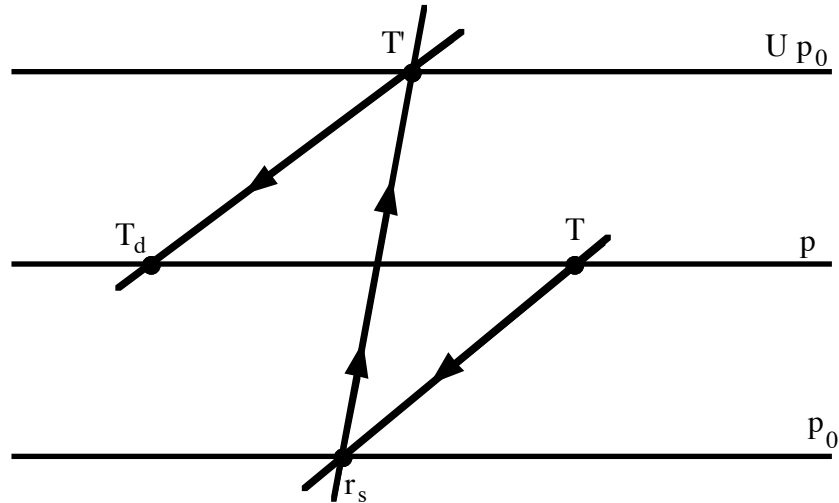


PHYSIQUE DE L'ATMOSPHERE

Exercices de thermodynamique de l'atmosphère

- 1) Une masse de 1000kg d'air sec subit une expansion d'une pression initiale de 90 kPa à une pression finale de 80 kPa.
 - a) Calculez le travail effectué sur la masse d'air si l'expansion est isotherme ($T = 300 \text{ K}$).
 - b) Calculez la quantité de chaleur qu'absorbe alors la masse d'air.
 - c) Calculez le travail effectué sur la masse d'air si l'expansion avait été adiabatique et s'était déroulée à $\theta = 300 \text{ K}$.
 - d) Représentez les deux expansions dans un téphigramme.
- 2) Une masse d'air sec est soumise à un procédé réversible qui peut être représenté dans un téphigramme par une ligne droite joignant les points de coordonnées (10° C , 100kPa) et (0° C , 85 kPa).
 - a) Calculez Δu , Δh , et Δs .
 - b) Identifiez la surface sur le téphigramme correspondant à la quantité de chaleur δq échangée au cours du procédé et calculez δq .
- 3) Tracez sur un téphigramme le cycle qu'une masse d'air équatorial suit entre l'équateur et 30° N :
 - La masse d'air monte de façon adiabatique de 100 kPa et 25.5° C jusqu'à 80 kPa où elle devient saturée.
 - Elle continue son ascension le long d'une pseudo-adiabatique et cela jusqu'à 18,5 kPa et -75° C .
 - En se déplaçant vers le nord, elle perd de la chaleur par radiation et elle descend à 28 kPa et -71.5° C .
 - À 30° N , elle descend de façon adiabatique jusqu'à la surface et elle retourne à l'équateur en se réchauffant à sa valeur initiale.

Calculez le taux de dégagement d'énergie de la masse d'air si le cycle prend 6 mois pour se compléter.
- 4) À l'aide d'un cycle de Carnot, déterminez la valeur du facteur d'échelle qu'il faut appliquer aux surfaces sur le téphigramme pour les exprimer en unité d'énergie.
- 5) Montrez que la démarche suivante appliquée dans un téphigramme est valide.
Soit une masse d'air humide dans l'état (T, p) avec un coefficient d'humidité relative U .



- a) On choisit un niveau de pression p_0 tel que : $p_0 > p > U p_0$.
 - b) On suit, à partir de l'état initial (T, p) l'isotherme $T = \text{cte}$ jusqu'à son intersection avec l'isobare p_0 .
 - c) De ce point (T, p_0) on suit la ligne de rapport saturant $r_s = r_s(T, p_0)$ jusqu'à son intersection avec l'isobare $U p_0$ où l'on détermine la température T' .
 - d) La température T' ainsi déterminée est la température du point de rosée T_d de la masse d'air.
- 6) Considérez le processus cyclique suivant auquel une masse de 1 kg d'air sec, initialement à 0°C , est soumise:
- a) expansion isotherme de 70 kPa à 60 kPa,
 - b) refroidissement isobare jusqu'à -10°C ,
 - c) compression isotherme jusqu'à 70 kPa, et
 - d) réchauffement isobare jusqu'à 0°C .
- i) Calculez le travail effectué sur la masse d'air au cours d'un cycle.
 - ii) Vérifiez votre réponse graphiquement en ayant recours à un téphigramme.

7) Nous manipulons fréquemment certains paramètres qui caractérisent l'air sec (c_{vd} , c_{pd} , R_d). Or, sachant que ces paramètres pour l'eau en phase gazeuse sont c_{vv} , c_{pv} et R_v et que

$$\frac{c_{vv}}{c_{vd}} = 1,96; \quad \frac{c_{pv}}{c_{pd}} = 1,86; \quad \frac{R_v}{R_d} = 1,61;$$

montrez que les trois paramètres de l'air humide sont équivalents aux mêmes paramètres pour l'air sec dans les pires conditions avec une marge d'erreur d'au plus 5%.

8) Une masse d'air, initialement à 10°C avec une tension de vapeur d'eau égale à 3.5 mb, subit une transformation isobare adiabatique jusqu'à saturation. Représentez ce procédé dans un diagramme de tension de vapeur sachant qu'il se déroule sous une pression de

100 kPa et obtenez la température équivalente de la masse d'air ainsi que sa température de thermomètre mouillé.

- 9) Une parcelle d'air humide est amenée à saturation au cours d'une ascension adiabatique. La pression, la température et le rapport de mélange sont initialement : $p_i = 1 \text{ atm}$, $T_i = 20^\circ\text{C}$, $r_i = 5.5 \text{ g kg}^{-1}$. Calculez le point de rosée initial et final, le rapport V_f/V_i , la température finale, la température de condensation isentropique T_c , la température potentielle initiale et finale, la température du thermomètre mouillé initiale et finale.
- 10) Une masse d'air humide dont la température est 20°C et le rapport de mélange 10 g kg^{-1} est soulevé de 1000 mb à 700 mb pour traverser une chaîne de montagnes. Déterminez :
- la température initiale du point de rosée de la masse d'air, et
 - la température de la masse d'air à 900 mb une fois qu'elle a traversé les montagnes si 80% de l'eau condensée précipite pendant l'ascension.
- 11) Deux masses d'air sous une pression de 100 kPa sont amenées à se mélanger l'une avec l'autre dans des conditions isenthalpiques. Avant le mélange, l'état des masses d'air est le suivant :
- $T_1 = 0^\circ\text{C}$, $U_1 = 61\%$, $m_1 = 2 \text{ kg}$
 - $T_2 = 30^\circ\text{C}$, $U_2 = 82.5\%$, $m_2 = 1 \text{ kg}$
- Déterminez l'état final d'équilibre du mélange. S'il y a condensation, quelle quantité d'eau s'est condensée?
- 12) Deux masses d'air égales sont mélangées de façon isobarique. Les conditions initiales sont $T_1 = 273 \text{ K}$, $e_1 = 5.5 \text{ mb}$, $T_2 = 293 \text{ K}$, et $e_2 = 2.2 \text{ mb}$. Calculez T_f , la température finale, et r_f , le rapport de mélange final, si $p = 1 \text{ atm}$. Quelle est la quantité d'eau condensée par unité de masse d'air?
- 13) Lorsque l'on expire l'air de nos poumons dans un environnement dont la température est assez basse, il se forme un brouillard de mélange aisément perceptible. En supposant des caractéristiques de température et d'humidité raisonnables pour l'air expiré de nos poumons, déterminez l'ensemble des conditions de température et d'humidité que doit satisfaire l'environnement pour que le processus de mélange entraîne tout juste la formation de ce brouillard.
- 14) a) Quel est le rapport de mélange et la température équivalente d'une parcelle d'air à un niveau de pression de 1 atm, une température de 10°C et une température du thermomètre mouillé de 8°C ?
- b) Quelle est la température du thermomètre mouillé et la température équivalente si la température est de 10°C , la pression 1 atm, et le rapport de mélange 6 g kg^{-1} ?
- c) Quelle est la température du thermomètre mouillé et la température équivalente si la température est de 22.5°C , la pression 950 mb, et le rapport de mélange 12 g kg^{-1} ?
- 15) Une masse d'air à 30°C et à une pression de 1000 mb dénote un coefficient d'humidité relative de 50%. Trouvez les valeurs de:
- la tension de vapeur d'eau e dans la masse d'air,
 - le rapport de mélange (r),
 - le coefficient d'humidité spécifique (q),
 - le coefficient de chaleur spécifique à pression constante de la masse d'air (c_p),
 - la température virtuelle (T_v), et

- f) la température potentielle (θ).
 g) Quelles seront les valeurs de la température potentielle et de la température potentielle virtuelle après une ascension adiabatique jusqu'à 900 mb?
- 16) Quelles sont les équations qui déterminent la pression et la température d'une parcelle d'air qui a atteint la saturation par ascension adiabatique en sachant que la pression, le rapport de mélange et la température initiale sont donnés?
- 17) Dérivez l'expression qui permet de montrer que la température adiabatique du thermomètre mouillé, T_{aw} , sous-estime celle isenthalpique du thermomètre mouillé T_{iw} .
- 18) Dérivez l'expression qui permet de montrer que la température adiabatique équivalente, T_{ae} , surestime la température isenthalpique équivalente, T_{ie} .
- 19) Déterminez à l'aide d'un téphigramme les niveaux de condensation par soulèvement adiabatique pour les parcelles d'air dont les conditions initiales sont les suivantes?
- a) $T = 21^\circ\text{C}$, $T_d = 13^\circ\text{C}$, $p = 990$ mb
 b) $T = 15^\circ\text{C}$, $T_{aw} = 9^\circ\text{C}$, $p = 950$ mb
 c) $T = 18^\circ\text{C}$, $T_v = 20^\circ\text{C}$, $p = 1000$ mb
- 20) Une parcelle d'air a atteint la saturation à 4°C au cours d'une ascension adiabatique.
- a) Quel est le rapport de mélange initial de cette parcelle d'air si $T_i = 20^\circ\text{C}$ et $p_i = 1000$ mb?
 b) À quelle hauteur la parcelle atteint la saturation si l'atmosphère est en équilibre hydrostatique?
- 21) Trouvez l'expression pour le gradient thermique adiabatique de l'air humide non saturé supposant $T_v/T'_v = 1$ (la variable prime indique l'environnement).
 Quelle est la différence en % entre le cas sec et le cas où $r = 10 \text{ g kg}^{-1}$ si on ne fait pas l'approximation $T_v/T'_v = 1$?
- 22) Dans quelle condition de stabilité est une parcelle d'air d'une couche si le gradient thermique de la couche est 0.8 deg km^{-1} ?
 Quel est le gradient thermique adiabatique d'une parcelle d'air saturé à $T = 0^\circ\text{C}$ et $p = 950$ mb?
- 23) Supposez que l'atmosphère est isotherme, $T = 5^\circ\text{C}$, de 1050 mb à 800 mb.
- a) Après mélange complet de cette couche, quelle est la température potentielle du mélange?
 b) Si le rapport de mélange initiale de la couche varie avec la pression de façon linéaire entre 5.0 g kg^{-1} à la surface ($p = 1050$ mb) et 4.0 g kg^{-1} au niveau 800 mb, quel est le rapport de mélange de la couche après mélange complet?
 c) Quel est le niveau de condensation après mélange (en mb et en km)?
- 24) Soit une couche d'air compris entre 1000 mb ($T = 15^\circ\text{C}$) et 900 mb avec un gradient thermique de 6 deg km^{-1} . Elle monte de façon adiabatique entre 800 mb et 700 mb.
- a) Quel est le gradient thermique dans l'état final si la couche était sèche?

- b) Quel est le gradient thermique dans l'état final si initialement le rapport de mélange variait linéairement entre 7 g kg^{-1} à 1000 mb et 4 g kg^{-1} à 900 mb?
- c) Quelle est la quantité d'eau condensée pendant le déplacement de la couche?
- 25)** Le tiers d'une masse d'air s'élève par convection dans un environnement qui initialement à un gradient thermique 0.8 deg/100 m . Au niveau initial la pression est 1 atm et la température est $T = 293 \text{ K}$ et $T' = 292.5 \text{ K}$, et l'air est saturé.
- a) Quelle est la différence de température entre l'air ascendant et l'air ambiant à 200 m du niveau initial?
- b) Quelle est la quantité d'eau condensée par unité de masse d'air?
- 26)** Soit un modèle d'atmosphère à gradient thermique constant tel que $\frac{\partial T}{\partial z} = -B$.
En déduire :
- a) La variation de la température potentielle en fonction de la pression ;
- b) La variation du volume spécifique en fonction de l'altitude.
- 27)** Un sondage matinal montre que l'atmosphère est isotherme avec $T = 5^\circ \text{ C}$ jusqu'à un niveau où la température potentielle est 288 K. À partir de ce niveau, le gradient thermique est 6 deg km^{-1} . À la surface, la température du thermomètre mouillé est 0° C et la pression 1000 mb.
- a) Quels sont le rapport de mélange et l'humidité relative à la surface?
- b) Quelle est la pression au niveau de l'inversion?
- c) Dans quelle condition de stabilité est l'atmosphère? Pourquoi?
- d) Quelle est la quantité d'eau nécessaire pour saturer la couche au-dessous du point d'inversion si initialement le rapport de mélange était uniforme dans cette couche? (Utilisez le téphigramme.) Quelles sont les énergies qu'il faut donner au système pour saturer l'air dans les deux cas?
- e) Quelle est la couche avec instabilité latente?
- f) Quelle est la température de surface nécessaire pour arriver à un gradient thermique adiabatique sec au-dessous du point d'inversion?
- g) Quelle est l'énergie solaire nécessaire pour arriver à cette situation?
- 28)** Une atmosphère est isotherme de 1050 mb à 800 mb, et $T = 5^\circ \text{ C}$. Après le mélange complet de cette couche, quelle est la température potentielle du mélange.
Si le rapport de mélange initial dans la couche varie avec la pression de façon linéaire entre 5 g kg^{-1} à la surface ($p = 1050 \text{ mb}$) et 4 g kg^{-1} au niveau 800 mb, quel est le rapport de mélange de la couche après un mélange complet? Quel est le niveau de condensation après le mélange (en mb et km)?
- 29)** Sachant que la force de poussée par unité de masse exercée sur une parcelle d'air peut s'exprimer sous la forme:

$$\ddot{z} = g \frac{T' - T_v}{T}$$

- a) Montrez que la relation liant la vitesse verticale, w , au niveau z à la vitesse verticale, w_0 , au niveau z_0 est donnée par

$$w^2 = w_0^2 + 2g \int_{z_0}^z \frac{T'_v - T_v}{T_v} dz$$

- b) Montrez que le dernier terme de l'équation ci-dessus est proportionnel à la surface (sur un téphigramme) délimitée par les isobares p_0 et p et les profils de température de l'environnement et de la parcelle.

Supposez que le gradient ambiant est adiabatique sec avec une température de 280° K à 900 mb. Considérez une parcelle d'air saturé, à 900 mb, à la température ambiante. Si cette parcelle est forcée à l'ascendance, elle continue de monter.

- c) Calculez à l'aide du téphigramme la vitesse verticale de la parcelle à 700 mb.

30) Considérez le sondage ci-dessous :

p(mb)	T(°C)
1000	27.0
950	23.5
900	20.0
850	18.0
800	17.5
750	11.0
700	5.0
650	1.0
600	-3.0
500	-12.0
400	-30.0

Les points de rosée à la surface est de 20.4°C (1000 mb).

- a) Représentez sur téphigramme le profil de $T(p)$.
- b) Déterminez le rapport de mélange, r , l'humidité relative, U_w , la température du thermomètre mouillé, T_{aw} , la température potentielle du thermomètre mouillé, θ_{aw} , et la température potentielle équivalente, θ_{aw} , pour une parcelle de surface.
- c) Déterminez le niveau de condensation par soulèvement adiabatique (NCA) et le niveau de convection libre (NCL) pour une parcelle d'air provenant de la surface.

31) Considérez le sondage ci-dessous :

p(mb)	T(°C)	r(g kg ⁻¹)
950	19.5	11.5
900	16.6	10.0
850	13.5	9.8
800	10.5	8.9
750	7.5	8.0
700	4.8	2.4
650	1.0	0.78
600	-3.0	0.65
500	-19.8	--
300	-36.0	--

Représentez sur téphigramme les profils de $T(p)$ et $r(p)$.

Déterminez :

- la température potentielle, θ , la température potentielle du thermomètre mouillé, θ_{aw} , le niveau de condensation par soulèvement adiabatique, NCA, la température de saturation, T_s , et le niveau de convection libre, NCL, pour une parcelle d'air provenant de la surface et identifiez les surfaces d'instabilité (surface positive et négative),
- le niveau de condensation par convection, NCC, et
- la couche d'instabilité latente.

32) Considérez le sondage ci-dessous:

$p(\text{mb})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$r(\text{g kg}^{-1})$
1000	17.5	10.5
900	11.5	8.0
800	5.0	6.0
700	-4.0	3.5
600	-8.0	2.0
500	-15.0	1.5
400	-28.0	0.4
300	-40.0	--

- Tracez les profils de $T(p)$ et de $r(p)$ sur téphigramme.
- Trouvez la valeur de l'humidité relative, la température équivalente et la température adiabatique du thermomètre mouillé pour la parcelle d'air au niveau de 800 mb.
- Analysez la stabilité (statique et latente) des différentes couches de ce sondage.
- Déterminez le niveau de condensation par convection.
- Considérez une parcelle d'air à 900 mb. Déterminez son niveau de condensation par soulèvement adiabatique, son niveau de convection libre, la quantité d'eau condensée en suivant sa trajectoire jusqu'à 600 mb, et sa vitesse verticale à 600 mb.

33) Considérez le sondage ci-dessous:

$p(\text{mb})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$r(\text{g kg}^{-1})$
1000	15	9
900	15	10
850	11	9
800	7	3
750	3	2.5
700	0	5
600	-8	2.5
500	-19	0.4
400	-29	--
300	-40	--
200	-54	--
150	-54	--

- a) Tracez les profils de $T(p)$ et de $r(p)$ sur un téphigramme.
- b) Trouvez la valeur de l'humidité relative, la température équivalente et la température adiabatique du thermomètre mouillé pour la parcelle d'air au niveau de 600 mb.
- c) Analysez la stabilité (statique et latente) des différentes couches de ce sondage.
- d) Déterminez le niveau de condensation par convection (NCC).
- e) Considérez une parcelle d'air à 900 mb. Déterminez le niveau NCA, le niveau NCL, la quantité d'eau condensée en suivant sa trajectoire jusqu'à 700 mb, et sa vitesse verticale à 700 mb.

34) Considérez le sondage ci-dessous:

p(mb)	T(°C)	T _d (°C)
900	18	12
750	5.5	4
600	-6	--
500	-17	-25
400	-25	-34
300	-33	--

- a) Représentez sur un téphigramme les profils de $T(p)$ et de $T_d(p)$.
- b) Caractérissez la stabilité de chaque couche de 50 mb par rapport au déplacement vertical d'une parcelle d'air.
- c) Considérez l'air au niveau de 900 mb. Déterminez à ce niveau la température potentielle, le rapport de mélange, la température virtuelle, la température potentielle du thermomètre mouillé, et la température de condensation isentropique.
- d) Supposons une parcelle d'air à 900 mb qui monte sans échanger d'énergie ni de masse avec l'environnement:
 - i - Déterminez le niveau de condensation par soulèvement adiabatique (NCA).
 - ii - Déterminez le niveau de convection libre (NCL).
 - iii - Quelle est la quantité d'eau condensée en suivant la trajectoire de la parcelle jusqu'à 500 mb.
 - iv - Quel est le travail des forces extérieures exercées sur la parcelle entre 900 et 500 mb.
 - v - Calculez la vitesse verticale de la parcelle à 500 mb.
- e) Déterminez la couche d'instabilité latente et le niveau de condensation par convection (NCC).

Réponses aux problèmes

1. **a)** -10.1 MJ ; **b)** 10.1 MJ ; **c)** -6.8 MJ
2. **a)** $\Delta u = -7180 \text{ J kg}^{-1}$, $\Delta h = -10050 \text{ J kg}^{-1}$, $\Delta s = 10.6 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; **b)** 2947 J kg^{-1}
3. $\sim 50 \text{ J kg}^{-1} \text{ j}^{-1}$
4. $40.2 \text{ J kg}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
5. CQFD
6. **a)** -442 J ; **b)** CQFD
7. CQFD
8. ...
9. ...
10. **a)** 13.8° C ; **b)** 19.3° C
11. 284.2 K, 1.2 g
12. ...
13. CQFD
14. **a)** 5.9 g kg^{-1} , 24.8° C ; **b)** 8° C , 25° C
15. **a)** 21.213 mb ; **b)** 13.48 g kg^{-1} ; **c)** 13.3 g kg^{-1} ; **d)** $1016.5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; **e)** 305.5 K ;
f) 303 K , 305.5 K
16. CQFD
17. CQFD
18. CQFD
19. ...
20. **a)** 6.11 g kg^{-1} ; **b)** 1640 m
21. **a)** ... ; **b)** 0.87 %
22. ...
23. **a)** 284.6 K ; **b)** 4.5 g kg^{-1} ; **c)** 865 mb, 1594 m
24. ...
25. ...
26. ...
27. ...
28. ...
29. **a)** ... ; **b)** ... ; **c)** 26 m s^{-1}
30. ...
31. ...
32. **b)** 88 %, 21° C , 4° C ; **c)** ... ; **d)** 875 mb ; **e)** 870 mb, 800 mb, 4.5 g kg^{-1} , 15.5 m s^{-1}
33. ...
34. ...