

DM N°5 – REVISIONS DE THERMODYNAMIQUE

A rendre pour le Vendredi 14 Novembre au plus tard

Niveau 1 : questions ❤ seulement

Niveau 2 : Tout sauf questions **

Niveau 3 : Tout (ne pas toutes les faire ! choisir les questions ** du problème N°1 OU du problème N°2 notamment)

PROBLEME N°1 : UN MOTEUR A ESSENCE TURBOCOMPRESSE (CCMP)

Le moteur qui équipe les automobiles thermiques peut être décrit comme une machine ditherme à air (on néglige la quantité de carburant et les gaz brûlés devant l'air au niveau des pistons) fonctionnant de manière pseudo-cyclique (l'air rejeté par la ligne d'échappement n'est évidemment pas le même que celui qui est admis dans le filtre à air, mais il est en même quantité). On caractérise un tel moteur par les températures de la «source froide» T_f (en pratique c'est celle de l'air ambiant et on prendra $T_f = 27^\circ\text{C}$) et de la «source chaude» T_c (au moins égale à celle du point le plus chaud du cycle, après la combustion du carburant).

A- Rendement du moteur

- 1 - ❤ Définir le rendement η d'un tel moteur thermique ditherme. Énoncer et démontrer avec soin le théorème de Carnot.

Certains véhicules sont mus par un moteur à essence à quatre temps ; le carburant utilisé est de l'Eurosuper 95 produisant, par combustion totale, une énergie $W_v = 3,6 \cdot 10^7 \text{ J.L}^{-1}$ (joules produits par litre de carburant consommé). En circulant à la vitesse stabilisée $v = 100 \text{ km.h}^{-1}$ sur route horizontale, le moteur du véhicule étudié ici développe la puissance $\mathcal{P} = 18 \text{ kW}$ (pour vaincre essentiellement les frottements aérodynamiques) et consomme une quantité q égale à 5,4 litres de carburant pour parcourir 100 km .

- 2 - ❤ Déduire des données ci-dessus le rendement réel η_r du moteur.

Quelle inégalité concernant T_c peut-on déduire du théorème de Carnot ?
Cette inégalité est-elle vérifiée en pratique, sachant que dans le moteur étudié la température est $T_c \simeq 2000 \text{ K}$?

B- Thermodynamique des gaz

Une quantité donnée de gaz est caractérisé par ses fonctions d'état énergie interne U et enthalpie H et par leurs dérivées $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$ et $C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$ qui sont les capacités thermiques du gaz. On définit le rapport adiabatique $\gamma = C_P/C_V$; dans ce qui suit ce rapport γ est supposé constant.

- 3 - De quel(s) paramètre(s) thermodynamique(s) dépendent les fonctions U et H dans le cadre du modèle du gaz parfait ?

En déduire les expressions de C_P et C_V en fonction de la quantité de matière n , du rapport adiabatique γ et d'une constante fondamentale.

On admettra l'expression de l'entropie molaire $s_m(T, V)$ d'un gaz parfait de température T et de volume V :

$$s_m(T, V) = s_m(T_0, V_0) + \frac{R}{\gamma - 1} \ln \frac{T}{T_0} + R \ln \frac{V}{V_0} \quad (1)$$

- 4 - En déduire la relation de Laplace qui relie les variations de pression P et de volume V d'un gaz parfait évoluant de manière isentropique depuis un état initial (P_0, V_0) .

C- Le cycle moteur à quatre temps

Le moteur à quatre temps a été décrit pour la première fois en 1862 par l'ingénieur Alphonse Beau. Ce cycle est décrit par l'air (pris à l'extérieur à la pression atmosphérique p_0), assimilé à un gaz parfait diatomique, qui évolue entre un volume minimal V_1 et un volume maximal $V_2 = \alpha V_1$ avec le taux de compression $\alpha > 1$. Il est représenté sur la figure 3 en échelle doublement logarithmique dans le diagramme de Clapeyron.

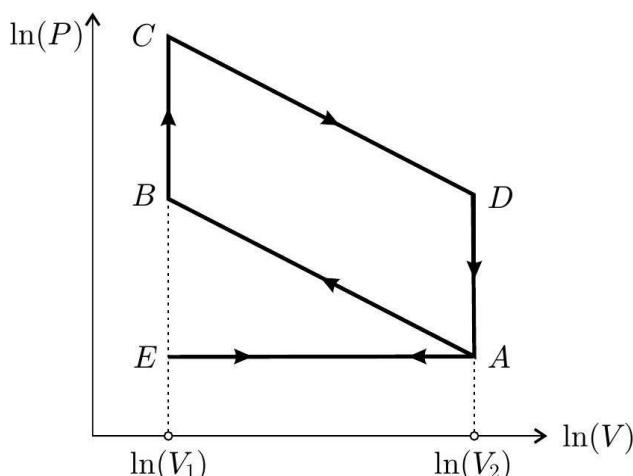


Figure 3 – Cycle moteur de Beau à quatre temps en échelle logarithmique

Ce cycle comporte :

- Une phase d'admission EA de l'air extérieur dans les cylindres du moteur ;
- Une phase de compression adiabatique AB de l'air enfermé dans le piston (mélangé avec un peu d'essence) suivie de la combustion BC quasiment instantanée provoquée par une étincelle produite par le système électrique d'allumage ;
- Une phase motrice de détente adiabatique CD de l'air (et du combustible brûlé) jusqu'à l'ouverture en D des soupapes d'échappement avec chute brutale DA de la pression ;
- Une phase d'échappement AE évacuant les gaz brûlés avant la reprise du cycle.

Dans toute la suite de l'étude les phases d'échappement AE et d'admission EA ne jouent aucun rôle et on pourra donc les ignorer.

- 5- ** On considère d'abord que toutes les évolutions au sein du cycle $ABCDAEA$ sont réversibles. Montrer que les transformations AB et CD sont décrites par deux droites parallèles et déterminer leur pente commune $p_{rv} < 0$.
- 6- ** Reproduire sur votre copie le diagramme de la figure 3 en y ajoutant les isothermes de températures T_f (température minimale du cycle) et T_c (température maximale du cycle).
- 7- ❤️ Exprimer les transferts thermiques sur les phases AB, BC, CD et DA en fonction des températures T_A, T_B, T_C et T_D aux divers points du cycle.
En déduire l'expression η_{rv} du rendement du cycle moteur de la figure 3 en fonction des températures puis en déduire que $\eta_{rv} = 1 - \alpha^{1-\gamma}$.
- 8- ❤️ Pour le moteur étudié ici $\alpha = 9$ et on prendra pour l'air $\gamma = 1,4$. Calculer η_{rv} et commenter.
En réalité l'hypothèse de réversibilité des transformations adiabatiques AB et CD n'est pas réaliste ; pour s'approcher du rendement réel on la remplace par un modèle amélioré, toujours adiabatique mais non réversible, dans lequel le cycle devient $AB'C'D'A$, mais on suppose toujours que AB' et $C'D'$ sont des droites de pentes (négatives) respectives p'_{comp} et p'_{det} pour la compression AB' et la détente $D'A$.
- 9- ** En application du second principe montrer que $p'_{comp} < p_{rv} < p'_{det}$.

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

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.

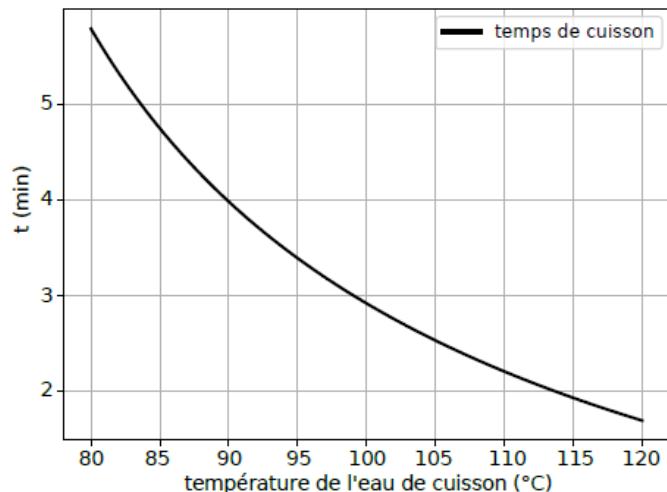
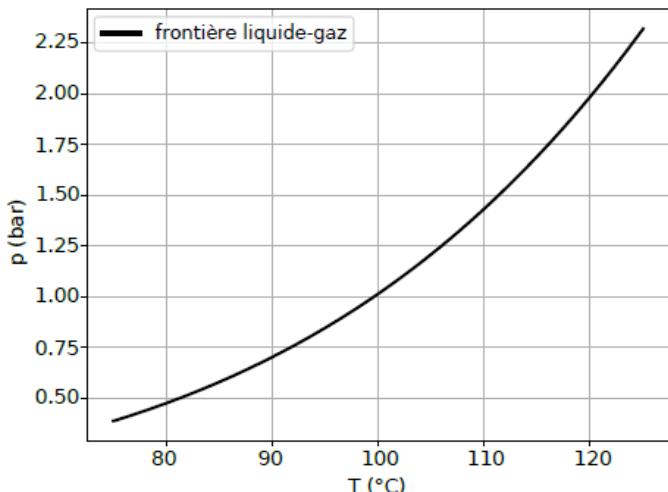
Des randonneurs préparent leur repas à une altitude de 2400 m. Ils souhaitent manger des œufs à la coque, pour lesquels on conseille traditionnellement une cuisson de 3 minutes dans l'eau bouillante.

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 f 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 $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et d'indice adiabatique (rapport des capacités thermiques à pression constante et à volume constant) $\gamma = 1,4$.

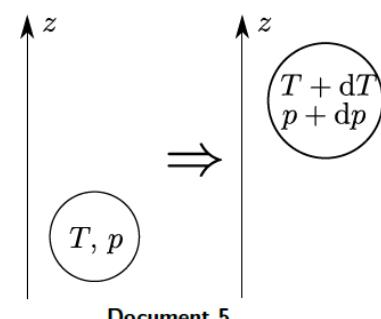
On note $R = 8,3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ la constante des gaz parfaits, et $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ l'intensité de la pesanteur.

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 : $c_p = 1,0 \times 10^3 \text{ J. K}^{-1}. \text{kg}^{-1}$.

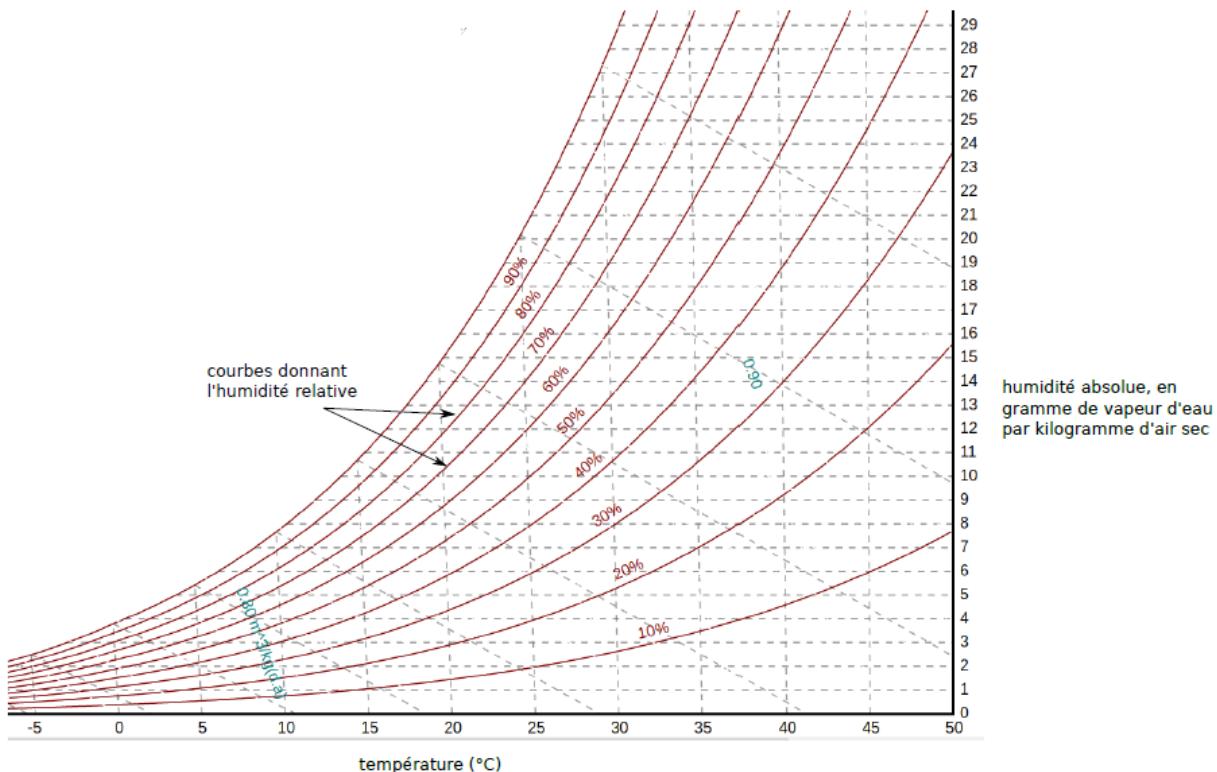
On considère le système isolé constitué de :

- 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.

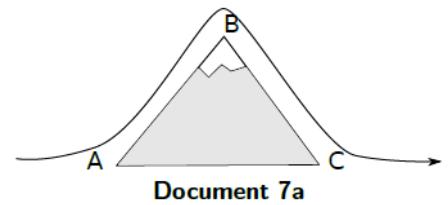
13. Exploiter le graphique ci-dessus pour donner la valeur de m_{vap}/m_{air} pour $20^\circ C$ et 70% d'humidité relative.

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.

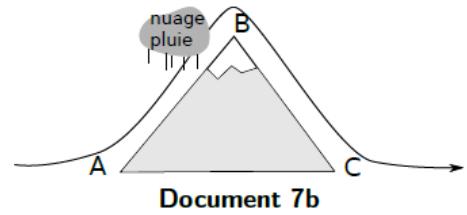


On prend par exemple $T_A = 20^\circ\text{C}$.

16. Quelle est la valeur de la température de la parcelle d'air en *B* ?

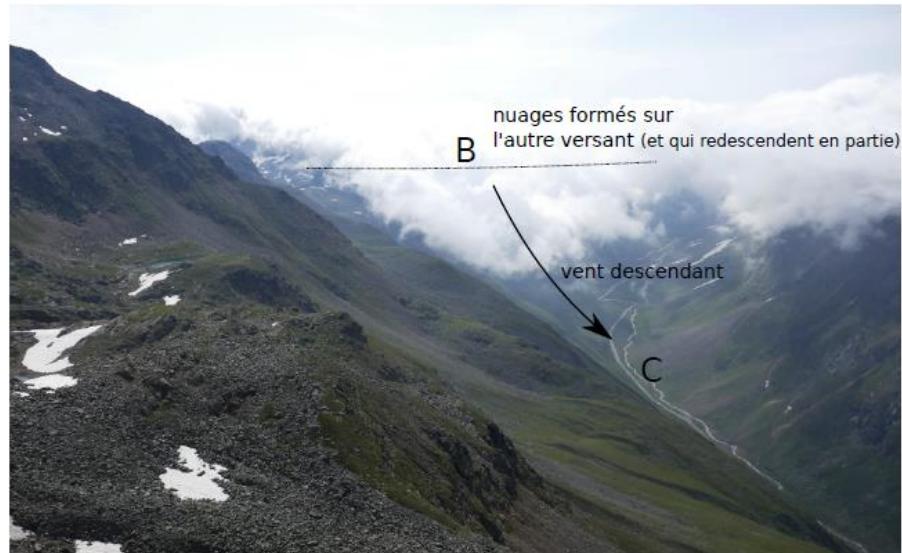
17. La parcelle d'air redescend ensuite sur l'autre flanc de la montagne et retourne en $z = 0$ (point *C*, de même altitude que *A*). Quelle est la valeur de la température en *C* ? Commenter.

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 ⊕ [min]	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
Pâte levée, feuilletée	3 pièces env. 300 g	—	4–4,5	5–10
	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 ④ [min]	450 W ④ [min]	Temps de repos [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 ④ [min]	450 W ④ [min]	Temps de repos [min] ¹⁾
Aliments pour enfants (température 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

④ Puissance des micro-ondes / ④ 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