L'aérostation scientifique

Un bref historique.

L'histoire de l'aérostation a maintenant presque 200 ans. Elle remonte au 4 juin 1783, jour où les frères Montgolfier effectuèrent à Annonay, leur première expérience publique. Ils réussirent alors à faire décoller une enveloppe de toile et papier de 250 m^3 gonflée à l'air chaud, qui resta en l'air quelques 10 minutes. Le 27 août de la même année, Charles et les frères Robert réussissaient à faire voler pendant plus de trois quarts d'heure un ballon de 40 m^3, gonflé à l'hydrogène.

Très rapidement, des vols habités furent alors effectués. Le 21 novembre, Pilâtre de Rozier et d'Arlandes volaient pendant près de 25 minutes à bord d'une Montgolfière de 20 000 m^3, et le 1er décembre, Charles et Robert tenaient l'air pendant plus de 2 heures à bord d'un ballon gonflé à l'hydrogène.

Ce n'est cependant qu'au début du XIXme siècle que furent effectués les premiers vols à caractère scientifique. Ainsi en 1804, Gay Lussac montait à plus de 7 000 m, et mettait en évidence que la composition de l'air atmosphérique demeurait constante, et arrivait à la conclusion que le champ magnétique ne variait pas sensiblement avec l'altitude.

Le ballon apparut alors comme un outil de tout premier ordre au service de la recherche scientifique. Il permettait une exploration systématique de notre atmosphère, ainsi que du proche environnement de notre planète, et il pouvait permettre, en montant suffisamment haut, d'observer l'espace lointain dans des domaines interdits au sol par l'écran atmosphérique : rayons X, γ, infrarouge, ultraviolet.

L'histoire de l'aérostation se trouve donc marquée par une recherche permanente des hautes altitudes. Pourtant en 1901, le record d'altitude n'était que de 10 800 m, et il n'atteignait que 22 000 m en 1935. C'est l'apparition des matières plastiques qui, après la deuxième guerre mondiale, allait permettre de franchir un pas décisif.

Grâce à ses caractéristiques mécaniques et à sa légèreté, le polyéthylène permettait en effet de construire des enveloppes pesant moins de 20 g/m^2, alors que les tissus imprégnés ne permettaient pas jusqu'alors de descendre au-dessous de 400 g/m^2.

L'accès aux hautes altitudes était ouvert, et très rapidement les 40 km allaient être atteints, puis dépassés.

A 40 km la densité de l'air n'est plus que de 4 g/m³. L'écran atmosphérique se trouve donc réduit dans un rapport de 997/1000, et à cette altitude, une expérience se trouve placée dans des conditions d'observation presque identiques à celles d'un satellite.

On conçoit aisément que, même de nos jours, le ballon ait conservé tout son intérêt. Les expériences en satellite sont en effet très coûteuses et très longues à préparer (parfois plus de 5 ans). Leur nombre se trouve donc sévèrement limité.

Les expériences en ballon peuvent, au contraire, rester simples, économiques, et être construites rapidement, car la relative clémence de l'environnement n'impose que peu de contraintes. Elles peuvent donc être plus nombreuses, et toucher plus de laboratoires et de chercheurs. Enfin, comme elles sont récupérées, elles peuvent être réutilisées, avec ou sans modification.

Plusieurs pays possèdent de nos jours des installations permanentes consacrées exclusivement à l'aérostation scientifique. Parmi ceux-ci, les Etats-Unis et la France occupent une place de choix.

Les différents types de ballon.

Les programmes de recherche sont des plus divers, et il en est de même des missions demandées aux ballons. On conçoit donc qu'il existe plusieurs types d'enveloppes, chacun présentant des caractéristiques bien particulières.

Le vol à haute altitude nécessite des enveloppes de très grand volume, mais aussi, évidemment, de faible poids. Les matières plastiques, utilisées en faible épaisseur, permettent d'obtenir cette légèreté, mais elles ne permettent pas d'obtenir la résistance mécanique nécessaire pour résister aux efforts qu'engendrerait la pression intérieure, aussi faible soit-elle. L'enveloppe est donc maintenue *ouverte*, et la surpression intérieure reste nulle.

Ce *ballon « ouvert »* constitue une des principales catégories de ballons utilisés pour la recherche scientifique. Ce principe permet la fabrication de très grandes enveloppes ; la plus grande construite de nos jours, avait un volume voisin de 2 millions de m³.

Ces ballons sont fabriqués en polyéthylène d'épaisseur comprise entre 10 et 30 microns. Les plus couramment utilisés de nos jours ont un volume compris entre 350 000 et 1 million de m³. Voici, à titre d'exemple, les caractéristiques de deux de ces enveloppes :

Volume	350 000 m^3	850 000 m^3
Longueur fuseau	131 m	182 m
Surface	24 000 m^2	45 000 m^2
Poids	560 kg	1 110 kg
Matériau (polyéthylène)	13 μ et 36 μ	13 μ et 55 μ
Densité moyenne	23 g/m^2	25 g/m^2
Performances	1 000 kg à 37 km	1 000 kg à 42,8 km
	300 kg à 41,5 km	700 kg à 44 km
Diamètre	98 m	131 m
Hauteur	68 m	102 m

Il est peut-être plus facile de réaliser le gigantisme de ces enveloppes, si l'on considère que la plus grande des deux a une surface 9 fois supérieure à celle d'un terrain de football ; c'est dire qu'elle pourrait aisément recouvrir le terrain et les tribunes qui l'entourent. Et lorsqu'elle est entièrement déployée, elle pourrait contenir 16 « arc de triomphe » identiques à celui de la place de l'Etoile à Paris...

Avec ce type de ballons, des expériences de 1 à 3 tonnes sont couramment lancées, et des altitudes de 40 à 45 km sont couramment atteintes. Les durées de vol sont cependant limitées, car une enveloppe « ouverte » ne peut être stable ; les vols durent généralement quelques heures, et peuvent, grâce à des artifices techniques, atteindre quelques jours.

Le *ballon « fermé »* a, lui, un vol beaucoup plus stable, et il peut rester en vol plusieurs mois. Les efforts engendrés par la pression intérieure en limitent cependant la taille, et imposent l'utilisation de matériaux plus rigides et plus lourds.

Ces ballons sont pratiquement fabriqués « sur mesure », en fonction de la mission qui leur est demandée. Ils permettent d'emporter des nacelles de quelques kilogrammes jusqu'à des altitudes de 15 à 20 km.

Voici, à titre d'exemple, les caractéristiques techniques de deux de ces enveloppes :

Projet	Eole	Etudes atmosphère
Diamètre	3,7 m	7,8 m
Volume	26,5 m^3	250 m^3
Poids	3,5 kg	14 kg
Matériau (polyester) ..	50 μ	50 μ
Densité moyenne	81 g/m^2	75 g/m^2
Altitude vol	12 000 m	16 000 m
Pression extérieure	200 mb	100 mb
Surpression intérieure	10 mb	4 mb
Charge emportée	4 kg	20 kg

Les ballons fermés constituent la deuxième grande catégorie de ballons scientifiques. Ils restent très utilisés pour les vols de longue durée destinés à l'exploration de l'atmosphère.

On mentionnera, dans le seul but d'être complet, d'autres types de ballons, qui sont très peu, sinon pas du tout, utilisés pour la recherche scientifique :

Le *ballon captif troposphérique* est parfois utilisé pour des missions de surveillance.

Le *ballon captif stratosphérique* (20 km) a fait l'objet de quelques études maintenant abandonnées.

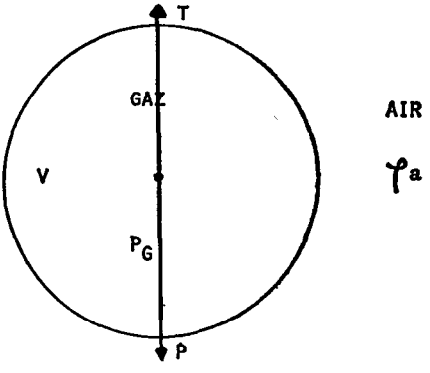
La *Montgolfière,* ou *ballon à air chaud,* est surtout utilisée par l'aérostation sportive. Quelques études ont été récemment initiées pour son utilisation à des fins scientifiques. Ce véhicule utiliserait le rayonnement du Soleil et le rayonnement infrarouge de la Terre comme sources de chaleur ; il permettrait d'obtenir des vols de très longue durée avec d'importantes variations d'altitudes, très favorables à une exploration systématique de l'atmosphère.

Soit un corps de volume V rempli d'un gaz de masse spécifique ϱ_G.

Le principe d'Archimède nous apprend qu'il reçoit de l'air qui l'entoure une poussée T égale au poids du volume d'air déplacé.

$$T = V \varrho_a g.$$

POUSSEE D'ARCHIMEDE



Le « gaz » intérieur est soumis aux efforts de gravité.

$$P = V \varrho_G g.$$

La force ascensionnelle qui en résulte est :

$$\boxed{F = Vg\,(\varrho_a - \varrho_G).}$$

La quantité $b = g\,(\varrho_a - \varrho_G)$ s'appelle le « pouvoir ascensionnel » du gaz.

$$b = g\,\varrho_a \left(I - \frac{\varrho_G}{\varrho_a} \right)$$

or :

$$\frac{\varrho_G}{\varrho_a} = \frac{M_G}{M_a}$$

avec :

$$\frac{P}{\varrho} = \frac{RT}{M}$$

donc :

$$b = \varrho_a g \left(I - \frac{M_G}{M_a} \right)$$

en supposant :

$$P_G = P_a$$

et :

$$T_G = T_a$$

$$\boxed{b = \varrho_a g\,(I - d)}$$

Plusieurs gaz pourraient être utilisés, parce que plus légers que l'air, pour gonfler un ballon. Pour des raisons pratiques, deux seulement le sont : l'hydrogène et l'hélium.

L'hydrogène est le plus performant. Il est bon marché, mais dangereux d'emploi, car très facilement inflammable.

L'hélium peut être utilisé sans danger. Il est beaucoup plus cher, et légèrement moins performant que l'hydrogène.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de différents gaz :

Corps	M_G	G kg/m³	d	Index de portance $I - d$	Pouvoir ascensionnel kg/m³ à 0 °C
Vide	0	0	0	1	1.293
H_2 hydrogène	2.0159	0.090	0.07	0.93	1.203
He hélium	4.0032	0,181	0.14	0.86	1.112
CH_4 méthane	16.04	0.711	0.55	0.45	0.582
NH_3 ammoniac	17.03	0.762	0.59	0.41	0.531
H_2O vapeur d'eau .	18.01	0.802	0.62	0.38	0.491
air à 0 °C	28.9644	1.293	1	0	0
air à 200 °C ..	—	0.746	0.57	0.42	0.547

LE VOL D'UN BALLON OUVERT

La seule phase intéressant un expérimentateur dans le vol d'un ballon ouvert, commence dans la plupart des cas avec le vol à altitude constante stabilisée, ou « plafond ». Mais ce plafond ne pourra commencer qu'après une lente ascension, et une difficile mise en œuvre au sol. Enfin, le plafond terminé, l'expérience sera séparée du ballon, et redescendra au sol sous parachute.

Chaque phase du vol présente des aspects bien particuliers qu'il est intéressant d'analyser.

Le gonflage.

Il consiste à introduire dans l'enveloppe la quantité de gaz nécessaire pour permettre au ballon de s'élever et d'atteindre son altitude de plafonnement. Cette quantité de gaz doit créer une force verticale F destinée à équilibrer le poids de l'ensemble des masses solides, et la traînée aérodynamique du ballon dans son mouvement ascensionnel, soit :

$$F = P_S + f$$

F : Poussée d'Archimède,

P_S : Poids des masses solides,

f : Traînée aérodynamique (ou force ascensionnelle libre).

Cette force ayant été calculée, plusieurs méthodes existent pour mesurer la quantité de gaz qui va la créer :

a) MESURE DIRECTE DE LA FORCE.

C'est la méthode la plus directe, puisqu'elle consiste à mesurer la force ascensionnelle elle-même. Elle est appliquée en France pour le gonflage de tous les ballons ouverts.

Le gaz est introduit dans la partie supérieure du ballon, préalablement ancrée sur un système de pesée. Ce système mesure en permanence l'effort vertical développé par le gaz.

Le système est simple et comporte peu de source d'erreur. Il est seulement limité vers les forces ascensionnelles importantes (environ 2 T), par la difficulté de maintenir correctement l'enveloppe sans provoquer la moindre blessure sur le matériau.

Le vent pourrait, certes, fausser la mesure. Mais la fragilité de l'enveloppe impose que ce vent soit très faible durant toutes les opérations de mise en œuvre au sol (moins de 4 - 5 m/s).

b) MESURE DE LA QUANTITÉ DE GAZ.

L'approche est cette fois indirecte, puisque la mesure porte sur la masse de gaz injectée dans l'enveloppe, masse à partir de laquelle est calculée la force ascensionnelle.

La masse de gaz est ainsi définie :

$$F = Vg(\varrho_a - \varrho_G)$$

soit :

$$F = Vg\,\varrho_G\left(\frac{\varrho_a}{\varrho_G} - 1\right).$$

En supposant que l'air et le gaz se comportent comme des gaz parfaits, et obéissent à la loi :

$$\frac{P}{\varrho} = \frac{RT}{M}.$$

Il vient :

$$\frac{\varrho_a}{\varrho_G} = \frac{P_a}{P_G}\,\frac{T_G}{T_a}\,\frac{M_a}{M_G}$$

Lorsque l'équilibre est atteint :

$$\left.\begin{aligned} P_a &= P_G \\ T_a &= T_G \end{aligned}\right\}$$

donc :

$$\frac{\varrho_a}{\varrho_G} = \frac{M_a}{M_G} = \frac{1}{d}.$$

Il vient donc :

$$\boxed{F = Vg\,\varrho_G\left(\frac{1}{d} - 1\right)}$$

La quantité $\left(\frac{1}{d} - 1\right)$ représente le pouvoir ascensionnel du gaz par unité de poids : kg de poussée/kgp de gaz.

Pour l'hydrogène

$$\frac{1}{d} - 1 = \frac{1}{0.07} - 1 = 13{,}3 \text{ kg/kg } H_2$$

Pour l'hélium

$$\frac{1}{d} - 1 = \frac{1}{0.14} - 1 = 6{,}1 \text{ kg/kg He.}$$

La quantité $V\varrho_G$ représente la masse de gaz M_G à introduire :

$$\boxed{M_G = \frac{F}{g\left(\frac{1}{d} - 1\right)}}$$

Une première solution consiste à mesurer cette quantité à l'aide d'un compteur volumétrique. Ce procédé est parfois utilisé ; il est actuellement à l'étude en France pour les ballons de très grand volume.

Une deuxième solution consiste à évaluer la quantité de gaz contenue initialement dans les réservoirs de stockage, et à mesurer en permanence la quantité restante. Le gonflage est arrêté lorsque la différence correspond à la masse de gaz désirée. Cette méthode est très largement utilisée aux Etats-Unis.

Le gaz est habituellement stocké dans des réservoirs à haute pression (200 à 250 atm). Soit :

P_i ; T_i ; ϱ_i : conditions initiales,

P_f ; T_f ; ϱ_f : conditions finales,

V : volume du réservoir,

M : masse molaire du gaz.

On suppose que l'on a à faire à un gaz parfait obéissant à la loi :

$$\frac{P}{\varrho} = \frac{RT}{M}.$$

Initialement, la masse de gaz contenue dans le réservoir est :

$$V\varrho_i = \frac{VM}{R}\frac{P_i}{T_i}.$$

En fin de gonflage, la masse résiduelle est :

$$V\varrho_f = \frac{VM}{R}\frac{P_f}{T_f}.$$

La masse injectée dans le ballon est donc :

$$\boxed{M_G = \frac{VM}{R}\left(\frac{P_i}{T_i} - \frac{P_f}{T_f}\right).}$$

Plusieurs paramètres vont, dans la réalité, altérer ce schéma théorique :

- le gaz n'est pas un gaz parfait, mais obéit à une loi de la forme :

$$\frac{P}{\varrho} = Z\frac{RT}{M}$$

où le facteur de compressibilité Z dépend de la pression et de la température ;

- le volume des réservoirs n'est pas constant. Il varie avec la pression intérieure et la température ambiante ;
- la température du gaz est difficile à mesurer, car il n'est pas possible de placer un thermomètre au contact du gaz. L'erreur est surtout significative en fin de gonflage (régime non permanent).

Il est possible de tenir compte de certains de ces paramètres, par une approche théorique. Pour les autres, l'erreur est limitée par application de facteurs correctifs empiriques.

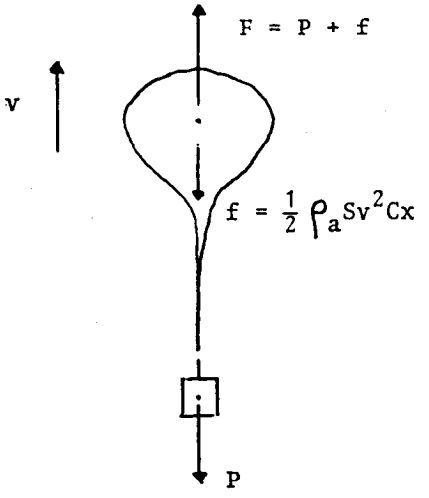
L'ascension.

C'est une des phases de vol les plus délicates pour l'enveloppe, qui va se trouver dans un environnement très rigoureux, et être durement sollicitée.

Remarquons tout de suite que l'enveloppe commence son ascension à l'état « flasque », puisque le gaz intérieur va toujours être en équilibre de pression avec l'air ambiant.

La pression intérieure va décroître comme la pression extérieure, avec l'altitude, et le gaz va occuper une partie toujours plus importante de l'enveloppe.

L'ascension du ballon est rendue possible par l'excédent de la force ascensionnelle F sur le poids total de l'équipage. La différence, ou force ascensionnelle libre, équilibre la traînée aérodynamique.



L'ascension va se poursuivre jusqu'à ce que le ballon ait atteint son niveau de plénitude. L'excédent de gaz est alors évacué au travers d'un orifice placé à la partie inférieure, avant que l'enveloppe ne soit mise en pression.

La poussée du gaz diminue alors, pour équilibrer le seul poids des masses solides. C'est le début du vol à altitude constante, ou « plafond ».

Durant toute l'ascension, et dans la mesure où la température intérieure est égale à la température extérieure, la force ascensionnelle est restée constante.

En effet, comme on l'a vu plus haut :

$$F = Vg(\varrho_a - \varrho_G)$$

$$F = Vg\,\varrho_G \left(\frac{\varrho_a}{\varrho_G} - 1 \right)$$

$$F = (V\varrho_G)\, g \left(\frac{1}{d} - 1 \right)$$

Equation dans laquelle tous les termes sont constants :
$(V\,\varrho_G) = M_G$: la masse du gaz ne varie pas.

$d = \dfrac{M_G}{M_a}$: la densité du gaz ne varie pas car la masse molaire de l'air M_a est une constante de notre atmosphère (en négligeant la teneur en eau).

La vitesse du ballon par contre, ne va pas rester constante, mais va varier avec l'altitude.

En effet, la force aérodynamique est de la forme :

$$f = \frac{1}{2}\,\varrho_a\, S\, v^2\, C_x$$

avec :

f : force ascensionnelle libre,
S : maître couple du ballon,
v : vitesse ascensionnelle,
C_x : coefficient de traînée.

S est lié au volume par une relation de la forme :

$$S = A\,V^{2/3}$$

A = Cte.

Nous supposerons, comme précédemment, que la température du gaz est égale à la température de l'air. L'équation de portance est donc :

$$F = Vg\,(\varrho_a - \varrho_G)$$

$$F = Vg\;\varrho_a \left(1 - \frac{\varrho_G}{\varrho_a} \right)$$

$$F = Vg\,\varrho_a\,(1 - d)$$

$$V = \frac{F}{g\,\varrho_a\,(1 - d)}.$$

Soit une équation de la forme :

$$V = \frac{B}{\varrho_a}.$$

Avec B = Cte, puisque F, g, d sont constants.
Donc :

$$S = A V^{2/3} = A \left(\frac{B}{\varrho_a} \right)^{2/3} = \frac{C}{(\varrho_a)^{2/3}}$$

où C = Cte.

L'équation de traînée aérodynamique nous donne :

$$v^2 = \frac{2f}{\varrho_a S C_x}.$$

Soit en remplaçant S par sa valeur :

$$v^2 = \frac{2f\,(\varrho_a)^{2/3}}{\varrho_a C_x C} = \frac{2f}{(\varrho_a)^{1/3} C_x C}.$$

Bien que la forme du ballon change en cours de montée, on peut considérer que Cx est sensiblement constant (valeur comprise entre 0.5 et 1). Comme par ailleurs, la force ascensionnelle f reste constante, la vitesse prend la forme :

$$v^2 = \frac{K}{(\varrho_a)^{1/3}}.$$

Soit :

$$\boxed{v = K \varrho_a^{(1/6)}}$$

La vitesse croît donc avec l'altitude comme l'inverse de la puissance (1/6) de la masse spécifique de l'air.

En fait, de nouveau, la réalité va venir altérer ce schéma théorique.

Sous l'effet de la détente, à l'intérieur du ballon, le gaz va se refroidir, tout au long de la montée.

Dans la partie basse de l'atmosphère, ou troposphère, l'air se refroidit également puisque le gradient de température est négatif. Les deux températures varient dans le même sens, et l'écart sera d'autant plus faible, que la convection intense tend à les égaliser.

On note dans cette région peu d'écart avec la théorie.

A la limite de la troposphère (tropopause), le gradient s'annule, pour devenir positif au-dessus, dans la stratosphère. Les températures d'air et de gaz vont alors évoluer en sens inverse et l'égalité sera d'autant moins respectée que la convection dimi-

nue avec l'altitude, puisqu'elle dépend de la masse spécifique de l'air.

La force ascensionnelle devient plus faible, la vitesse diminue, parfois s'annule.

La présence du rayonnement solaire vient atténuer ce phénomène. En réchauffant le gaz, il permet de diminuer ou d'annuler l'écart de température, et de maintenir une valeur positive de la force ascensionnelle libre jusqu'au plafond.

Son action est cependant plus marquée sur les petits ballons que sur les gros. Le réchauffement est en effet une fonction de la surface alors que le refroidissement est une fonction du volume. Or, le rapport $\frac{S}{V}$, qui caractérise le bilan, décroît avec $\frac{1}{R}$, donc avec la taille du ballon.

Dans la réalité, les effets de ralentissement ou d'arrêt de montée sont d'autant plus marqués que le ballon est volumineux, et beaucoup plus importants de nuit que de jour.

On peut être tenté, pour éviter ce phénomène, d'augmenter la force ascensionnelle libre au départ. Tel n'est pas le remède utilisé, car les conséquences pourraient en être très graves. Le ballon, en effet, va, tout au long de son ascension, se déployer et être soumis, bien souvent à des vents cisaillants. Ces deux phénomènes vont soumettre le polyéthylène à des efforts, qu'il est d'autant moins en mesure de supporter, que la température est plus basse. Or, cette température atteint à la tropopause, $-65°$ à $-70°$ C sous nos latitudes, et peut atteindre $-85°$ à $-90°$ C sous les latitudes tropicales. C'est la limite de ce que peut supporter le polyéthylène, qui peut dès $-80°$ C atteindre la « transition vitreuse », au-delà de laquelle il devient aussi fragile que du verre.

Les sollicitations sont d'autant plus importantes que la vitesse de montée est élevée. La force ascensionnelle est donc limitée, de façon à obtenir une vitesse initiale de montée voisine de 5 m/s. Les ballons de grande taille emportent, par ailleurs, une certaine quantité de lest, qui est libérée à la demande, si le ballon accuse un ralentissement trop important.

Le vol au plafond.

C'est la partie du vol qui présente généralement le plus d'intérêt pour l'expérience scientifique. Les observations effectuées à bord sont retransmises au sol par télémesure, et des ordres

peuvent être envoyés à la nacelle, grâce à un système de télécommande.

La stabilité du ballon va, une nouvelle fois, être dictée par l'équilibre thermique du gaz dans l'enveloppe. Cet équilibre va s'établir sous l'effet de plusieurs facteurs :

- le rayonnement direct du soleil ;
- le rayonnement indirect du soleil (Albédo) ;
- le rayonnement infrarouge de la Terre ;
- le rayonnement du ballon vers l'Espace.

La convection peut être négligée car la masse spécifique de l'air est très faible.

L'équilibre s'établit pour une valeur de la température intérieure différente de la température extérieure, et va varier en fonction des éléments extérieurs.

La température intérieure Ti peut augmenter, (mouvement ascendant du soleil, variation d'albédo...). Le gaz se dilate, une partie est évacuée vers l'extérieur, le ballon se rééquilibre à une altitude supérieure.

La température intérieure Ti peut diminuer, (mouvement descendant du soleil, variation d'albédo...). Le gaz se contracte, la portance diminue, le ballon descend. La rupture d'équilibre la plus importante se produit au coucher du soleil.

Le gaz enregistre alors un refroidissement qui peut atteindre 20° C, et le ballon amorce une descente qui ne se termine bien souvent qu'au sol. C'est là une des causes les plus importantes de limitation de la durée de vol des ballons ouverts.

Cette descente peut être arrêtée par délestage. Un allégement de l'ordre de 6 à 8 % du poids du véhicule est généralement suffisant.

La descente.

La fin du vol est généralement décidée en fonction des seules contraintes de récupération de la nacelle (accessibilité, limite de territoire, etc.).

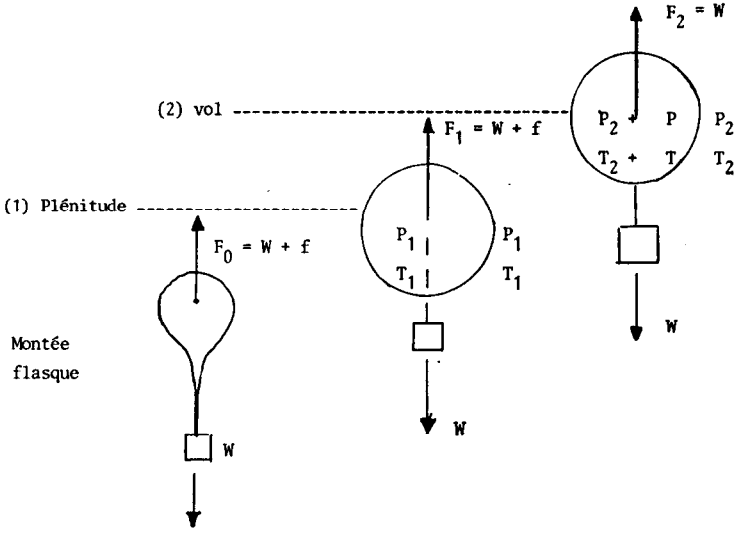
Lorsque la décision est prise, ballon et nacelle sont séparés l'un de l'autre par télécommande.

Le ballon est alors détruit et retombe au sol. La nacelle redescend sous parachute. Sa vitesse de descente est de l'ordre de 100 m/s dans les hautes couches de l'atmosphère, pour n'être plus que de 5 à 6 m. sec. au voisinage du sol.

LE VOL D'UN BALLON FERME

Le ballon fermé est fabriqué à l'aide d'un matériau très résistant, à haut module d'élasticité. Lorsque l'enveloppe est entièrement gonflée et soumise à une surpression intérieure, elle constitue une enceinte, dont le volume reste constant.

Durant son ascension, le ballon fermé est flasque, et se comporte comme un ballon ouvert : surpression intérieure nulle, force ascensionnelle constante.



$F = Vg\,\varrho_a$ (Archimède).

A une certaine altitude, il atteint son niveau de plénitude : le gaz emplit toute l'enveloppe mais la pression intérieure est encore égale à la pression extérieure.

A partir de cette altitude, le volume de l'enveloppe va rester constant ; la masse spécifique de l'air diminuant, la force ascensionnelle va diminuer, puis s'annuler, tandis qu'à l'intérieur, le gaz se met en surpression. Le ballon a alors atteint son niveau de vol. Il demeurera à ce niveau de « densité constante » aussi longtemps que la surpression intérieure sera positive. Certains ballons ont ainsi volé plus d'une année.

Evaluation de la surpression intérieure.

La valeur de la surpression est très importante. Trop forte, le ballon éclate, trop faible, le ballon se dépressurise rapidement.

Il est intéressant de calculer sa valeur, soit :

F : $Vg\,\varrho_a$ la poussée d'Archidède,

W : la masse totale de l'équipage, gaz inclus,

f : la force ascensionnelle libre (voir ballon ouvert).

En montée : $F_0 = W + f$.

Au niveau 1 : $F_1 = W + f = Vg\,\varrho_{a1}$.

Au niveau 2 : $F_2 = W = Vg\,\varrho_{a2}$.

En combinant, on obtient :

$$f = F_1 - F_2$$

ou encore :

$$\frac{f}{W} = \frac{F_1 - F_2}{F_2} = \frac{F_1}{F_2} - 1$$

$$\frac{f}{W} = \frac{\varrho_{a1}}{\varrho_{a2}} - 1.$$

La quantité $\frac{f}{W}$ s'appelle le taux de gonflage.

On suppose que l'air et le gaz sont des gaz parfaits.

Il vient donc :

$$\frac{f}{W} = \frac{P_{a1}}{T_{a1}} \frac{T_{a2}}{P_{a2}} - 1.$$

Evaluons $\frac{P_{a1}}{T_{a1}}$:

$\frac{P_{a1}}{T_{a1}} = \frac{P_{G1}}{T_{G1}}$ puisque au niveau (1) il y a équilibre et que $P_{a1} = P_{G1}$

$T_{a1} = T_{G1}$

$\frac{P_{G1}}{T_{G1}} = \frac{P_{G2}}{T_{G2}}$ puisque niveau (1) au niveau (2) il y a évolution à volume constant. Il vient donc :

$$\frac{f}{W} = \frac{P_{G2}}{P_{a2}} \frac{T_{a2}}{T_{G2}} - 1$$

$$\frac{f}{W} = \frac{P_a + \Delta P}{P_a} \frac{T_a}{T_a + \Delta T} - 1$$

$$\frac{P_a + \Delta P}{P_a} = \left(\frac{f}{W} + 1 \right) \left(\frac{T_a + \Delta T}{T_a} \right)$$

$$1 + \frac{\Delta P}{P} = \left(1 + \frac{f}{W} \right) \left(1 + \frac{\Delta T}{T} \right)$$

Soit, en négligeant les termes du 2me ordre :

$$\boxed{\frac{\Delta P}{P} = \frac{f}{W} + \frac{\Delta T}{T}}$$

Pour $\Delta T = 0$, on obtient le taux de surpression dit « isotherme ». Il est remarquable que ce taux de surpression soit égal au taux de gonflage, c'est-à-dire le rapport de la force ascensionnelle libre au poids total de l'équipage, gaz inclus.

On utilise couramment des taux de gonflage de 5 à 15 %, suivant la taille de l'enveloppe, la résistance du matériau, et la durée de vie souhaitée.

A. SOUBRIER,
(C.N.E.S. - Toulouse)