CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

Sciences Techniques Jeunesse

ASSOCIATION NATIONALE SCIENCES TECHNIQUES JEUNESSE

Secteur ESPACE

16 Place Jacques Brel - 91130 RIS ORANGIS

Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43

E-Mail : espace@anstj.mime.univ-paris8.fr

Web: http://anstj.mime.univ-paris8.fr

CARACTERISTIQUES DE L'ATMOSPHERE

(Atmosphère moyenne & Modèle)

&

MECANIQUE DU VOL

(Note technique)

Version 2 (septembre 1998)

SOMMAIRE

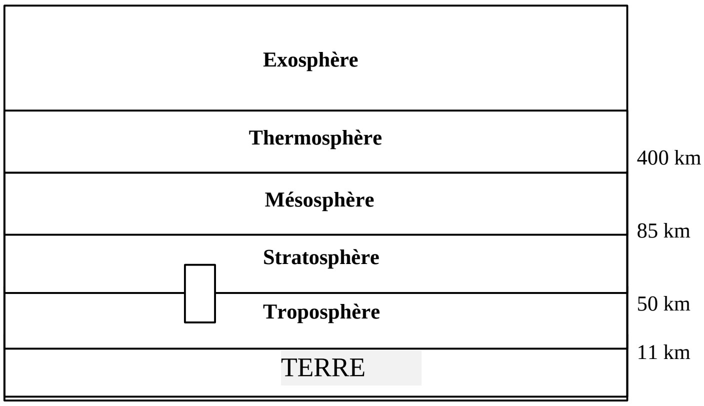
CARACTERISTIQUES DE L'ATMOSPHERE

MECANIQUE DU VOL

1. Structure de l'atmosphère

L'objectif de ce document est de préciser les principales caractéristiques de l'atmosphère aux altitudes où évoluent les ballons.

L'atmosphère terrestre possède une structure complexe. Pour l'étudier on distingue des couches présentant des comportements différents. Les ballons-sondes évoluent entre 0 et 40 km d'altitude et traversent ainsi la troposphère (entre 0 et 11 km) et la stratosphère (entre 11 et 50 km).



2. Les modèles atmosphériques

Ce document décrit une table d'atmosphère moyenne ainsi qu'un modèle d'atmosphère simple proposé par l'A.N.S.T.J.

2.1 Table de l'atmosphère standard (GOST 4401.64)

Les données proposées par cette table sont relatives à l'altitude. On a :

- ☞ L'accélération de la pesanteur (en m/s²)

- ☞ La température absolue (en degré Kelvin)
  L'échelle en degré Kelvin est celle que l'on utilise pour les calculs scientifiques. Le zéro degré Kelvin correspond au zéro absolu c'est à dire la température minimale possible (soit -273.15°C). La variation d'un degré Kelvin correspond à la variation d'un degré Celcius.
- ☞ Le nombre volumique (en m-3)
  Le nombre volumique est le nombre de molécule d'air par m3.
- ☞ La masse volumique de l'air et sa valeur rapportée au sol (en kg/m3).

- ☞ La célérité du son (en m/s)

- ☞ Rapport des viscosités cinématique
  La viscosité cinématique est peu utilisée dans nos applications. Elle est le quotient de la viscosité absolue par la masse volumique de l'air. La viscosité absolue représente la résistance opposée par l'air pour une vitesse de déformation donnée. Au niveau de la mer la viscosité absolue vaut $1.4607.10^{-5}$ m²/s.
- ☞ Rapport des conductivités thermiques

La conductivité thermique représente la capacité de l'air à réaliser les échanges thermiques. Au niveau de la mer la conductivité thermique vaut $6.0530.10^6$ kcal/m/s.

☞ Rapport des pressions

Pour évaluer les variations des grandeurs physiques liées à l'atmosphère (température, pression,...) en fonction de l'altitude deux méthodes sont envisageables.

La première consiste à effectuer une moyenne des paramètres ***mesurés*** par les radiosondes sur une durée donnée. On obtient alors une **table d'atmosphère moyenne**.

La deuxième méthode s'appuie sur un ***calcul*** du comportement thermodynamique des couches de l'atmosphère. En effet, chaque couche possède un comportement thermodynamique particulier lié à sa composition chimique et aux échanges thermiques globaux de l'atmosphère. Dans ce cas, on parle de **modèle d'atmosphère**. Plus le modèle intègre de paramètres plus il est proche de la réalité. Dans le monde, plusieurs équipes de scientifiques travaillent sur la détermination de ces modèles.

La pression au sol dépend des conditions atmosphériques. Elle peut être déterminée avec un simple baromètre.

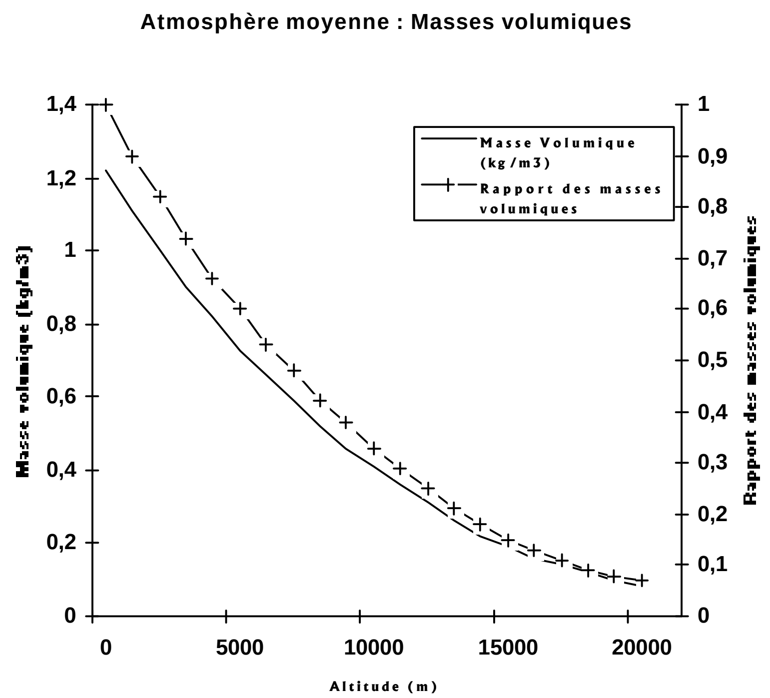
Altitude (m)	Accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)	Température (°K)	Nombre Volumique (m^{-3})	Masse Volumique ($kg.m^{-3}$)	Rapport des masses volumiques	Célérité du son ($m.s^{-1}$)	Rapport des viscosités cinématiques	Rapport des conductivités thermiques	Rapport des pressions
0	9,8066	288	2,54e25	1,22	1	340	1	1	1
1000	9,8036	281	2,31e25	1,11	0,90	336	1,08	0,979	0,887
2000	9,8005	275	2,09e25	1,00	0,82	332	1,17	0,959	0,784
3000	9,7974	268	1,89e25	0,90	0,74	328	1,27	1,270	0,938
4000	9,7943	262	1,70e25	0,82	0,66	324	1,38	0,918	0,608
5000	9,7912	255	1,53e25	0,73	0,60	320	1,51	0,897	0,533
6000	9,7882	249	1,37e25	0,66	0,53	316	1,65	0,876	0,466
7000	9,7851	242	1,22e25	0,59	0,48	312	1,81	0,855	0,405
8000	9,7820	236	1,09e25	0,52	0,42	308	1,98	0,834	0,351
9000	9,7789	229	9,70e24	0,46	0,38	303	2,18	0,813	0,303
10000	9,7759	223	8,50e24	0,41	0,33	299	2,41	0,790	0,261
11000	9,7728	216	7,58e24	0,36	0,29	295	2,66	0,770	0,224
12000	9,7697	216	6,48e24	0,31	0,25	295	3,11	0,770	0,191
13000	9,7667	216	5,54e24	0,26	0,21	295	3,65	0,770	0,163
14000	9,7636	216	4,73e24	0,22	0,18	295	4,27	0,770	0,139
15000	9,7605	216	4,04e24	0,19	0,15	295	4,99	0,770	0,119
16000	9,7575	216	3,46e24	0,16	0,13	295	5,84	0,770	0,102
17000	9,7544	216	2,95e24	0,14	0,11	295	6,83	0,770	0,087
18000	9,7513	216	2,52e24	0,12	0,09	295	8,00	0,770	0,0746
19000	9,7483	216	2,16e24	0,10	0,08	295	9,35	0,770	0,0638
20000	9,7452	216	1,84e24	0,08	0,07	295	10,9	0,770	0,0545

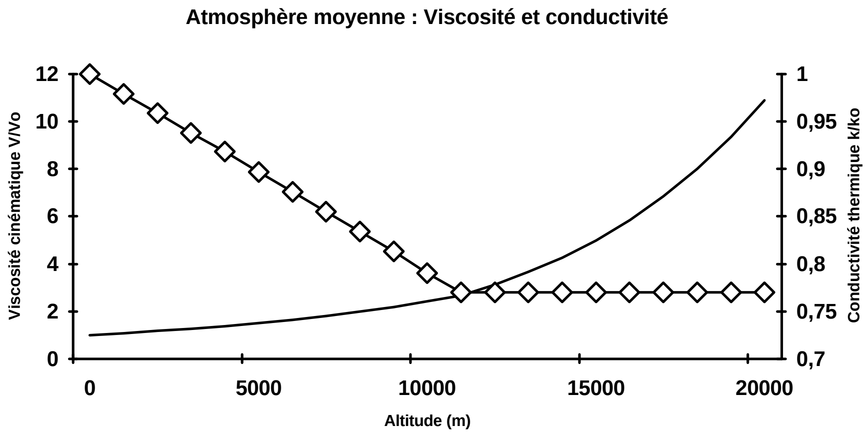
☞ *Lecture de la table*

On souhaite, par exemple, connaître la pression absolue à 11000 m.

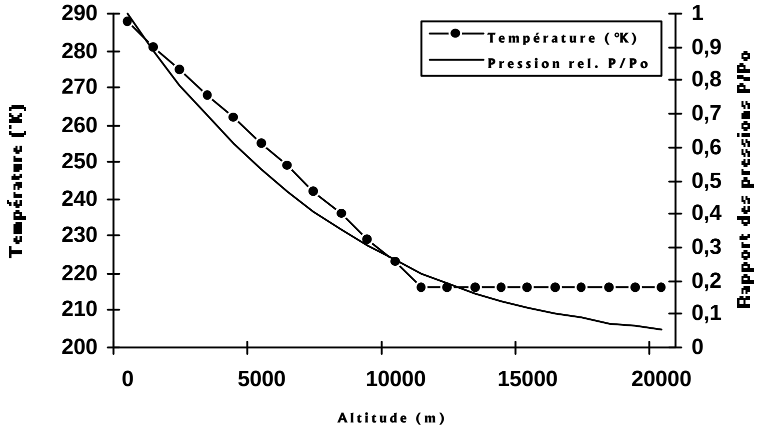
La table donne le rapport des pressions suivant : 0,224
Au sol le baromètre indique 1010 mb.

Ainsi la pression absolue à 11000m vaut : 0.24031*1010 soit 242.7131 mb.

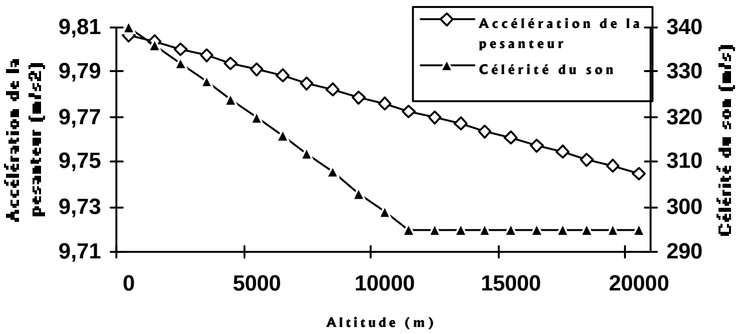

Atmosphère moyenne : Masses volumiques
Masse Volumique (kg/m3)
Rapport des masses volumiques
Masse volumique (kg/m3)
Rapport des masses volumiques
Altitude (m)
1,4
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
5000
10000
15000
20000


Atmosphère moyenne : Viscosité et conductivité
Viscosité cinématique V/Vo
Conductivité thermique k/ko
Altitude (m)
12
10
8
6
4
2
0
1
0,95
0,9
0,85
0,8
0,75
0,7
0
5000
10000
15000
20000

Atmosphère moyenne : Pression et Température



Atmosphère moyenne :
Accélération de la pesanteur et célérité du son



2.2 Le modèle d'atmosphère ANSTJ

Le modèle d'atmosphère développé par l'ANSTJ s'appuie sur la thermodynamique des couches de l'atmosphère et présente l'avantage de pouvoir être étendu jusqu'à 40 km d'altitude. Cependant, à l'heure actuelle, il n'est relatif qu'à la pression.

☞*Le modèle troposphérique*

Le modèle troposphérique est valable entre 0 et 11 km. Il s'appuie sur le fait qu'il existe peu d'échange de chaleur entre les couches d'air adjacentes. On dit ces échanges adiabatiques.

Les calculs dérivant de cette hypothèse amènent la relation suivante :

$$\boxed{P = Po(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma} . \frac{M.go}{R.To} .h)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}$$

P : Pression absolue à l'altitude h.
Po : Pression absolue au sol.
γ: Rapport des capacités calorifiques à pression et volume constant de l'air.
M: Masse molaire de l'air (28.84 g/mol).
go: Accélération de la pesanteur au niveau du sol (9.81m/s²).
R: Constante des gaz parfait (8.31J/°K/mol)
To: Température au sol (en °K).
h: Altitude (en m)

En prenant To=293 °K (20°C)

On a

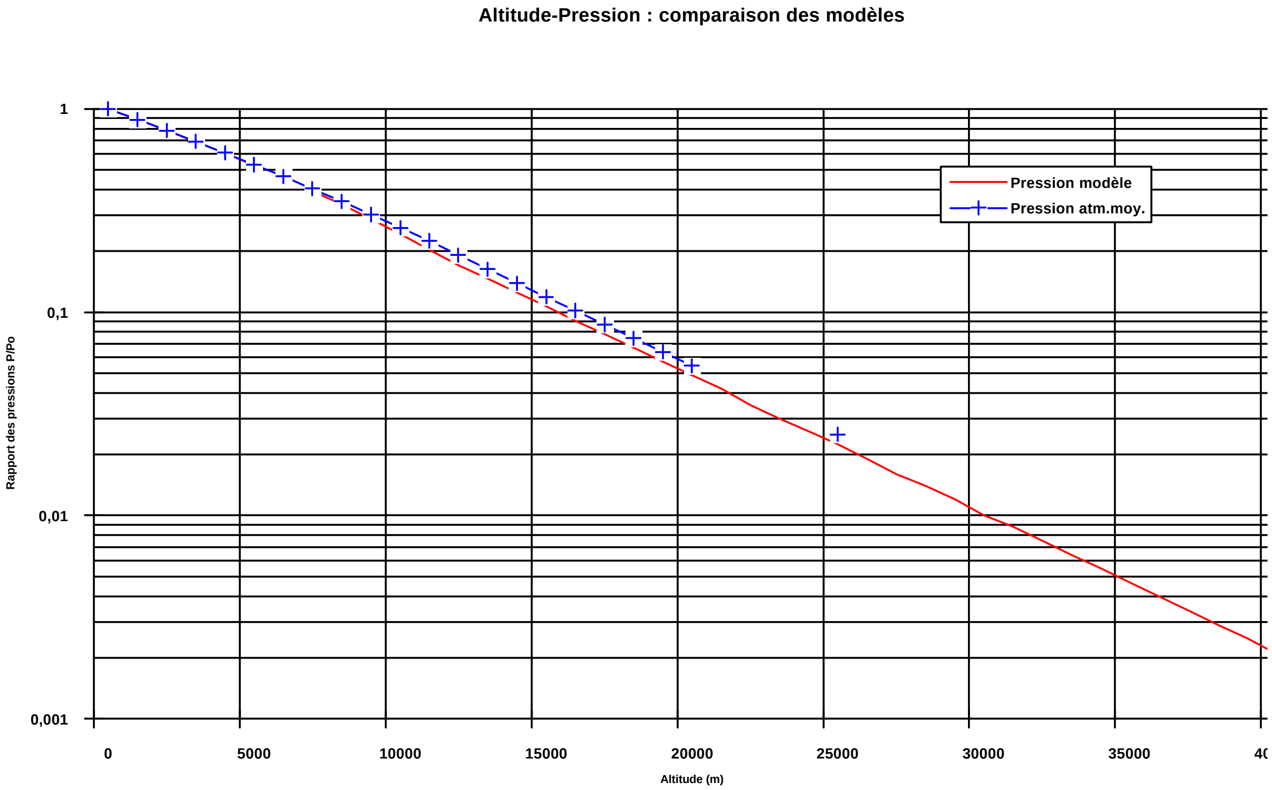
$$\boxed{\frac{P}{Po} = (1 - 3.32.10^{-5}.h)^{\frac{7}{2}}}$$

☞*Le modèle stratosphérique*

Le modèle stratosphérique est basé sur le caractère isothermique de cette couche. Dans la pratique on constate une légère augmentation de la température pour des altitudes supérieures à 30000m. Toutefois, le modèle reste acceptable jusqu'à 40000m.

On a la relation suivante :

$$\boxed{P = P_{R11000\,m} .Po.e^{-\frac{Mgo}{RT_{11000\,m}}.(h\text{-}11000)}}$$



Altitude	Pression (modèle ANSTJ)	Pression (Atmo.stand.)
0	1	1
1000	0,888	0,887
2000	0,786	0,784
3000	0,692	0,692
4000	0,607	0,608
5000	0,529	0,533
6000	0.459	0,466
7000	0,396	0,405
8000	0,339	0,351
9000	0,288	0,303
10000	0,243	0,261
11000	0,203	0,224
12000	0,178	0,191
13000	0,158	0,163
14000	0,141	0,139
15000	0,125	0,119
16000	0,111	0,102
17000	0,099	0,087
18000	0,088	0,0746
19000	0,079	0,0638
20000	0,070	0,0545

Altitude	Pression (modèle ANSTJ)	
21000	0,062	
22000	0,055	
23000	0,049	
24000	0,044	
25000	0,039	
26000	0,035	
27000	0,031	
28000	0,027	
29000	0,024	
30000	0,022	
31000	0,019	
32000	0,017	
33000	0,015	
34000	0,013	
35000	0,012	
36000	0,011	
37000	0,009	
38000	0,008	
39000	0,007	
40000	0,006	

P: Pression absolue à l'altitude h.
P_{R1100m} : Pression relative à 11000m (0.204)
Po : Pression absolue au sol.
M : Masse molaire de l'air (28.84g/mol)
go : Accélération de la pesanteur au sol (9.81m/s²)
R : Constante des gaz parfaits (8.31 J/°K/mol)
T_{11000m} : Température à 11000m (216 °K)

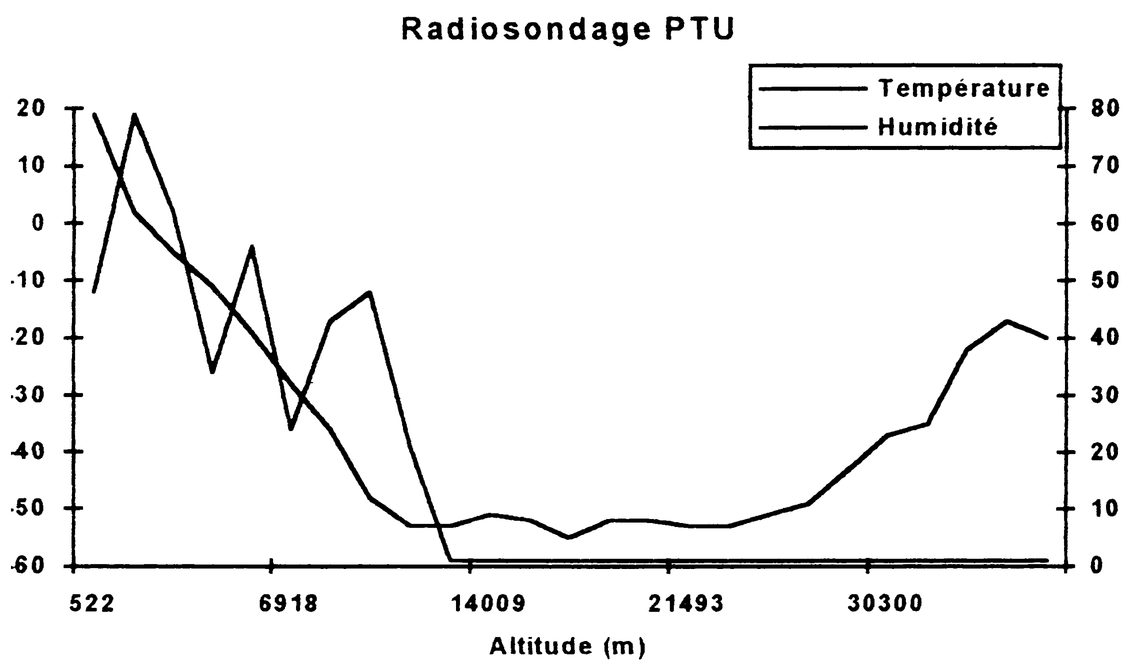
On a : $$\boxed{\frac{P}{Po} = 0.204.e^{-1.56.10^{-4}.(h-11000)}}$$

2.3 Comparaison et validité du modèle

Les courbes représentant la pression en fonction de l'altitude montrent que le modèle ANSTJ donnent des résultats proches de l'atmosphère standard (GOST) de 0 à 20000 m. Au-delà, les données du modèle ANSTJ ont pu être validées grâce à d'autres tables.

3. L'humidité

L'humidité est un facteur météorologique important. Il est très difficile à évaluer car fortement dépendant des conditions nuageuses locales. Globalement, l'humidité diminue avec l'altitude pour disparaître dans la stratosphère.



Mécanique du vol

Documentation technique

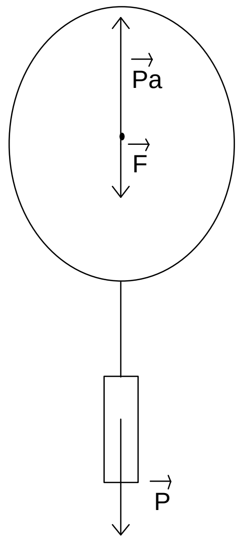
VERSION 1 (Octobre 95)

par Nicolas VERDIER

1.Vitesse ascensionnelle d'un ballon

La connaissance de la vitesse ascensionnelle d'un ballon permet d'évaluer la trajectoire de celui-ci. Pour déterminer cette vitesse, il est nécessaire d'effectuer le bilan des forces appliquées au ballon et résoudre la relation fondamentale de la dynamique.

1.1 Bilan des forces appliquées



Si un ballon est capable de s'élever dans les airs c'est qu'il existe une force qui s'oppose à son poids. Cette force est connue sous le nom de poussée d'Archimède. La poussée d'Archimède est égale au poids du volume d'air déplacé c'est à dire le volume de l'espace qu'occupe l'ensemble de la chaîne de vol. Dans le cas d'un ballon c'est l'enveloppe qui contribue essentiellement à cette poussée. Si V est le volume du ballon, la poussée d'Archimède vaut :

$$\mathbf{Pa=\rho.V.go}$$

avec ρ : Masse volumique de l'air
V : Volume de l'enveloppe
go : Accélération de la pesanteur au sol

Pour que le ballon puisse s'élever il faut nécessairement Pa>P où P=M.go (M est la masse de la chaîne de vol).

La condition de vol s'écrit donc :

$$\mathbf{\rho.V>M}$$

Cependant, au cours du vol une autre force apparaît. Il s'agit de la force de frottement qu'engendre l'air ambiant. Cette force F qui s'oppose au mouvement s'exprime par :

$$F = \frac{1}{2}.Cx.r.S.v^2$$

avec Cx : Coefficient de traînée
ρ : Masse volumique de l'air
S : Maître couple du ballon

V : Vitesse ascensionnelle du ballon

Le coefficient de traînée est le paramètre le plus difficile à déterminer car il dépend de la nature et de la forme de l'enveloppe. Nous le considérons généralement égal à 1. Le maître couple est la surface que présente le ballon dans le sens du mouvement. Le maître couple se déduit du volume du ballon.

Dans la pratique il existe d'autres forces (vent...) appliquées au ballon qui modifient son comportement. Cependant dans notre modèle simplifié on distinguera uniquement :

P : *Poids de l'ensemble de la chaîne de vol*

Pa : *Poussée d'Archimède*

F : *Frottement du ballon dans l'air*

1.2 Relation fondamentale de la dynamique

Pour déterminer la vitesse ascensionnelle du ballon on lui applique la relation fondamentale de la dynamique.

$$\boxed{\vec{F} + \vec{Pa} + \vec{P} = M\vec{a}}$$

d'où

$$\boxed{-\frac{1}{2}.r.Cx.S.v^2.\vec{k} + r.V.go.\vec{k} - M.go.\vec{k} = M.a.\vec{k}}$$

Or, l'accélération a est, en fait, la variation de la vitesse v au cours du temps.

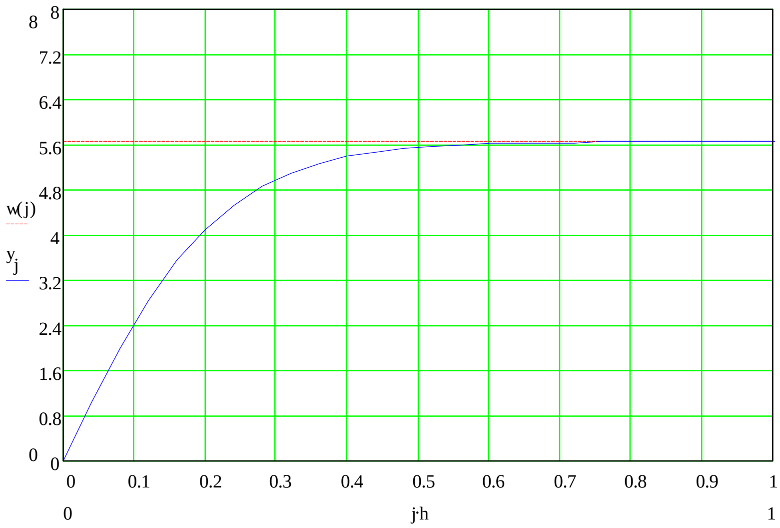
Ainsi, $a = \frac{dv}{dt}$

On obtient finalement l'équation différentielle suivante :

$$\boxed{-\frac{1}{2}\frac{r.Cx.S}{M}v^2 + (\frac{r.V}{M} - 1).go = \frac{dv}{dt}}$$

Pour résoudre cette équation il est bon d'énoncer les conditions initiales. Dans le cas d'un lâcher de ballon on a V(t=0)=0.

La résolution analytique d'une telle équation n'est pas aisée et il est nécessaire d'utiliser une méthode de résolution numérique. La méthode de Runge-Kutta à l'ordre 4 donne le résultat suivant :



(en s)

p =1.22 kg/m3 Cx=1 S=4m2 V=9m3 M=3kg go=9.81m/s2

Ce graphe montre l'évolution de la vitesse en fonction du temps. On remarque que, très rapidement, celle-ci tend vers une vitesse limite constante d'environ 5.6m/s. On peut déduire de ce résultat qu'un ballon "réagit" très vite à son environnement et que toute perturbation atmosphérique se répercutera sur la vitesse ascensionnelle de celui-ci.

Il en résulte que le temps que met le ballon pour atteindre l'équilibre est faible devant celui d'évolution des paramètres physiques. On peut donc considérer à tout instant qu'il y a équilibre. Cette hypothèse permet de simplifier la relation fondamentale de la dynamique puisque, à l'équilibre, la variation de la vitesse du ballon en fonction du temps est nulle.

On a : a=0

d'où l'expression de la vitesse limite

$$\boxed{\mathrm{Vl} = \sqrt{\frac{2.(r.\mathrm{V} - \mathrm{M})}{\mathrm{Cx.S.}r}}}$$

2. Altitude d'éclatement d'un ballon

Pour déterminer l'altitude d'éclatement d'un ballon on se réfère à la documentation des fabriquants.

Type de ballon	**100**	**200**	**300**	**600**	**1200**	**2000**
Poids moyen (g)	100	200	300	600	1200	2000
Force ascensionnelle libre (g)	500	1150	1350	1100	2000	2000
Volume au lâcher (m3)	0.9	1.6	1.8	3.0	4.2	5.7
Diamètre à l'éclatement (m)	2.4	3.6	4.5	6.4	9.7	13.7
Altitude (km)	16	19	23	28	30	40

La force ascensionnelle libre est la poussée équivalente d'un ballon possédant une charge utile de 1kg.
Les altitudes mentionnées sont donc relatives à une charge utile de 1 kg. Il est intéressant de déterminer la valeur de la tare c'est à dire la masse qu'il faut suspendre au ballon pour annuler sa force ascensionnelle.

On a **Tare= Fasc. libre+ 1kg**

Si le poids de la chaîne de vol est inférieur à la tare, le ballon atteindra, en théorie, l'altitude indiquée puisque l'éclatement de celui-ci n'est relatif qu'à son volume. Néanmoins la vitesse ascensionnelle verra sa valeur diminuer avec l'augmentation de la charge utile.

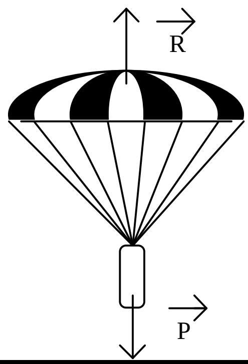
Cependant, si la masse du ballon excède la tare, le décollage n'est possible qu'en gonflant davantage le ballon. Le ballon éclatera, à une altitude plus faible.

3. Descente sous parachute

Lorsque la chaîne de vol descend sous parachute une force de frottement R similaire à la force F du §1.1 s'oppose au déplacement. Compte tenu des résultats obtenus au §1.1 la vitesse de descente peut s'exprimer en considérant l'équilibre des forces R et P.

On a $$\boxed{v = \sqrt{\frac{2M'.go}{S.Cx.r}}}$$

On remarque que la vitesse v dépend de la masse volumique de l'air. Or, en utilisant la table d'atmosphère standard on obtient les vitesses de chute suivante.



Pour : S=1.2m²
Cx=1
M'=2.5kg (masse de la chaîne sans ballon)

Altitude	20000	16000	12000	8000	4000	0
Vitesse	77.5	57.5	41.3	31.7	25.5	21