

1 Le ballon sonde

Le radio-sondage est une technique de mesure en altitude des propriétés de l'atmosphère par ballon sonde. Des capteurs mesurent les variations de 3 paramètres en fonction de l'altitude :

altiude	pression	température	humidité
z(km)	P(Pa)	T(K)	q(g.m ⁻³)
...

Le principe est simple ! On remplit un ballon d'un gaz plus léger que l'air afin de lui communiquer une poussée verticale : il s'élève, en pratique à une vitesse de l'ordre de quelques mètres par seconde, jusqu'à ce que la dilatation du gaz contenu dans son enveloppe ne provoque son éclatement, généralement observé vers 20 à 30 kilomètres d'altitude.

Remarques :

- La plateforme est équipée d'un parachute qui permettra après éclatement du ballon de récupérer le matériel. Vous pouvez consulter sur ce site les trajets : <https://sondehub.org>
- L'instrument permet en outre de mesurer les directions du vent grâce à un suivi de la trajectoire du ballon. Ce point ne sera pas abordé aujourd'hui (un possible sujet d'exposé).
- Les données une fois récoltées sont reportées sur des diagrammes thermodynamiques qui permettent d'étudier la stabilité des masses d'air *in situ* (voir exercice papier 2 pour approfondissement)

Travail à réaliser : Partant de l'observation que dans la troposphère (voir structure de l'atmosphère, J.Vidot), la température décroît linéairement suivant un taux proche de $a = 6.5 \text{ K.km}^{-1}$, proposer une explication au mécanisme contrôlant l'ascension du ballon sonde jusqu'à son éclatement.

Notations : la température au sol est notée T_0 . Le ballon sonde sphérique de rayon r , fermé et placé dans l'air, contient une masse m d'hélium. Les accessoires et l'enveloppe ont une masse légèrement inférieure au kilogramme ($m_0 = 750\text{g}$). On rappelle la valeur de la constante des gaz parfaits, $R = 8.31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

Schéma : ...

1.1 Force ascensionnelle

Discutons les points suivants avant de modéliser le système :

- définition de la force ascensionnelle : résultante à l'altitude nulle des forces extérieures exercées sur l'ensemble du système étudié (ballon + gaz).
- accélération de pesanteur : prendre une valeur approchée à une décimale est-il suffisant ? [une discussion au sujet de la valeur de g sur le globe est engagée].
- C.I : le ballon est gonflé au sol de sorte qu'à la température T_0 et pour une pression extérieure de $P_0 = 1 \text{ bar}$, le rayon r_0 soit de 75 cm .

Questions simples pour s'échauffer:

1. Estimer la masse volumique de l'air ρ_0
2. Estimer la masse de gaz hélium à injecter.
3. Proposer une expression de la force permettant l'ascension du ballon en fonction des paramètres r_0, m_0, m, g et ρ_0 . On pourra partir des premiers principes de la mécanique ou faire un raisonnement sur les dimensions des grandeurs considérées.
4. Quelle est la valeur maximale de la masse des accessoires et de l'enveloppe que peut supporter un tel ballon ?

1.2 Pression atmosphérique (un soupçon de thermo)

- loi de nivellement

Montrer que la pression atmosphérique $P(z)$ à l'altitude z peut s'écrire en fonction de la température $T(z)$ sous la forme

$$P(z) = P_0 \left(\frac{T(z)}{T_0} \right)^\eta$$

où η est une constante que l'on exprimera en fonction de M_a (masse molaire de l'air), g , a et R .

- Etude sommaire des variations de pression

On donne $\eta = 5.26$. Estimer la valeur de la pression à différentes altitudes (par ex les tous les kilomètres jusqu'à 5 km)

z(km)	1	2	3	4	5
P(Pa)

1.3 Altitude maximale (une pincée de méca)

En négligeant la résistance élastique du ballon, on pourra considérer que l'hélium est à la pression atmosphérique.

- Déterminer l'expression de la force ascensionnelle F pour une altitude z fixée
- La ballon ne peut pas se dilater au delà de 2 mètres . Calculer un ordre de grandeur de l'altitude atteinte par le ballon avant son éclatement.

2 Formation d'un nuage

Les phénomènes météo - souvent complexes et parfois spectaculaires dans leurs manifestations - ont des origines variées et une compréhension fine nécessite de prendre en compte de nombreux paramètres ! Pour autant un phénomène assez banal est explicable facilement car uniquement du au déplacement adiabatique de masses d'air. Cet exercice se propose d'expliquer qualitativement la création d'un courant ascendant pouvant conduire à la formation d'un nuage.

On discutera (éventuellement) la pertinence des hypothèses suivantes sur l'air atmosphérique : (H1) air sec ou air humide, (H2) gaz parfait, (H3) capacités thermiques massiques constantes, (H4) pesanteur constante.

Un point de l'atmosphère est repéré par ses coordonnées cartésiennes dans un trièdre orthonormé (Oxyz), tel que l'axe (Oz) coïncide avec la verticale ascendante, la cote z étant prise au niveau de la mer.

2.1 En l'absence de mouvement (équilibre)

Des relevés expérimentaux montrent qu'en l'absence de mouvement des masses d'air, la température est fonction de l'altitude z suivant une loi affine :

$$T(z) = T_0 - \lambda z$$

On peut montrer que P et T à l'altitude z sont liées par la relation suivante, appelée loi de nivellement barométrique :

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^q$$

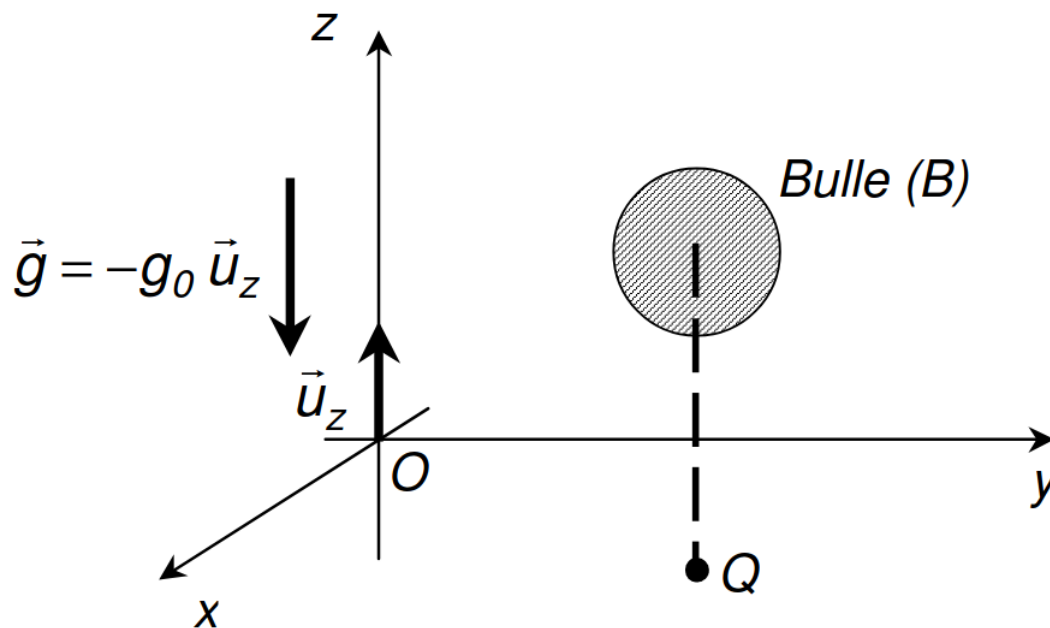
S'il vous reste quelques souvenirs de thermo vous pouvez essayer de retrouver cette relation. Déterminer l'exposant q en fonction de M , g_0 , et R et faites l'application numérique pour une valeur convenablement choisie de λ .

2.2 Apparition d'un mouvement (instabilité)

L'état d'équilibre précédent est réalisé lorsque les isothermes (niveaux où $T = \text{Cte}$) et les isobares ($P = \text{Cte}$) coïncident avec les équipotentielles du champ de pesanteur c-à-d les surfaces d'équation $z = \text{cte}$. (pour les curieux/ses voir fluides barotrope/baroclines...). En présence d'hétérogénéités au niveau du sol, comme des écarts de température d'un point à un autre, l'air s'échauffe différemment et peut se mettre en mouvement.

On se place à l'altitude z et à la verticale du point Q et on suppose que l'air est localement, plus chaud que l'air avoisinant. Tout se passe comme si une poche de gaz était limitée par une enveloppe souple et non tendue. La bulle de gaz évolue sans échanger de matière ni de chaleur avec l'extérieur. La pression de la bulle restant égale à celle de l'air environnant à la même altitude. On supposera que la température de l'air environnant reste toujours fonction affine de la température.

1. On note P_B , T_B et ρ_B la pression, la température et la masse volumique du gaz emprisonné dans la bulle ; T_A et ρ_A la température et la masse volumique de l'air environnant à la même altitude. Montrer que la bulle s'élève si $T_B > T_A$.
2. Le gaz emprisonné dans la bulle subit donc une transformation adiabatique que l'on supposera réversible. On appelle T_1 la température du gaz dans la bulle à l'altitude de sa formation z_1 et P_1 la pression correspondante. Exprimer T_B en fonction de T_1 , P_1 et P_B .
3. Montrer qu'il existe une altitude plafond z_2 pour l'ascension de la bulle. On note T_2 et P_2 la température et la pression de la bulle lorsqu'elle arrive à cette altitude. Calculer numériquement T_2 et P_2 pour $T_1 = 280K$ et $z_1 = 2km$. En déduire la valeur de l'altitude plafond z_2 à laquelle se stabilise la bulle.
4. L'air étant supposé maintenant humide (mélange d'air sec et de vapeur d'eau), montrer comment l'on pourrait expliquer qualitativement la possibilité de formation d'un nuage au cours de l'ascension de cette bulle.



3 Quelques références

Les sites suivants ont été consultés pour préparer cette activité :

- <https://labolycee.org/mecanique-du-vol-dun-ballon-sonde>
- <http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~phyexp/pmwiki.php/Convention/ConvectionEtPanacheThermique>
- https://web.archive.org/web/20081119164748/http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/designation/693_initie_view.jsp
- http://b.louchart.free.fr/Concours_et_examens/Centrale_Supelec/Sujets/2008_TSI_Physique_1.html
- <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/mouvts-enveloppes-fluides2.xml>