

9 – STABILITÉ DE L'ATMOSPHERE

Plan du chapitre

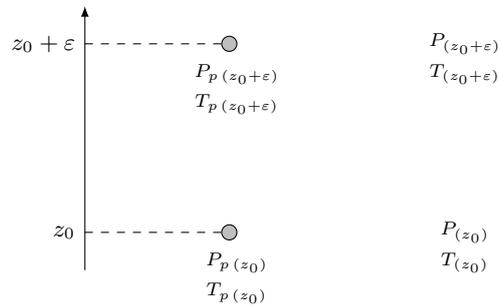
1	Stabilité d'une particule d'air	2
1.1	Mouvement d'une particule d'air par rapport à sa position d'équilibre	2
1.2	Gradient adiabatique sec	2
1.3	Mouvement d'une particule de fluide dans une atmosphère stable	4
1.4	Stabilité de l'atmosphère	5
2	Le nombre de Rayleigh	6

Programme officiel – Premier semestre – **Thème E – énergie : conversion et transfert**

NOTIONS	CAPACITÉS EXIGIBLES
<p>E.4. Statique des fluides. Flottabilité.</p>	<p>Interpréter la flottabilité d'une particule de fluide à l'aide des projections verticales du poids et de la poussée d'Archimède. Identifier quelques phénomènes favorables ou défavorables aux mouvements verticaux de convection dans l'atmosphère ou les océans terrestres. Construire, par analyse dimensionnelle, les temps caractéristiques associés à ces phénomènes et les comparer.</p>

1 Stabilité d'une particule d'air

1.1 Mouvement d'une particule d'air par rapport à sa position d'équilibre



On considère une particule d'air à l'altitude z_0 , initialement à l'équilibre avec l'air environnant :

- équilibre mécanique $P_p(z_0) = P_{(z_0)}$
- équilibre thermique $T_p(z_0) = T_{(z_0)}$

La particule se déplace de ϵ vers le haut :

- l'équilibre mécanique s'établit quasi-instantanément : $P_p(z_0 + \epsilon) = P_{(z_0 + \epsilon)}$
- l'équilibre thermique n'a pas le temps de s'établir : $T_p(z_0 + \epsilon) \neq T_{(z_0 + \epsilon)}$

Flottabilité en fonction des masses volumiques

Exprimer la flottabilité de la particule en $z_0 + \epsilon$ en fonction des masses volumiques de la particule et de l'air environnant à $z_0 + \epsilon$.

Flottabilité en fonction des températures

Exprimer la flottabilité de la particule en $z_0 + \epsilon$ en fonction des températures de la particule et de l'air environnant à $z_0 + \epsilon$.

Stabilité de la particule

On suppose $\epsilon > 0$. Quel est le signe de la flottabilité ? Conclure.

1.2 Gradient adiabatique sec

Quand on s'élève :

- la température de l'air environnant évolue,

- la température de la particule évolue d'une quantité différente.

Pour l'air environnant, il existe un gradient de température, proportionnel à dT/dz , qu'on peut mesurer par des sondages physiques à une date donnée (ballon sonde).

gradient adiabatique sec

À l'aide du premier principe, déterminer dT_p/dz pour la particule de fluide qui monte sans avoir le temps de se mettre à l'équilibre thermique.

Gradient adiabatique sec dans l'atmosphère

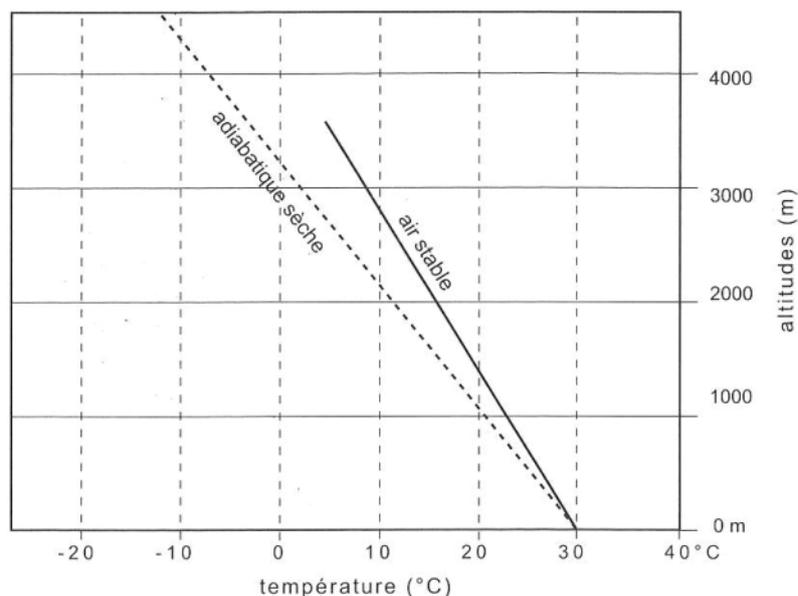
Le gradient adiabatique sec est de l'ordre de $\Gamma = -10 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$.

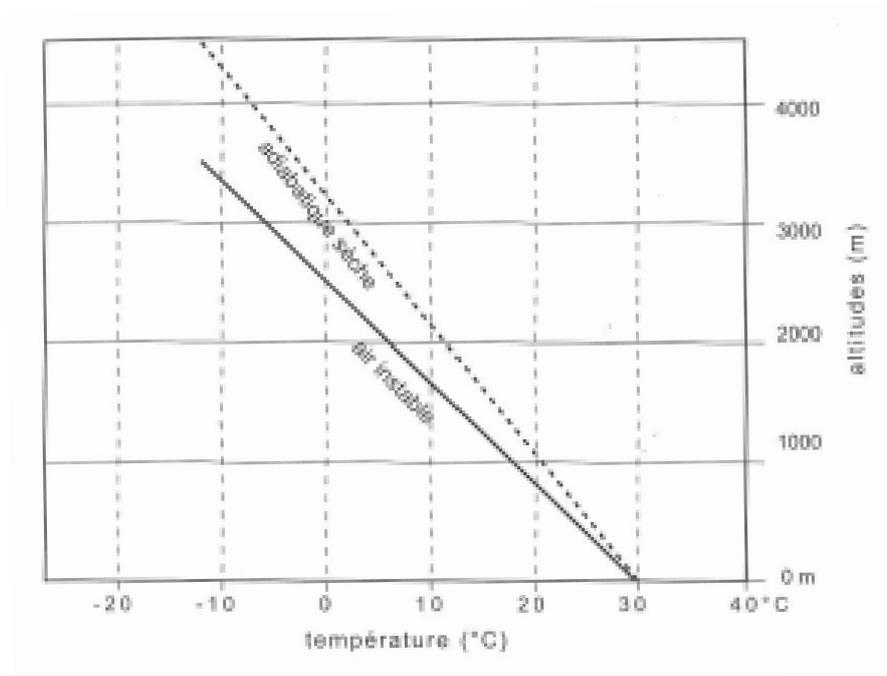
Condition de stabilité de la particule

La particule de fluide est stable si sa température diminue davantage que celle de l'air environnant quand elle s'élève, soit :

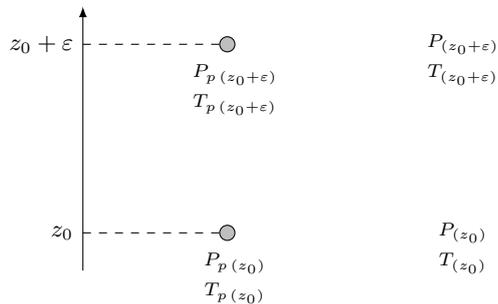
$$\Gamma < \left(\frac{dT}{dz} \right)_{(z_0)}$$

Cas particulier dit de « l'inversion de température » : dans les zones où la température de l'air augmente quand on monte, la condition de stabilité est réalisée. L'air stagne.





1.3 Mouvement d'une particule de fluide dans une atmosphère stable



Particule de fluide en équilibre à z_0 , qui monte de ε dans une atmosphère stable.

Quel est son mouvement ultérieur ?

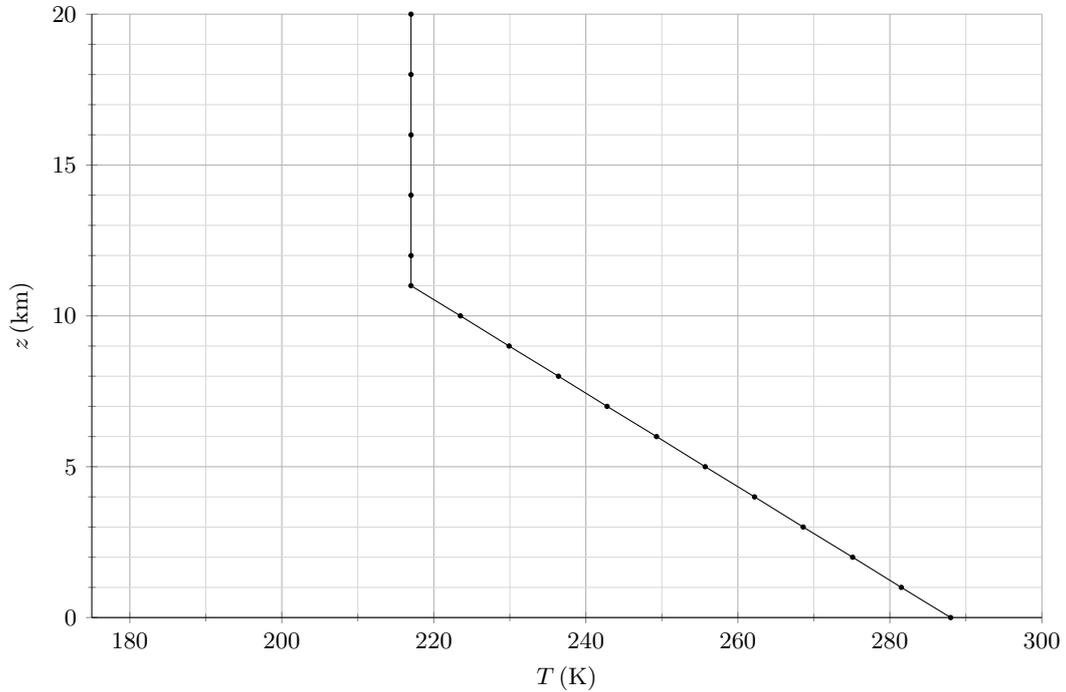
Mouvement d'une particule dans l'atmosphère stable

Écrire l'équation différentielle vérifiée par une particule de fluide dans l'air dans les conditions de stabilité.

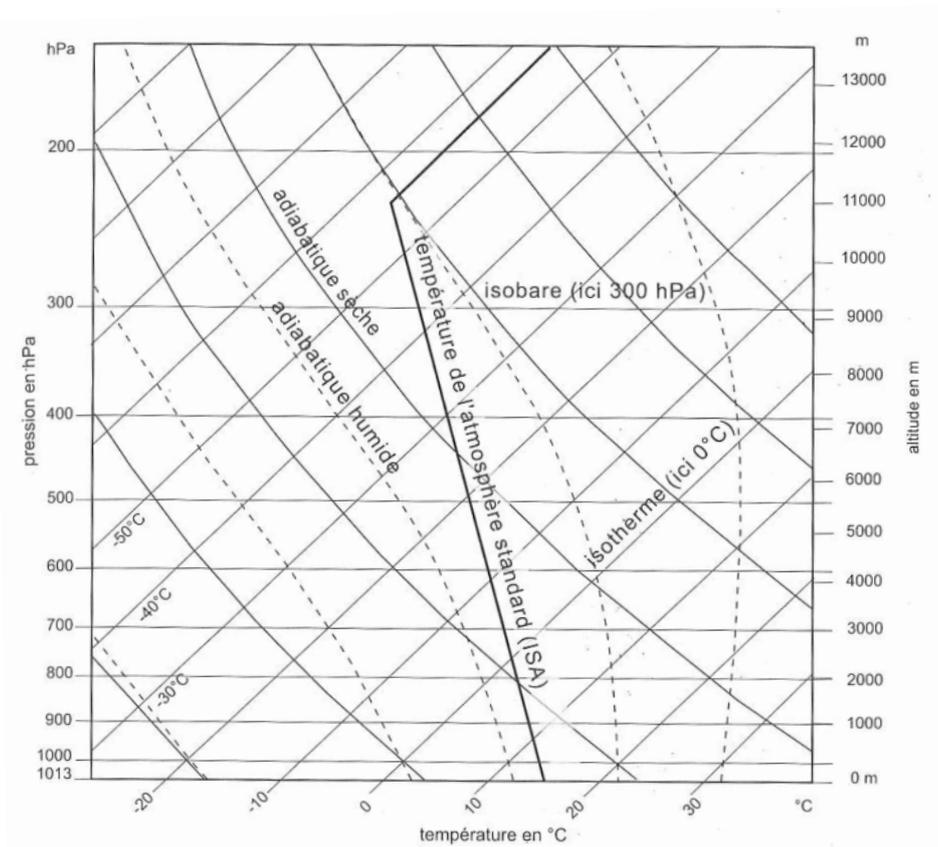
Nature du mouvement

1.4 Stabilité de l'atmosphère

Profil de température dans l'atmosphère : modèle ISA. Quel que soit le lieu, l'atmosphère est stable si le profil de température est habituel.



Représentation habituelle sur un **émagramme** : diagramme (z, T)



2 Le nombre de Rayleigh

Une particule de fluide dans l'atmosphère se met en mouvement convectif (vers le haut) sous l'effet de la poussée d'Archimède, plus exactement de la flottabilité.

Flottabilité d'une particule d'air dont la masse volumique diffère de l'air environnant :

$$F = mg - \Pi_A = mg \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) = mg \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} = mg \frac{\Delta\rho}{\rho} = mg\alpha\Delta T$$

avec α le coefficient de dilatation isobare, connu pour l'air.

Facteurs défavorables à la convection :

- frottements visqueux : s'oppose au mouvement.
- transfert thermique : plus ils sont rapides, plus la flottabilité diminue.

On peut discuter de la possibilité d'observer des mouvements de convection en construisant un nombre caractéristique qui compare les facteurs favorables et défavorables.

Temps caractéristique associé à la flottabilité

Temps caractéristique de la flottabilité associé à un déplacement d :

$$\tau_f = \sqrt{\frac{d}{\alpha g \Delta T}}$$

Justification par analyse dimensionnelle

Temps caractéristique des frottements visqueux

Temps caractéristique des frottements visqueux associé à une longueur caractéristique d :

$$\tau_v = \frac{\rho d^2}{\eta} = \frac{d^2}{\nu}$$

avec $\nu = \eta/\rho$ (viscosité cinématique).

Justification par analyse dimensionnelle

Temps caractéristique des transferts thermiques

Temps caractéristique de la conduction thermique associé à une longueur caractéristique d :

$$\tau_c = \frac{\rho c_p d^2}{\lambda} = \frac{d^2}{D_{th}}$$

avec $D_{th} = \lambda/(c\rho)$ (diffusivité thermique).

Justification par analyse dimensionnelle

Nombre de Rayleigh

Nombre sans dimension comparant le temps caractéristique associé à la flottabilité aux temps caractéristiques associés aux facteurs défavorables à la flottabilité :

$$Ra = \frac{\tau_c \tau_v}{\tau_f^2} = \frac{d^3 \alpha g \Delta T}{\nu D_{th}}$$

Condition de convection

Plus Ra est grand, plus la flottabilité est efficace : la convection a lieu pour des systèmes à nombre de Rayleigh grand.

En pratique : la convection a lieu si $Ra > 1700$.

Exemples :

- air dans une pièce avec un chauffage : $Ra = 2 \cdot 10^{10}$
- manteau terrestre : $Ra = 1 \cdot 10^8$