vécus par une étudiante lors d'un séjour à la montagne.

Les différentes parties sont totalement indépendantes et peuvent être traitées dans l'ordre souhaité.

Quelques données pour l'eau :

Capacité thermique massique de l'eau liquide :	$c_{e,l} = 4 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
Capacité thermique massique de l'eau vapeur (phase gazeuse) :	$c_{e,g} = 1\,850 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
Capacité thermique massique de l'eau solide :	$c_{e,s} = 2 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
Enthalpie massique de fusion de la glace à 0°C :	$L_F = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$;
Masse volumique de l'eau liquide :	$\rho_e = 1 \text{ kg.L}^{-1}$

I. Au chalet – utilisation d'un four micro-ondes

L'étudiante utilise notamment un four à micro-ondes pour préparer ses repas.

1. ❤️ En exploitant les documents de l'annexe 2, déterminer par un modèle simple mais quantitatif le temps de décongélation de la viande hachée. Comparer aux valeurs proposées par la notice du micro-onde (annexe 2) et commenter brièvement.

II. Phénomènes physiques en montagne

Au cours de sa randonnée, l'étudiante a pu observer différents phénomènes physiques rencontrés en montagne et y réfléchir.

II.1 - Profil de pression - effet de la chute de pression sur la cuisson des aliments

La pression atmosphérique décroît avec l'altitude. On choisit un axe z orienté vers le haut, on note $p_0 = 1,0 \text{ bar}$ la pression atmosphérique au niveau du sol (en $z = 0$) et $p(z)$ sa valeur pour une altitude z .

On donne les relevés expérimentaux de l'évolution de cette pression $p(z)$ avec l'altitude dans le tableau page précédente (doc. 3).

2.  Sur votre feuille, dessiner l'allure du diagramme $p-T$ de l'eau, où figurent les trois phases solide, liquide et gaz, le point triple et le point critique.

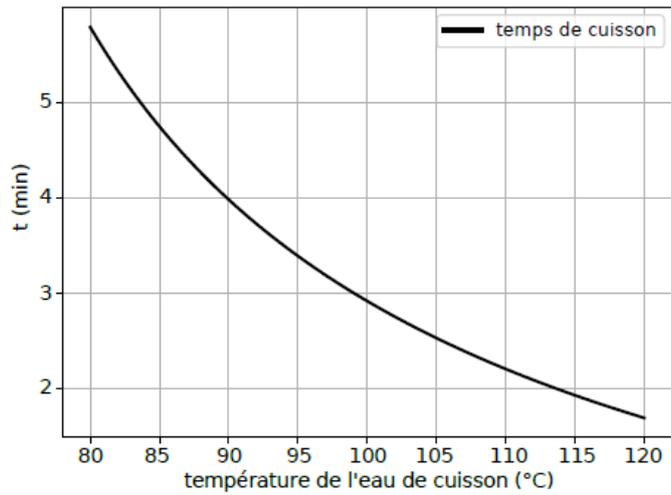
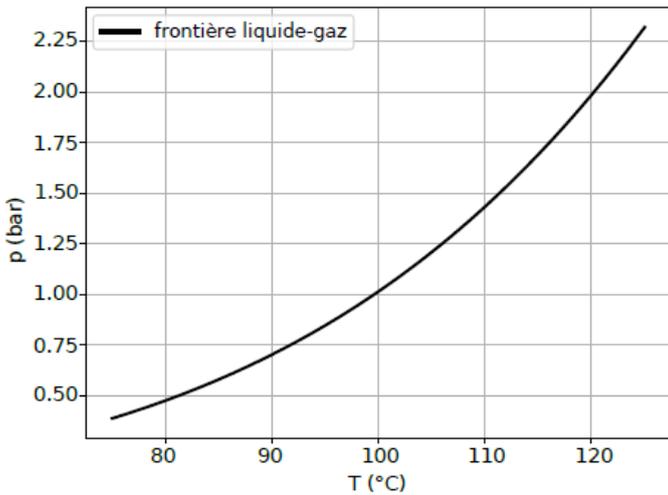
Des randonneurs préparent leur repas à une altitude de 2400 m . Ils souhaitent manger des œufs à la coque, pour lesquels on conseille traditionnellement une cuisson de 3 minutes dans l'eau bouillante.

La cuisson est bonne quand le jaune d'œuf atteint une température de 63°C . Un modèle simplifié permet d'obtenir le temps que doit passer l'œuf dans l'eau pour atteindre 63°C , en fonction de la température de l'eau dans laquelle il est plongé pour la cuisson (courbe du document 4 ci-dessous à droite).

3. **(Résolution de problème)** Expliquer pourquoi le temps usuel de trois minutes ne sera pas adapté ici, et donner le temps de cuisson des œufs pour nos deux randonneurs. On utilisera au besoin tout document de cette partie II.

Altitude m	Température °C	Pression kPa	Accélération gravitationnelle $g, \text{ m/s}^2$
0	15,00	101,33	9,807
200	13,70	98,95	9,806
400	12,40	96,61	9,805
600	11,10	94,32	9,805
800	9,80	92,08	9,804
1 000	8,50	89,88	9,804
1 200	7,20	87,72	9,803
1 400	5,90	85,60	9,802
1 600	4,60	83,53	9,802
1 800	3,30	81,49	9,801
2 000	2,00	79,50	9,800
2 200	0,70	77,55	9,800
2 400	-0,59	75,63	9,799
2 600	-1,89	73,76	9,799
2 800	-3,19	71,92	9,798
3 000	-4,49	70,12	9,797
3 200	-5,79	68,36	9,797
3 400	-7,09	66,63	9,796
3 600	-8,39	64,94	9,796
3 800	-9,69	63,28	9,795
4 000	-10,98	61,66	9,794
4 200	-12,3	60,07	9,794
4 400	-13,6	58,52	9,793
4 600	-14,9	57,00	9,793
4 800	-16,2	55,51	9,792
5 000	-17,5	54,05	9,791
5 200	-18,8	52,62	9,791
5 400	-20,1	51,23	9,790
5 600	-21,4	49,86	9,789
5 800	-22,7	48,52	9,785
6 000	-24,0	47,22	9,788
6 200	-25,3	45,94	9,788
6 400	-26,6	44,69	9,787

Document 3 : propriétés moyennes de l'air à haute altitude – en partie d'après relevés expérimentaux.
(Source : *Thermodynamique, une approche pragmatique*, Çengel et al.)



Document 4.

Gauche : zoom sur une portion du diagramme $p-T$ de l'eau.

Droite : temps de cuisson pour obtenir un œuf à la coque, en fonction de la température de l'eau de cuisson

II.2 - EFFET DE FOEHN

Lorsqu'un courant aérien rencontre un relief large, il s'élève, se détend et se refroidit. Puis en redescendant sur l'autre versant il est comprimé et se réchauffe. Dans certaines conditions qui brisent la symétrie (formation de nuages ou précipitations sur un des versants seulement), l'air redescendant peut arriver en bas avec une température significativement plus élevée qu'elle ne l'était en bas de l'autre versant : ce vent chaud et sec est appelé foehn. Il est très courant dans les vallées alpines, ainsi que dans d'autres régions du monde où il est nommé différemment. On en propose une étude dans cette partie.

Dans toute cette partie on modélise l'air comme un gaz parfait de masse molaire $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$ et d'indice adiabatique (rapport des capacités thermiques à pression constante et à volume constant) $\gamma = 1,4$.

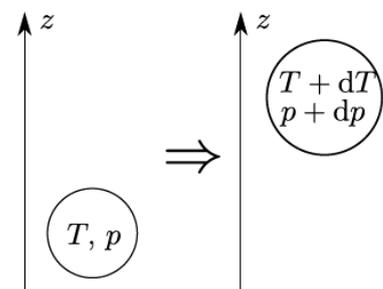
On note $R = 8,3 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ la constante des gaz parfaits, et $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ l'intensité de la pesanteur.

On pourra se servir des résultats admis en fin de partie suivante pour la suite du problème.

II.2-A. GRADIENT ADIABATIQUE SEC **

On s'intéresse d'abord aux variations de température subies par un volume d'air ascendant. On considère un axe (Oz) orienté vers le haut, $z = 0$ étant au niveau du sol.

On considère un volume élémentaire de fluide qui consiste en un volume fermé V d'air, situé à l'altitude z . Ce volume d'air est initialement à l'équilibre mécanique et thermique avec le reste de



Document 5

l'atmosphère, et on note $\rho(z)$, $p(z)$ et $T(z)$ sa masse volumique, pression et température.

On suppose que le volume d'air s'élève brusquement d'une très petite hauteur dz . On note dp et dT les variations de pression et de température associées. On suppose cette transformation adiabatique et réversible.

**** partie bonus à aborder lorsque toutes les autres parties sont traitées : on pourra utiliser directement le résultat fourni en fin de partie**

4. **Quelle est la caractéristique de la transformation qui permet de la supposer adiabatique ?
5. **Indiquer les conditions d'application de la loi de Laplace.
6. **En partant de la relation de Laplace qui relie pression et volume, établir la relation qui relie pression et température.
7. **En déduire la relation suivante entre variation de pression et de température pour le mouvement considéré : $(1 - \gamma) \frac{dp}{p} + \gamma \frac{dT}{T} = 0$
8. **En déduire une expression de $\frac{dT}{dz}$ en fonction de $\frac{dp}{dz}$, γ , M , ρ et R .
9. **En utilisant la relation $\frac{dp}{dz} = -\rho g$, et la relation trouvée à la question précédente, en déduire une expression de $\frac{dT}{dz}$ qui fait intervenir uniquement γ , M , g et R .
10. **Calculer la valeur numérique approchée de $\frac{dT}{dz}$ et l'exprimer en kelvins par kilomètre.

On prendra pour la suite $\frac{dT}{dz} \approx -10 \text{ K. km}^{-1}$

La valeur obtenue est appelée "gradient adiabatique sec", et donne la variation de température par kilomètre d'altitude lorsqu'une masse d'air s'élève de façon adiabatique et réversible.

II.2-B. EFFET DES PRECIPITATIONS

On suppose maintenant que la masse d'air possède une certaine humidité lorsqu'elle est au niveau du sol, et qu'en s'élevant la vapeur d'eau contenue dans l'air va se condenser sous forme liquide. On souhaite évaluer l'effet thermique de cette liquéfaction.

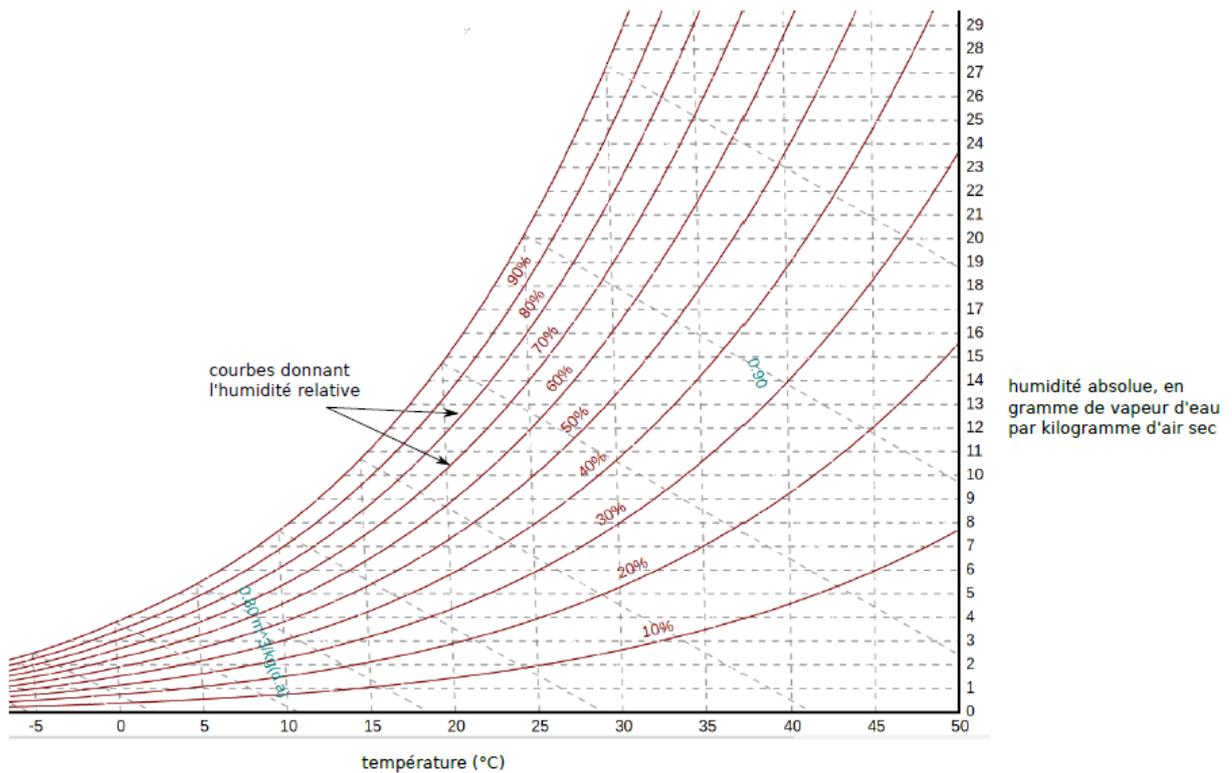
On donne :

- l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau : $h_{vap} = 2,3 \times 10^6 \text{ J. kg}^{-1}$, supposée indépendante de la température,
- la capacité thermique massique à pression constante de l'air dans les conditions considérées ici : $c_p = 1,0 \times 10^3 \text{ J. K}^{-1}. \text{kg}^{-1}$.

On considère le système isolé constitué de :

- une masse m_{air} d'air,
- une masse m_{vap} de vapeur d'eau ($H_2O_{(g)}$), très petite devant m_{air} .

11. ♥ On suppose que la masse m_{vap} de vapeur d'eau se liquéfie, à température et pression constantes, et que les seuls échanges thermiques qui ont lieu prennent place entre l'eau et l'air du système. En effectuant un bilan sur le système {eau}, donner l'expression du transfert thermique reçu par la masse d'air lors de cette transformation.
12. ♥ En supposant que l'air seul reçoit le transfert thermique précédent, de façon isobare, en déduire l'expression de son élévation de température ΔT en fonction de m_{vap}/m_{air} , h_{vap} et c_p . Dans l'expression précédente, le rapport m_{vap}/m_{air} est appelé "humidité absolue" de l'air, souvent exprimée en gramme par kilogramme. Par exemple une humidité absolue de 20 g/kg signifie 20 g de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec, soit donc $m_{vap}/m_{air} = 20 \times 10^{-3}$.



Document 6, d'après <http://www.flycarpet.net/en/PsyOnline>.

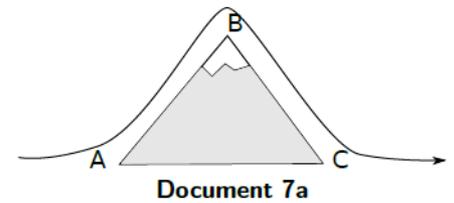
L'humidité relative de l'air est un autre paramètre mesuré par les météorologues. Elle s'exprime souvent en pourcentage, et elle dépend de l'humidité absolue et de la température.

Le diagramme psychrométrique ci-dessus (doc. 6) permet d'obtenir l'humidité absolue en connaissant la température de l'air et son humidité relative.

13. Exploiter le graphique ci-dessus pour donner la valeur de m_{vap}/m_{air} pour 20°C et 70% d'humidité relative.
14. En utilisant la valeur précédente du ratio m_{vap}/m_{air} , faire l'application numérique pour ΔT .
15. Pourquoi aurait-on pu prévoir dès le départ que $\Delta T > 0$?

II.2-C. EFFET DE FOEHN

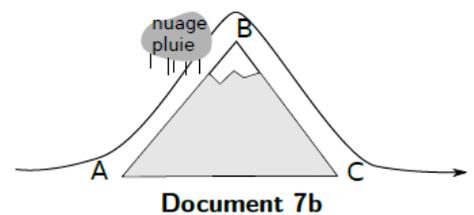
On s'intéresse enfin à l'effet de foehn. On considère d'abord un cas où l'atmosphère est sèche. On se place dans le cadre de la partie II.2-a. À cause du vent, une parcelle d'air s'élève le long d'une montagne dont le sommet est à l'altitude $h = 1000\text{ m}$ (document 7a). On modélise cette élévation comme étant adiabatique et réversible.



On prend par exemple $T_A = 20^\circ\text{C}$.

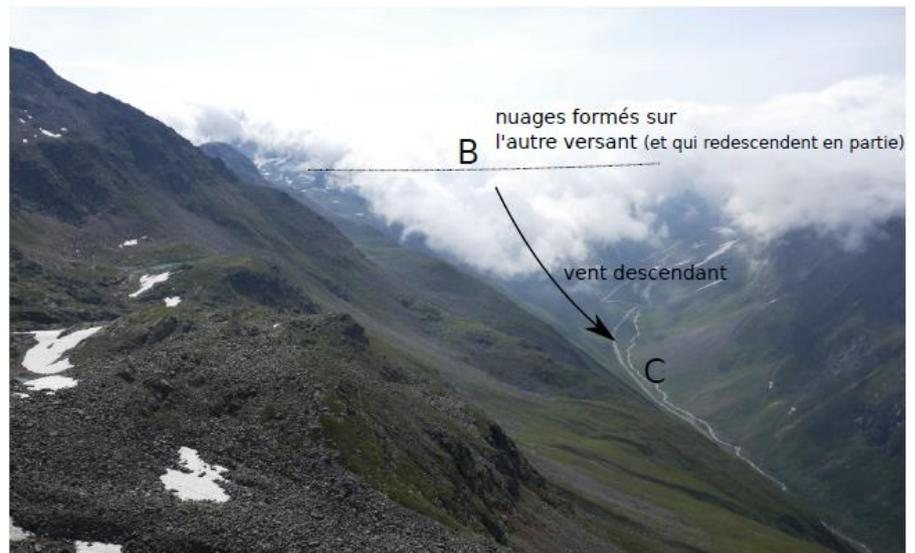
- 16. Quelle est la valeur de la température de la parcelle d'air en B ?
- 17. La parcelle d'air redescend ensuite sur l'autre flanc de la montagne et retourne en $z = 0$ (point C , de même altitude que A). Quelle est la valeur de la température en C ? Commenter.

On se place ensuite dans un cas où l'air en A est humide. En montant sur le flanc de la montagne, sa température chute et la vapeur d'eau qu'il contient se liquéfie. On suppose qu'une fois en B , cette vapeur d'eau s'est totalement liquéfiée et a été évacuée sous forme de nuage ou de pluie. L'air est alors sec au point B et effectue sa descente jusqu'en C (cf. document 7b).



- 18. Estimer la valeur de la température en C . Commenter.

Document 8 : exemple de manifestation de l'effet de foehn dans les Alpes. On voit nettement la formation de nuages sur le versant ascendant (versant non visible sur la photographie), alors qu'ils sont relativement absents du versant descendant (qui est celui visible sur la photographie).



ANNEXE N°2 : AUTOUR DU FOUR A MICRO-ONDES

Décongélation, réchauffage et cuisson avec les micro-ondes

Tableau de décongélation des plats

	Quantité	150 W ⊕ [min]	80 W ⊕ [min]	Temps de repos [min] ¹⁾
Produits laitiers				
Crème	250 ml	-	13-17	10-15
Beurre	250 g	-	8-10	5-10
Tranches de fromage	250 g	-	6-8	10-15
Lait	500 ml	14-16	-	10-15
Fromage blanc	250 g	10-12	-	10-15
Pains et gâteaux				
Quatre-quarts	1 pièce env. 100 g	1-2	-	5-10
Quatre-quarts	300 g	4-6	-	5-10
Tarte aux fruits	3 pièces env. 300 g	6-8	-	10-15
Gâteau au beurre	3 pièces env. 300 g	5-7	-	5-10
Gâteau à la crème	1 pièce env. 100 g	-	1,5	5-10
	3 pièces env. 300 g	-	4-4,5	5-10
Pâte levée, feuilletée	4 pièces	6-8	-	5-10
Fruits				
Fraises, framboises	250 g	7-8	-	5-10
Groseilles	250 g	8-9	-	5-10
Prunes	500 g	12-16	-	5-10
Viande				
Viande de bœuf hachée	500 g	16-18	-	5-10
Poulet	1000 g	34-36	-	10-15
Légumes				
Petits pois	250 g	8-12	-	5-10
Asperges	250 g	8-12	-	10-15
Haricots	500 g	13-18	-	10-15
Chou rouge	500 g	15-20	-	10-15
Epinards	300 g	12-14	-	10-15

⊕ Puissance des micro-ondes / ⊕ Temps de décongélation

1) Laissez les aliments reposer à température ambiante.

Pendant ce temps, la température se répartit dans l'aliment.

Décongélation, réchauffage et cuisson avec les micro-ondes

Tableau de réchauffage des plats

Boissons ²⁾	Quantité	1000 W ⊕ [min]	450 W ⊕ [min]	Temps de re- pos [min] ¹⁾
Café, température 60 – 65 °C	1 tasse, (200 ml)	00.50–1.10	–	–
Lait, température 60–65 °C	1 tasse, (200 ml)	1–1.50 ³⁾	–	–
Faire bouillir de l'eau	1 tasse, (125 ml)	1–1.50	–	–
Biberon (lait)	env. 200 ml	–	00.50–1 ³⁾	1
Grog, vin chaud température 60–65 °C	1 verre, (200 ml)	00.50–1.10	–	–
Plats ³⁾	Quantité	600 W ⊕ [min]	450 W ⊕ [min]	Temps de re- pos [min] ¹⁾
Aliments pour enfants (tempé- rature ambiante)	1 pot (200 g)	–	00.30–1	1
Côtelette, grillée	200 g	3–5	–	2
Filet de poisson, grillé	200 g	3–4	–	2
Rôtis en sauce	200 g	3–5	–	1
Garnitures	250 g	3–5	–	1
Légumes	250 g	4–5	–	1
Sauce pour rôti	250 ml	4–5	–	1
Soupes/pot-au-feu	250 ml	4–5	–	1
Soupes/pot-au-feu	500 ml	7–8	–	1

 Puissance des micro-ondes / ⊕ Temps de réchauffage

1) Laissez les aliments reposer à température ambiante.

Pendant ce temps, la température se répartit dans l'aliment.

2) Mettre le bâtonnet d'ébullition dans le récipient.

3) Ces temps sont valables pour une température de départ d'environ 5 °C.

Dans le cas des plats qui ne sont normalement pas conservés au réfrigérateur, la température ambiante de référence est de 20 °C.

Excepté les aliments pour bébés et les sauces délicates, les aliments sont réchauffés à une température de 70 - 75 °C.

Source : Notice d'utilisation et de montage four micro-ondes Miele

Note : chaleur massique = capacité thermique massique

Tableau 2 (suite). Chaleur massique de différentes denrées alimentaires et de leurs composants.

	Eau ¹ (en %)	Éléments solides (en %)	Chaleur massique		Chaleur latente de fusion ou de solidification (en kJ/kg)
			avant congélation (en kJ/kg.K)	après congélation (en kJ/kg.K)	
Lard (bacon) frais	39	—	2,30	1,30	130
Margarine	17-18	83-82	2,72-2,93	1,47	63 ± 63 ²
Melon	89	11	3,85	1,93	297
Miel	19	81	1,47	1,09	59
Noix	7,2	94,8	1,05	0,92	38
Œufs	70	30	3,18	1,67	234
Oignons, comestibles	80-89	20-11	3,61	1,92	268-297
Oignon, de fleurs	91	9	3,89	2,01	306
Oranges	84	16	3,85	1,84	285
Pain blanc	34	66	2,93	1,42	109-121
Pain de seigle	40	60	—	—	—
Pâte à pâtisserie	—	—	1,88	—	—
Pêches	87	13	3,85	1,72	293
Petits pois, verts	75	25	3,35	1,76	251
Poires	83	17	3,85	1,76	280
Poisson frais, maigre	73	27	3,43	1,80	255
frais, gras	60	40	2,85	1,59	209
fumé	—	—	3,18	—	—
séché	—	—	2,26	1,42	151
Pommes	83	17	3,85	1,76	280
Pommes de terre	74	26	3,35	1,76	243
Poudre de cacao	0,5	99,5	2,09	—	—
Raisin	81	19	3,68	1,88	264
Saindoux	0,7	99,3	2,51	1,67	121-147
Sucre	0,1	99,9	—	1,26	—
Tomates	94	6	3,89	2,05	314
Viande, bœuf maigre	72	28	3,25	1,76	234
Bœuf gras	51	49	2,55	1,49	172
Veau	63	37	2,95	1,67	209
Mouton maigre	67	33	3,06	1,72	222
Mouton gras	50	50	2,51	1,46	167
Porc gras	33-46	61-54	2,14	1,34	130-153
Vin	—	—	3,77	—	—
Volaille	74	26	2,93-3,18	1,67	247

¹ La teneur en eau varie dans de larges limites en fonction de la teneur en graisses : il en résulte donc une variation de la chaleur massique et de la chaleur latente de congélation.

² Chaleur latente de congélation de la graisse + chaleur latente de solidification.

Source : "Concepts de génie alimentaire" de Laurent Bazinet

D.M. DE PHYSIQUE N°7 – ELEMENTS DE CORRECTION

PROBLEME N°1 : AUTOUR DES ENERGIES

A) ÉNERGIE ELECTRIQUE AU LARGE HADRON COLLIDER DU CERN (CONCOURS ATS)

1. Si E est l'énergie consommée annuellement,

$$E = 270 \times 24 \times 3600 \times 120. 10^6 = 2,70. 10^2 \times 0,24. 10^2 \times 3,6. 10^3 \times 1,20. 10^8 = 2,70 \times 0,24 \times 3,6 \times 1,20. 10^{15}$$

$$E \approx 2,8. 10^{15} J$$

2. Énergie d'un faisceau : $E_{faisceau} = N_1 E_1$

$$E_{faisceau} = 3,01. 10^{14} \times 7,00. 10^{12} \approx 2,1. 10^{27} eV$$

$$E_{faisceau} \approx 21. 10^{26} \times 1,6. 10^{-19} \quad E_{faisceau} \approx 33,6. 10^7 \approx 336 MJ$$

3. L'énergie évoquée pour le train est de l'énergie cinétique. La vitesse du train est v telle que $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ d'où

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 340. 10^6}{680. 10^3}} = \sqrt{10^3} = 10\sqrt{10} m. s^{-1} \quad v \approx 32 m. s^{-1} \quad \text{soit} \quad v \approx 32 \times 3,6 km. h^{-1} \quad v \approx 115 km. h^{-1}$$

4. La correspondance annoncée est plausible, le train n'étant cependant pas très rapide.

5. On cherche l'énergie Q nécessaire pour faire fondre $m = 500 kg$ de cuivre initialement à $T_0 = 84^\circ C$

Système : cuivre ; transformation supposée monobare, avec comme chemin possible variation de la température du cuivre solide jusqu'à la température de fusion T_f puis fusion à (T, P) constants.

$$\Delta H \stackrel{\substack{1er\ principe \\ + monoP \\ + W_i=0}}{=} Q \stackrel{\substack{PCII\ puis \\ changement\ d'etat \\ \text{à } (T,P)\ constants}}{=} mc(T_f - T_0) + ml_f$$

Où $c = 400 J. K^{-1}. kg^{-1}$ $l_f = 200 J. g^{-1}$; $Q = 500 \times 400 \times 1000 + 500 \times 200. 10^3 = 20. 10^7 + 10. 10^7$

$$Q = 3. 10^8 J = 300 MJ$$

L'énergie de 340 MJ est donc suffisante pour faire fondre 500 kg de cuivre initialement à 84°C.

6. Système : {eau + solide cuivre + calorimètre}; transformation monobare à pression atmosphérique (avec équilibre dans l'état initial et l'état final) et adiabatique, le calorimètre étant supposé idéal.

$$\Delta H \stackrel{\substack{1er\ p. \\ monobare\ avec\ eq.}}{=} Q_P \stackrel{\substack{adiabatique}}{=} 0$$

On notera $T_1 = 20^\circ C$ la température initiale de l'eau, $T_2 = 80^\circ C$ la température initiale du cuivre et $T_f = 24,8^\circ C$ la tempéraure d'équilibre atteinte.

La masse d'eau considérée est $m_e = \rho V = 100 g = 0,1 kg$, celle de cuivre est $m_2 = 100 g$.

H fonction d'état extensive, en tenant compte à présent du calorimètre et en considérant l'eau comme une phase condensée :

$$\Delta H \stackrel{\substack{H\ fonction \\ d'etat\ extensive}}{=} \Delta H_{eau} + \Delta H_{Cuivre} + \Delta H_{calo} \stackrel{\substack{modèle \\ PCII}}{=} m_e c_e (T_f - T_1) + C_t (T_f - T_1) + m_2 c_{exp} (T_f - T_2)$$

Soit $\Delta H \stackrel{\text{H fonction}}{\equiv} (\rho V c_e + C_t)(T_f - T_1) + m_2 c_{exp}(T_f - T_2) \stackrel{\text{1er p. +}}{\equiv} Q_P \stackrel{\text{adiabatique}}{\equiv} 0$
d'état extensive +PCI *monobare avec éq.*

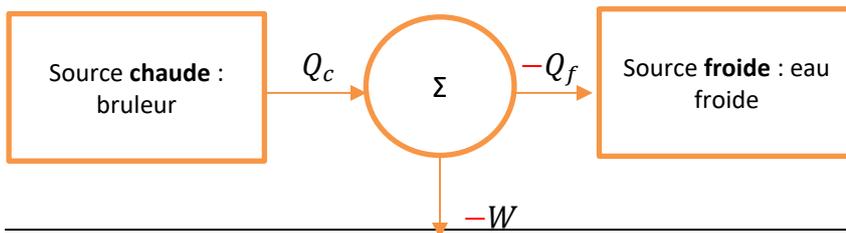
D'où $(\rho V c_e + C_t)(T_f - T_1) = m_2 c_{exp}(T_2 - T_f)$ d'où $c_{exp} = \frac{(\rho V c_e + C_t)(T_f - T_1)}{m_2(T_2 - T_f)}$ A.N. : $c_{exp} = 395 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

La capacité thermique du cuivre a été légèrement surestimée, probablement en raison des fuites thermiques qui ont été négligées.

B) Cogénération et moteur de Stirling (d'après ATS 2011, Capes Agricole 2017)

Système fermé : n moles de gaz parfait

7. Schéma de principe :



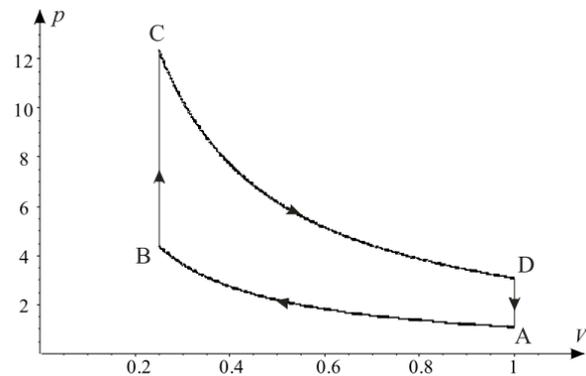
8. De A à B, compression isotherme au contact de la source froide : $T_A = T_B = T_f = 330 \text{ K}$. De C à D, détente isotherme au contact de la source chaude : $T_C = T_D = T_c = 930 \text{ K}$.

$V_B = V_A / 4 = 0,25 \text{ L}$. De B à C, échauffement isochore : $V_B = V_C = 0,25 \text{ L}$. De D à A, refroidissement isochore : $V_A = V_D = 1 \text{ L}$.

On en déduit la pression par la loi des gaz parfait : $P = \frac{nRT}{V}$

Etat	A	B	C	D
Température	330 K	330 K	930 K	930 K
Volume	1 L	0,25 L	0,25 L	1 L
Pression	1,1 bar	4,4 bar	12,4 bar	3,1 bar

9. Allure du cycle en coordonnées de Clapeyron (P, V) :



10. Le cycle est parcouru dans le sens des aiguilles d'une montre d'où $\mathcal{A} > 0$ d'où $W = -\mathcal{A} < 0$: cycle moteur.

11. $C_V = \frac{nR}{\gamma-1}$ et $C_P = \frac{\gamma nR}{\gamma-1}$

12. De A à B, la transformation est isotherme et réversible :

Etat A (P_A, T_f, V_A) → Etat B (P_B, T_f, V_B)

$$W_{AB} = \int_A^B -P_{ext} \cdot dV \stackrel{\text{réversible}}{\equiv} \int_A^B -P \cdot dV \stackrel{\text{gaz parfait}}{\equiv} \int_A^B -n R T_f \frac{dV}{V} \stackrel{\text{isotherme}}{\equiv} -n R T_f \ln \frac{V_B}{V_A}$$

$W_{AB} = n R T_f \ln 4 > 0$

Lors de la compression, le volume diminue ($dV < 0$) et les forces de pression extérieures qui poussent toujours dans le sens d'une réduction du volume ont un travail positif.

La transformation est isotherme, donc $\Delta U_{AB} \stackrel{\text{gaz parfait}}{=} C_V \Delta T \stackrel{\text{isotherme}}{=} 0$.

Premier principe : $\Delta U_{AB} \stackrel{\text{1er principe}}{=} W_{AB} + Q_{AB} \stackrel{\text{isotherme}}{=} 0$. D'où :

$$Q_{AB} = -W_{AB} = -n R T_f \ln 4 < 0$$

Le gaz **cède de la chaleur** à la source froide lors de la compression.

13. De B à C, la transformation est isochore :

Etat B (P_B, T_f, V_B) → Etat C ($P_C, T_c, V_C = V_B$)

Transformation isochore, donc $dV = 0$ et $W_{BC} \stackrel{\text{isochore}}{=} 0$.

$$\Delta U_{BC} \stackrel{\text{gaz parfait}}{=} C_V (T_c - T_B) = \frac{n R}{\gamma - 1} (T_c - T_f)$$

Premier principe : $\Delta U_{BC} \stackrel{\text{1er principe}}{=} W_{BC} + Q_{BC} = Q_{BC}$. D'où :

$$Q_{BC} = \frac{n R}{\gamma - 1} (T_c - T_f) > 0$$

Le gaz **reçoit de l'énergie** grâce à un transfert thermique de la source chaude.

14. De C à D, la transformation est isotherme et réversible : $P = P_{ext}$ à tout instant et $\delta W = -PdV$

$$W_{CD} = \int_C^D \delta W \stackrel{EQSMR+GP}{=} \int_C^D -n R T_c \frac{dV}{V} \stackrel{\text{isotherme}}{=} -n R T_c \ln \frac{V_D}{V_C} = -n R T_c \ln 4 < 0$$

La transformation est isotherme, donc $\Delta U_{CD} \stackrel{G.P.}{=} C_V \Delta T \stackrel{\text{isotherme}}{=} 0$.

Premier principe : $\Delta U_{CD} \stackrel{\text{1er principe}}{=} W_{CD} + Q_{CD} \stackrel{\text{isotherme}}{=} 0$. D'où :

$$Q_{CD} = -W_{CD} = n R T_c \ln 4 > 0$$

Lors de la détente, le gaz cède du travail et reçoit du transfert thermique.

15. De D à A, la transformation est isochore, donc $dV = 0$ et $W_{DA} = 0$.

$$\Delta U_{DA} = C_V (T_A - T_D) = \frac{n R}{\gamma - 1} (T_f - T_c)$$

Premier principe : $\Delta U_{DA} = W_{DA} + Q_{DA} = 0$. D'où :

$$Q_{DA} = \frac{n R}{\gamma - 1} (T_f - T_c) < 0$$

Le gaz **cède de l'énergie** à la source froide.

16. Le travail reçu par le moteur est :

$$W_{reçu} = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA} = n R (T_f - T_c) \ln 4$$

Le travail fourni W_t par le moteur au cours d'un cycle est :

$$W_t = -W_{reçu} = n R (T_c - T_f) \ln 4$$

17. Rendement du moteur η_m :

$$\eta_m = \frac{W_t}{Q_{CD}} = \frac{n R (T_c - T_f) \ln 4}{n R T_c \ln 4} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$$AN: \eta_m = 1 - \frac{330}{930} \approx 1 - \frac{1}{3} = \frac{2}{3} = 66\%$$

Il est remarquable de trouver le **rendement de Carnot** (cf. THM6), celui des moteurs réversibles alors que les transferts thermiques sont irréversibles. Cela vient de l'hypothèse que le moteur fonctionne à partir de l'énergie CD. En effet, il faudrait fournir aussi Q_{BC} . Ne pas en tenir compte supposerait qu'il soit gratuit. Cela pourrait être possible avec un

régénérateur d'énergie qui dans un cas idéal absorberait Q_{DA} pour le restituer en Q_{BC} car nous remarquons que $Q_{BC} = -Q_{DA}$. Un tel régénérateur idéal n'existe pas.

18. $W_t = 276 J$. En notant N le nombre de cycles par unité de temps, $P = W_t \cdot N$.

On en déduit : $N = \frac{P}{W_t} = 7,2$ cycles par secondes.

PROBLEME N°2 : MESURES A L'AIDE D'UN SMARTPHONE

A) VERIFICATION DE LA LOI DE NEWTON A L'AIDE D'UN SMARTPHONE

19. Pendant le temps dt , le capteur reçoit

$$\delta Q = P dt = -a(T - T_{ext}) dt$$

20. La capacité thermique C s'exprime en $J \cdot K^{-1}$ (cf. ci-dessous l'expression des variations d'énergie interne et d'enthalpie)

Pour une phase condensée indilatable incompressible, on a :

$$\underbrace{dU}_{PCII} \equiv \underbrace{dH}_{PCII} \equiv C dT$$

21. Premier principe appliqué au capteur au cours de la transformation élémentaire : $dU = \delta Q + \delta W$

Cas d'une transformation isochore (PCII : $V = cte$) en l'absence de travail autre que celui des forces de pression :

$$\delta W = 0 \quad \text{soit} \quad dU = \delta Q = \mathcal{P}dt$$

Aussi, argument équivalent : Cas d'une transformation monobare sans travail autre que le travail des forces de pression :

$$\underbrace{dH}_{\substack{1er\ principe \\ + monoP \\ + W_i=0}} \equiv \delta Q = \mathcal{P}dt = -a(T - T_{ext}) dt \quad \text{et} \quad \underbrace{dU}_{PCII} \equiv \underbrace{dH}_{PCII} \equiv C dT = -a(T - T_{ext}) dt \quad \text{d'où}$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{a}{c}(T - T_{ext}) \quad \text{ou encore} \quad \frac{dT}{dt} + \frac{a}{c}T = \frac{a}{c}T_{ext}$$

de la forme demandée, en définissant $\tau = \frac{c}{a}$:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau}T = \frac{1}{\tau}T_{ext}$$

22. Solution générale de cette ED1 linéaire à coefficients constants, avec second membre constant.

$$T(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + T_{ext}$$

Or C.I. : $T(t=0) \underset{C.I.I}{=} T_0 \underset{\substack{expression \\ \text{à } t=0}}{=} A + T_{ext} \quad \text{d'où}$

$$T(t) = (T_0 - T_{ext}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + T_{ext}$$

23. Détermination de τ : **Méthode N°1** : La tangente à l'origine coupe l'asymptote à la date $t = \tau$.

On lit graphiquement $\tau \approx 10 s$ (peu précis)

Méthode N°2 : À l'instant $t = \tau$, l'élévation de température est 63 % de l'élévation totale :

$$T(\tau) = (T_0 - T_{ext}) \exp\left(-\frac{\tau}{\tau}\right) + T_{ext} = 0,63(T_0 - T_{ext}) + T_{ext}$$

La température est donc $5 + 15 \times 0,63 = 5 + 6,3 \times 1,5 = 5 + 9,45 = 14,5^\circ\text{C}$

Ceci correspond à $\tau \approx 10,5 \text{ s}$ d'après le tableau de valeurs.

B) ÉTUDE DE L'OSCILLATEUR D'HELMHOLTZ A L'AIDE D'UN SMARTPHONE

I. a) Mise en équation

33) La masse m subit :

une force pressante exercée par le gaz situé dans le volume V , à la pression $P(z) = P_0 + p(z)$:

$$\vec{f}_1 = (P_0 + p(z)) \times S \vec{u}_z$$

une force pressante exercée par le gaz d'échappement, à la pression P_0 :

$$\vec{f}_2 = -P_0 \times S \vec{u}_z$$

La résultante de ces forces pressantes est

$$\vec{f} = \vec{f}_1 + \vec{f}_2 = (P_0 + p(z)) \times S \vec{u}_z - P_0 \times S \vec{u}_z$$

soit

$$\vec{f} = p(z) S \vec{u}_z$$

34) La pression liée aux oscillations est nulle lorsque le gaz situé dans le cylindre vertical est immobile, la pression est alors P_0 . La loi de Laplace s'écrit donc :

$$P(z)(V + Sz)^\gamma = P_0 V^\gamma$$

donc

$$P(z) = P_0 + p(z) = P_0 \left(\frac{V}{V + Sz}\right)^\gamma = P_0 \left(\frac{V + Sz}{V}\right)^{-\gamma} = P_0 \left(1 + \frac{Sz}{V}\right)^{-\gamma}$$

La surpression liée aux oscillations s'écrit donc

$$p(z) = P_0 \left(1 + \frac{Sz}{V}\right)^{-\gamma} - P_0$$

Un développement limité à l'ordre 1 en $\frac{Sz}{V} \ll 1$ conduit à

$$p(z) \approx P_0 \left(1 - \gamma \frac{Sz}{V} - 1\right) = P_0 \left(-\gamma \frac{Sz}{V}\right)$$

$$p(z) \approx -\frac{P_0 \gamma Sz}{V}$$

35) La masse m est soumise à la résultante des forces pressantes uniquement si son poids est négligé.

Le principe fondamental de la dynamique permet d'écrire :

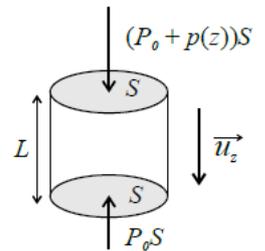
$$m\vec{a} = \vec{f}$$

$$m\vec{a} = p(z) S \vec{u}_z$$

$$\rho S L \vec{a} = -\frac{P_0 \gamma Sz}{V} S \vec{u}_z$$

$$\vec{a} = -\frac{P_0 \gamma Sz}{\rho L V} \vec{u}_z$$

en projection verticale



$$\ddot{z} = -\frac{P_0\gamma S}{\rho LV}z$$

ou

$$\ddot{z} + \frac{P_0\gamma S}{\rho LV}z = 0$$

Le système est un oscillateur harmonique de pulsation propre

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{P_0\gamma S}{\rho LV}}$$

et de fréquence propre

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_0\gamma S}{\rho LV}}$$

II. b) Vérification expérimentale

- 36) Un oscillateur peu amorti présente une résonance au voisinage immédiat de sa fréquence propre. La résonance étant très importante, **on peut en déduire que l'oscillateur est très peu amorti**, donc très proche d'un oscillateur harmonique.

On lit à la résonance

$$f_0 \approx 1,2 \cdot 10^2 \text{ Hz}$$

- 37) Les points expérimentaux sont à environ 117 ; 140 ; 163 ; 187 ; 213 Hz, ce qui correspond à une **résolution en fréquence d'environ 23 Hz**.

- 38) Le volume d'air s'écrit, au cours du temps :

$$V(t) = V - D_v t$$

où $D_v t$ est le volume d'eau dans la bouteille.

La fréquence propre varie donc au cours du temps :

$$f_0(t) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_0\gamma S}{\rho LV(t)}}$$

$$f_0(t) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_0\gamma S}{\rho LV}} \times \sqrt{\frac{V}{V(t)}} = f_0 \sqrt{\frac{V}{V - D_v t}} = f_0 \left(\frac{V}{V - D_v t}\right)^{1/2} = f_0 \left(\frac{V - D_v t}{V}\right)^{-1/2}$$

$$f_0(t) = f_0 \left(1 - \frac{D_v t}{V}\right)^{-1/2}$$

Or $\frac{D_v t}{V} \ll 1$, on peut (encore) faire un développement limité à l'ordre 1 en $\frac{D_v t}{V}$

$$f_0(t) = f_0 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{D_v t}{V}\right)$$

$$f_0(t) = f_0 + \frac{D_v f_0}{2V} t$$

On obtient $f_0(t)$ fonction affine croissante du temps, ce qui correspond au relevé expérimental.

Calcul de la pente

$$pente = \frac{D_v f_0}{2V} = \frac{200 - 120}{7 \times 2,5} = \frac{80 \times 4}{7 \times 10} = \frac{32}{7} \approx 4,5 \text{ Hz} \cdot \text{s}^{-1}$$

PROBLEME N°3 : SEJOUR A LA MONTAGNE

I. AU CHALET

I.2- Pause-café

I.2-a. : Four micro-ondes

Etude de la décongélation de la viande hachée

S'approprier

Il s'agit de faire un bilan énergétique afin de vérifier le temps de décongélation de la viande hachée.

Pour cela on utilisera encore le premier principe de la thermodynamique.

Analyser

La capacité thermique considérée sera celle du boeuf maigre. Elle vaut $c_{hc} = 1,76 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour de la viande encore congelée et $c_h = 3,25 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour de la viande décongelée.

L'enthalpie massique de fusion vaut $l_f = 234 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

La puissance du micro-ondes en mode décongélation est maintenant $\mathcal{P}' = 150 \text{ W}$. La durée de décongélation pour $m_h = 500 \text{ g}$ de viande hachée est τ_h comprise entre 16 et 18 min.

La température initiale de la viande hachée sera $T_i = 255 \text{ K}$, température du congélateur.

Pour la température finale, on prendra $T_f = 273 \text{ K}$, juste à la fin du changement d'état.

Réaliser

On considère le système constitué de la viande hachée. Le système étant immobile et la transformation monobare à la pression atmosphérique, le premier principe donne : $\Delta H = Q'$

Q' est la quantité de chaleur reçue par le système et ΔH sa variation d'enthalpie.

La viande hachée est une phase condensée, incompressible et indilatable ; sa variation d'enthalpie est indépendante du chemin suivi.

On considère donc dans un premier temps l'évolution de la température initiale à la température de fusion. La viande étant toujours congelée : $\Delta H_1 = m_h c_{hc} (T_f - T_i)$.

Dans un second temps, on s'intéresse à la décongélation : $\Delta H_2 = m_h l_f$

On a donc $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$

La quantité de chaleur Q' est fournie par le micro-ondes pendant la durée τ_h de la décongélation.

Ainsi, en négligeant les pertes, $Q' = \tau_h \mathcal{P}'$.

On en déduit :

$$\tau_h = \frac{m_h c_{hc} (T_f - T_i) + m_h l_f}{\mathcal{P}'}$$

Application numérique : en prenant donc $\Delta T = 18 \text{ K}$, on en déduit : $\tau_h = 886 \text{ s} \approx 15 \text{ min}$.

Valider

Là encore, pour des raisons similaires à celles évoquées précédemment, cette durée est légèrement inférieure à la durée préconisée.

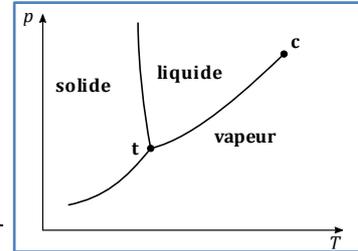
II. Phénomènes physiques en montagne

II.1- Effet de la chute de pression sur la cuisson des aliments

2. Diagramme p - T de l'eau

t : point triple

c : point critique.



3. (Résolution de problème)

D'après le document 3, on lit la pression extérieure : $z = 2400 \text{ m} \Rightarrow p = 76 \text{ kPa} = 0,76 \text{ bar}$

Sur le document 4 (gauche), on voit que l'eau bout à 92°C pour une pression de $0,76 \text{ bar}$.

Sur le document 4 (droite), on apprend que le temps de cuisson à 92°C est d'environ **3 min 45 s**.

Les randonneurs auront besoin de plus de trois minutes pour cuire les œufs à cause d'une température d'ébullition plus basse qu'au niveau de la mer.

II.2- EFFET DE FOEHN

II.2-A. GRADIENT ADIABATIQUE SEC

4. L'élévation du volume d'air est « brutale », donc **rapide**, alors que les échanges thermiques sont lents.

D'où l'hypothèse possible d'une transformation adiabatique.

5. La loi de Laplace peut être utilisée lors de la transformation **adiabatique réversible d'un gaz parfait**.

Loi de Laplace reliant pression et volume :

$$pV^\gamma = cte$$

6. On élimine V grâce à l'équation du gaz parfait :

$$p \left(\frac{nRT}{p} \right)^\gamma = cte$$

nR est une constante, donc la loi de Laplace reliant pression et température est :

$$p^{1-\gamma} T^\gamma = cte$$

7. On écrit la différentielle logarithmique de l'équation précédente, en une étape ou en plusieurs :

$$\ln(p^{1-\gamma} T^\gamma) = cte$$

$$\ln(p^{1-\gamma}) + \ln(T^\gamma) = cte$$

$$(1 - \gamma) \ln(p) + \gamma \ln(T) = cte$$

En différentiant, on obtient l'équation demandée :

$$(1 - \gamma) \frac{dp}{p} + \gamma \frac{dT}{T} = 0$$

8. L'équation précédente conduit à

$$dT = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{T}{p} dp$$

donc

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{T}{p} \frac{dp}{dz}$$

or en exploitant la loi des gaz parfaits :

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

d'où

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{M}{\rho R} \frac{dp}{dz}$$

9. Sachant que

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

On obtient

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{M}{\rho R} \times (-\rho g)$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{Mg}{R}$$

10. Application numérique :

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{0,4}{1,4} \times \frac{29 \times 10^{-3} \times 9,8}{8,3} \approx -\frac{0,4}{8,3} \times \frac{29}{1,4} \times 10^{-3} \times 10 \approx -\frac{1}{20} \times 20 \times 10^{-2} \text{ K.m}^{-1}$$

$$\frac{dT}{dz} \approx -10 \text{ K.km}^{-1}$$

II.2-B. EFFET DES PRECIPITATIONS

11. Une masse m_{vap} se liquéfie à température et pression constantes, donc le transfert thermique reçu par l'eau au cours de cette transformation est

$$\Delta H \underset{P=cte}{=} Q_{eau} \underset{\substack{\text{liquéfaction} \\ \text{à } P=cte \text{ donc } T=cte}}{=} m_{vap} \times (-h_{vap}) = -m_{vap} h_{vap}$$

L'eau échange de l'énergie avec l'air, donc le transfert thermique reçu par l'air est $Q_{air} = -Q_{eau}$

$$Q_{air} = m_{vap} h_{vap}$$

12. Le transfert thermique reçu par l'air de façon isobare s'écrit également

$$\Delta H \underset{P=cte}{=} Q_{air} \underset{PCH}{=} m_{air} c_p \Delta T$$

donc

$$\Delta T = \frac{m_{vap} h_{vap}}{m_{air} c_p}$$

13. L'intersection de l'isotherme 20°C et de la courbe correspondant à 70% d'humidité relative donne :

$$\frac{m_{vap}}{m_{air}} \approx 10,3 \text{ g/kg} = 1,03 \times 10^{-2}$$

14. Application numérique : $\Delta T = \frac{m_{vap} h_{vap}}{m_{air} c_p} = 1,03 \times 10^{-2} \times \frac{2,3 \times 10^6}{1,0 \times 10^3}$

$$\Delta T \approx 24 \text{ K}$$

15. L'eau libère de la chaleur en se condensant, l'air reçoit donc de l'énergie thermique : il est donc logique que sa température s'élève : $\Delta T > 0$.

II.2-C. EFFET DE FOEHN

16. Le gradient thermique est : $\frac{dT}{dz} \approx -10 \text{ K.km}^{-1}$

La température baisse donc de $\Delta T_{grad} = 10 \text{ K}$ quand la parcelle d'air passe de A à B ; d'où

$$T_B = T_A - \Delta T_{grad} = 10^\circ \text{C}$$

17. Même gradient de température, mais cette fois l'air redescend ; la température retrouve la même valeur qu'en A.

$$T_C = T_A = 20^\circ \text{C}$$

L'évolution est réversible pour l'air sec.

18. Phase de montée :

L'air subit la chute de température précédente (ΔT_{grad}) mais également l'élévation de température due à la liquéfaction de la vapeur d'eau :

$$T_{B'} = T_A - \Delta T_{grad} + \Delta T$$

$$T_{B'} = 20 - 10 + 24 = 34^\circ\text{C}$$

Phase de descente : L'air est sec, la variation de température est la même que précédemment : $T_{C'} = T_{B'} + \Delta T_{grad}$

$$T_{C'} = 44^\circ\text{C}$$

L'air redescendant arrive en bas avec une température significativement plus élevée qu'elle ne l'était en bas de l'autre versant, c'est l'effet de foehn.

