

# *CLUB AEROSPATIAL*

## *PROJET PEGASE*

**CONCEPTION ET REALISATION  
D'UNE  
NACELLE DE TELEMESURE POUR BALLON-SONDE.**

*1998/99*

- ◆ Suivi de trajectoire par GPS.
- ◆ Tracé de trajectoire sur carte.
- ◆ Mesures météorologiques de la haute atmosphère.
- ◆ Télétransmission numérique.
- ◆ Traitement et affichage informatique temps-réel.

## REMERCIEMENTS

Les plus **sincères** remerciements à :

- Tous les membres de l'**ANSTJ – Espace**,

En particulier :

Emmanuel Jolly, Etienne Maier, Laurent Costy, Emmanuel Laurent, Sébastien Hémard, Bruno... Et à tous les autres !!

- A **Dassault Aviation**, à tous les membres du jury « Objectif Pilote ».
- A tous les Ingénieurs du **CNES** impliqués.
- Aux **Clubs** du Festival Espace 1999
- Au Bureau des élèves ESEO 1999 et à tous les oubliés...

## LE CLUB

Club Aérospatial E.S.E.O.

Ecole Supérieure d'Electronique de l'Ouest.  
4, rue Merlet de la Boulaye  
49000 ANGERS

### *Membres actifs :*

LABARTHE Christophe, I2A : Président, suppléant relations extérieures.  
TOURILLON Olivier, I1B : Vice-président, responsable relations extérieures.  
BASKEVITCH Grégory, I1A : Trésorier.  
NOGUE Laëtitia, I1B : Secrétaire.

BERHAULT Jean Michel, I1A : responsable informatique.  
THOMASSIN Tony, I2A : responsable carte microcontrôleur.

### *Partenaires :*

Dassault Aviation  
Partenaire financier  
27, rue du Professeur Victor Pauchet 92420 Vaucresson  
tél : 01.47.85.85  
Fax : 01.47.95.85.19  
Relations Ecoles : Cécile Girault

ANSTJ - Espace  
Association Nationale Sciences et Techniques Jeunesse, Secteur Espace  
16, place Jacques Brel – 91130 RIS ORANGIS  
Président : Laurent Costy, Chargé de communication : Etienne Maier

## **BIBLIOGRAPHIE**

**Guide de la Météorologie** – théorie et pratique Günther D. Roth – Alain Gillot-Pétre

Editions Delachaux et Niestlé

**L'atmosphère et ses phénomènes** – Anny-Chantal Levasseur-Regourd

Editions De Vecchi

**La Climatologie** - Pierre Estienne – Alain Godard

Editions Armand Colin

**Le Guide du Ciel** – Colin A. Ronan

Edition Solar

**Documents ANSTJ** – secteur Espace.

NB : Les 3 premiers livres sont disponibles à la Bibliothèque Municipale d'Angers.

De nombreux documents sont disponibles auprès de l'ANSTJ – Espace.

## L'EQUIPE



### De gauche à droite :

Christophe LABARTHE  
Olivier TOURILLON  
Jean Michel BERHAULT  
Tony THOMASSIN

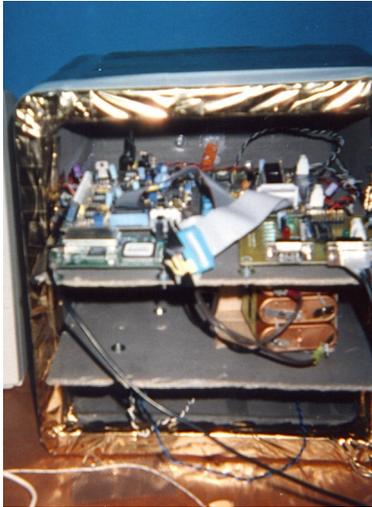
Non présents sur la photo:  
Grégory BASKEVITCH et Laëtitia NOGUE

# SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>2</b>
<b>LE CLUB .....</b>	<b>3</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>4</b>
<b>L'EQUIPE .....</b>	<b>5</b>
<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>6</b>
<b>QUELQUES PHOTOS.....</b>	<b>7</b>
<b>1 QUELQUES MOIS AVANT LE FESTIVAL... .....</b>	<b>9</b>
<b>2 ETUDE DE L'ATMOSPHERE .....</b>	<b>14</b>
2.1 LES DIFFERENTES COUCHES ATMOSPHERIQUES.....	14
2.2 VARIATION DE LA PRESSION EN FONCTION DE L'ALTITUDE.....	16
2.3 VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE L'ALTITUDE.....	18
2.4 L'HUMIDITE EN FONCTION DE L'ALTITUDE .....	20
2.5 L'ECLAIREMENT.....	22
<b>3 DONNEES THEORIQUES SUR LA MECANIQUE DU VOL .....</b>	<b>24</b>
3.1 PRINCIPE DU BALLON A HELIUM .....	24
3.2 VITESSES LIMITEES DE MONTEE ET DE DESCENTE .....	24
3.3 ALTITUDE D'ECLATEMENT DU BALLON. ....	25
<b>4 EXPLOITATION DES RESULTATS THERMODYNAMIQUES DE PEGASE .....</b>	<b>26</b>
4.1 LA PRESSION.....	26
4.3 LA TEMPERATURE .....	28
4.4 L'HUMIDITE .....	31
4.4 L'ECLAIREMENT.....	32
<b>5 EXPLOITATION DES DONNEES DYNAMIQUES DU GPS. ....</b>	<b>34</b>
5.1 DIRECTION DES VENTS .....	34
5.2 ASCENSION ET DESCENTE DU BALLON .....	35
5.3 VITESSE ASCENSIONNELLE DU BALLON.....	36
5.4 VITESSE DE DESCENTE DU BALLON.....	37
5.5 MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR .....	38
5.6 VITESSE LATERALE DES VENTS.....	39
<b>6 AUTRES COURBES.....</b>	<b>40</b>
6.1 LA MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR PAR LA LOI DES GAZ PARFAIT. ....	40
6.2 LE VOLUME DU BALLON.....	41
6.3 CELERITE DU SON .....	42

## QUELQUES PHOTOS

### L'électronique de la nacelle



Visible :

- Devant à droite : une carte de liaison RS232.
- Au fond à droite : la carte microprocesseur.
- Au fond à gauche : La carte de traitement analogique.
- Devant à gauche : le GPS.

Ce qu'on ne voit pas sur la photo :

- Les 2 alimentations à découpage.
- L'émetteur VHF.
- Le modulateur FSK.
- La carte capteur à l'extérieur de la nacelle.
- Les antennes GPS et d'émission.



Fermeture définitive de la nacelle, 30 minutes avant le lâcher du ballon.



Le camion du CNES utilisé pour la réception des télémesures. Installation du matériel 20 minutes avant de lâcher la chaîne de vol.



Gonflage de la nacelle, décompte final. Nous voyons en particulier l'enveloppe gonflée, le réflecteur radar (argenté), le parachute rouge. Chacun des membres lâchera tour à tour un élément de la chaîne de vol.



Le ballon-sonde qui s'éloigne, quelques secondes après le lâcher. On voit de haut en bas :

- L'enveloppe en latex remplie d'hélium.
- Le parachute plié « en sapin ».
- Le réflecteur radar.
- La nacelle.

# **1 QUELQUES MOIS AVANT LE FESTIVAL...**

L'été arrive, la date de lancement approche. Le club est en effervescence, la phase de conception est entièrement terminée, il ne reste plus que la réalisation. Pas facile de travailler quand on est fatigué par une journée de stage épuisante. Mais toujours un objectif : que tout soit prêt pour le Grand Jour.

Le projet ballon n'est depuis longtemps plus seulement une idée, c'est aussi un objectif de plus en plus concret. C'est l'union des compétences techniques de chacun qui nous permettra de respecter le cahier des charges.

Début juillet, une partie de la nacelle, la carte microcontrôleur et une partie du logiciel sont réalisées. Au niveau conception, le cahier de projet est terminé. Il sera envoyé à l'ANSTJ puis au CNES pour l'inscription de Pégase pour le grand festival des clubs Espace.

Le club vient d'être recréé, pas question de faire mauvaise impression, surtout devant Nicolas Verdier – ancien Président de l'ex-club – actuel directeur du Département Jeunesse du CNES. En outre, le club a pris de nombreux engagements avec Dassault Aviation, l'ESEO et l'ANSTJ.

Déjà une nouvelle date : le 24 juillet, il faut présenter à l'ANSTJ un projet quasi-terminé pour l'inscription définitive.

A quelques détails prêt les animateurs suiveurs de l'ANSTJ semblent satisfaits, mais il reste quelques phases conséquentes à réaliser : la finition, les essais, le perfectionnement des cartes prototypes, puis l'assemblage et l'homologation finale.

Pour y arriver, des soirées et des weekends sacrifiés, et même quelquefois des parents (un grand merci au passage...).

Deux semaines avant le festival, la nacelle est entièrement réalisée et ressemble à un petit satellite. On aperçoit déjà l'aboutissement du projet. Cependant quelques capteurs sont encore défectueux, et malgré tous les efforts, certaines parties de Pégase résistent.

Une semaine avant le départ, le projet est quasi-terminé. Nous avons attaché le plus grand soin à l'assemblage des différents composants. Il est en effet hors de question d'avoir des problèmes de faux-contacts, de CEM, ou de bruit.

Peu avant le départ, la nacelle est totalement terminée. Tous les capteurs répondent présents, le GPS marche à merveille. On sent alors la pression monter, et une vague pensée pour cette sacrée « loi de Murphy » nous envahit : Pourquoi une tartine beurrée tombe toujours sur la moquette toute neuve du côté tartiné ?...

Le lundi 23 août, Deux membres du club partent au festival des clubs espace, organisé à Millau dans l'Aveyron (à 750 km de leur domicile). Leur but : terminer le logiciel de réception et de traitement des données en temps réel. Cela n'a rien évident d'autant qu'ils ne disposent pas de la nacelle pour effectuer les tests.

Des clubs renommés sont présents : l'aéroEFREI, l'IFITEP, Supélec , l'ESO (ESTACA) et bien d'autres.

D'autres personnalités sont présentes : des professionnels du CNES et de l'industrie aéronautique et spatiale.

Le Mercredi 25 août arrivent deux autres membres en renfort. A bord de la voiture, une quantité de matériel dont d'autres ordinateurs et surtout le « bébé » : Pégase est délicatement posé à l'arrière de la voiture. La nacelle a une vraie allure de satellite professionnel !

On peut alors enclencher le compte à rebours : il reste quatre jours complets au maximum avant le lâcher.

Pendant ces jours intenses, il reste à effectuer les essais les plus importants : celui de la chaîne complète de télémétrie ainsi que l'homologation du ballon.

Dès lors, nous ressentons une très forte pression sur les épaules, surtout qu'un des membres devait partir samedi matin. Heureusement, les animateurs expérimentés de l'ANSTJ sont présents pour nous soutenir, et nous donner un sérieux coup de main : un grand merci à Emmanuel Jolly, Bruno, Emmanuel Laurent, Laurent Costy, Etienne Maier et à toute l'équipe ANSTJ qui a été formidable.

Vendredi soir, tous les bogues ont été corrigés, l'expérience semble au point. Mais nous avons encore envie de perfectionner nos expérimentations. Résultat : une nuit blanche entière pour deux des membres. A noter qu'on a rarement l'occasion de se concentrer autant autour d'un véritable projet d'équipe.

Samedi matin, mauvaise nouvelle : la météo ne semble pas au rendez-vous. 3 fronts orageux vont se rencontrer au niveau du plateau du Larzac, où s'effectue le lancement. Samedi midi, le club se concerta et décide d'annuler le lancement pour la journée. L'orage risque de perturber toute la télémétrie. Samedi, vers 17 heures, le club se dirige tout de même vers l'aire de lancement, avec un projet entièrement au point. Le temps est plus clément, mais un club un peu trop ambitieux (on ne le nommera pas...) a pris notre place et commence déjà à préparer sa chaîne de vol. Leur projet est annulé à la dernière minute par le CNES pour non respect du cahier des charges, mais il est trop tard pour organiser le lancement de Pégase.

Nous profitons de ce répit pour faire des tests poussés de réception avec le camion de télémétrie du CNES. Le soir, nous effectuons donc ces essais, pas entièrement probants, à cause d'un orage violent, et de sources d'émissions perturbatrices...Résultat : un stress à son maximum et un « self-control » mis à l'épreuve. Finalement, le CNES semble satisfait, et l'heure de lâcher définitive est fixée : 9 h 00, dimanche 27 août. Rendez-vous à l'aire de lancement.

Pendant la nuit, on réalise les ultimes perfectionnements. Quelques heures de plus pour un projet, après plusieurs mois... la fatigue se ressent, mais hors de question d'aller dormir avant deux heures du matin. Nous voulons vraiment réussir ce premier ballon. Tout est donc vérifié et revérifié.

Dimanche 27 août matin , après un réveil difficile (...) les membres du club, le CNES et les personnes agréées au lâcher de ballon sont présents sur l'aire de lancement.

Le public commence à arriver sur l'aire de lancement. Dans le camion de télémétrie du CNES, nous initialisons les logiciels. La nacelle émet alors des données, qui sont parfaitement reçues par le système de réception. Le suivi sur carte marche comme prévu, la précision sur le positionnement atteint 100 m...

9 h 20 , on commence à gonfler le ballon de  $10\text{m}^3$  d'hélium environ. Une quarantaine de personnes assistent au lancement, d'autres observent sur les écrans de télévision du camp la retransmission en direct des données en temps réel.

Pour le lancement, on adopte une technique de lâcher par grand vent par précaution (le vent souffle à 40 km/h environ). L'étagement est constitué de strato-cumulus et de cumulus épars selon météo France. Toutes les conditions pour un vol correct sont donc réunies.

9 h 40, le compte à rebours est lancé (30...,20...,3,2,1, décollage !!!). Tour à tour nous lâchons une partie de chaîne de vol. Le ballon monte alors majestueusement dans le ciel en s'éloignant à environ 15 km/h. Christophe cours vers le camion de télémétrie du CNES qui se trouve à une centaine de mètres, pendant que les spectateurs observent notre ballon s'élever avec majesté dans le grand bleu et blanc. Ouf ! L'expérience se déroule parfaitement, les mesures sont affichées directement sur l'ordinateur et communiquées au public sur écran TV.

Le suivi sur carte montre une direction sud-est, dans le sens de la tramontane, à 50 km/h environ. Le ballon semble suivre l'autoroute A75, en direction de Montpellier.

Un premier coup d'œil montre que les capteurs fonctionnent correctement : La pression suit les tables d'atmosphère, les autres capteurs varient correctement. L'ISO 0 donné par Météo-France correspond à nos mesures ce qui est de bonne augure pour la suite de l'ascension.

On observe alors la montée régulière du ballon, qui ne semble pas rencontrer de vents violents. Dans la stratosphère, l'humidité et la température se stabilisent, ce qui confirme la véracité physique de nos mesures. La réception reste de très bonne qualité.

Une heure après le lâcher, le ballon n'est distant que d'une vingtaine de kilomètres, et vole à une altitude de 15000 m. Dès lors une certitude : les objectifs sont atteints, l'expérience est une réussite complète. Tous les membres, les Ingénieurs du CNES, les animateurs ANSTJ sont ravis ! On n'a pas travaillé pour rien !

Deuxième certitude : le ballon n'atteindra pas la mer Méditerranée, située à 150 km du lancement. Le GPS devrait nous permettre de calculer précisément le point de chute.

10 h 02 minutes 36 secondes, soit 1 h 30 après le lâcher, le ballon explose car il a atteint 15 fois son volume initial, à une altitude de 23 km.

Le parachute s'est déployé correctement : la descente a été freinée de 140 à 40 km/h.

A 10 km d'altitude, la télémétrie s'arrête brusquement. Cette altitude est bien trop haute pour que le relief soit responsable. Dommage ! Néanmoins les objectifs fixés sont atteints, les mesures sont déjà réalisées. Après réflexion, il semble que l'antenne se soit arrachée, ou alors que les piles soient plus faibles que prévu.

Tout le monde est satisfait : 1 heure 45 de télémétrie, 1500 points de mesure enregistrés. Une dernière pensée pour le ballon qui termine sa chute dans les environs de Lodève, à 50 km au Sud du lancement. « A bientôt, peut-être ». Le seul regret est que la perte soit arrivée trop tôt pour mener une recherche réussie de la nacelle. La gendarmerie de Lodève est contactée au cas où quelqu'un rapporterait la nacelle.

L'expérience est terminée, mais il reste encore du travail : le traitement des fichiers, l'interprétation des résultats, et l'écriture d'un compte-rendu d'expérience.

Après le festival : il reste une certitude; le club s'investira dans un autre lancement pour l'an 2000 tant l'expérience a été profitable, passionnante et enrichissante pour tous les membres du club que ce soit d'un point de vue humain ou d'un point de vue technique.

Tous les membres du club Aérospatial ESEO remercient chaleureusement **l'ANSTJ, le CNES et DASSAULT AVIATION** pour nous avoir permis de mener à bien ce projet et par là même d'avoir soutenu l'activité aéronautique Française.

## 2 ETUDE DE L'ATMOSPHERE

### 2.1 LES DIFFERENTES COUCHES ATMOSPHERIQUES

Vue de l'espace, la Terre ressemble à une planète bleue constituée d'océans et de continents. Elle est entourée d'une mince couche diffuse de couleur bleutée. Cette couche n'est épaisse que de 60 à 80 km, ce qui représente seulement 1 % du rayon de la planète.

En fait, il n'existe pas à proprement parler de frontière entre l'espace et l'atmosphère.

Cette atmosphère est partagée en plusieurs couches aux caractéristiques physiques distinctes.

On partage habituellement l'atmosphère en 5 couches approximatives :

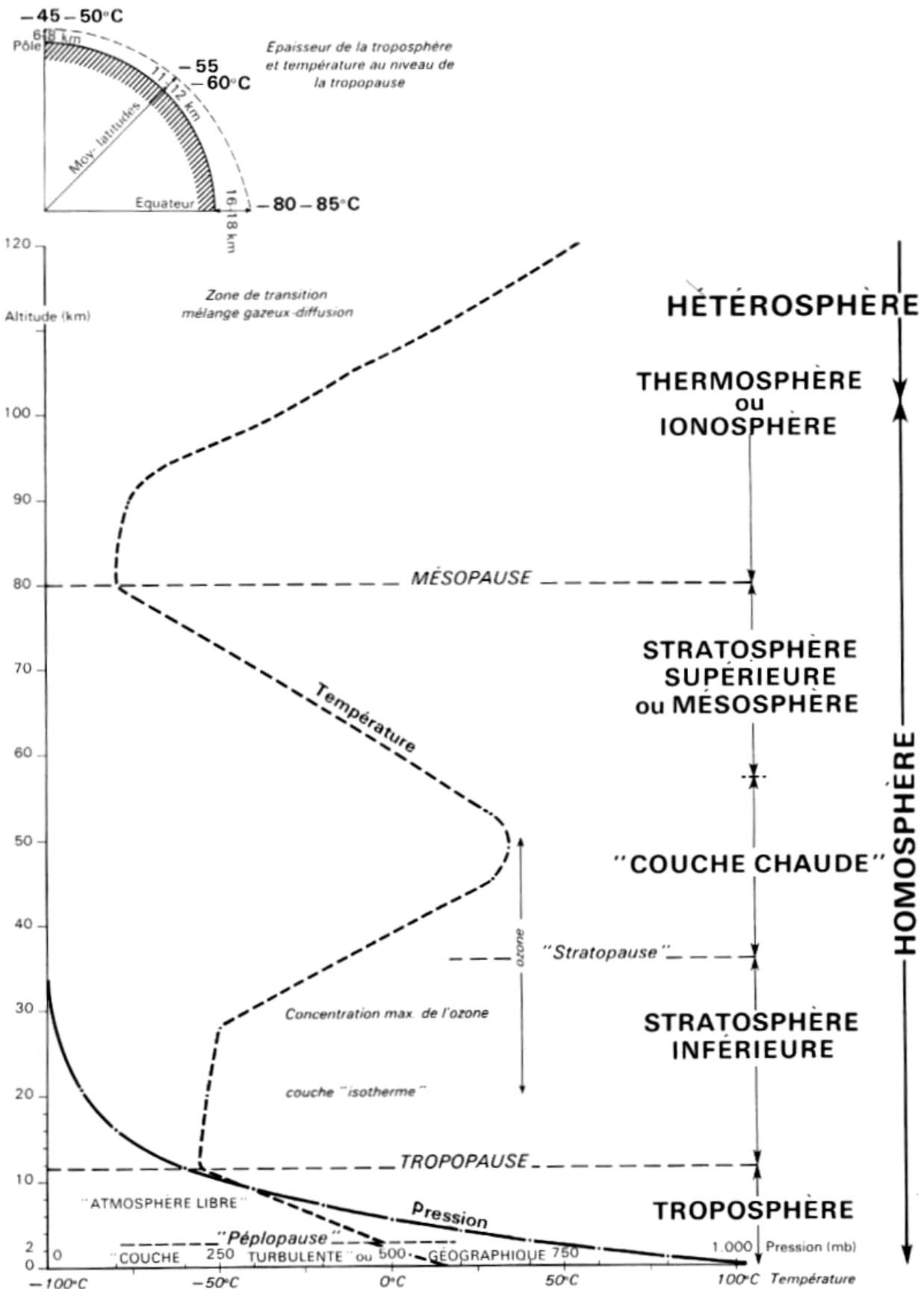
La troposphère	:	0	–	10	km
La stratosphère	:	10	–	55	km
La mésosphère	:	55	–	80	km
La thermosphère	:	80	–	400	km
L'exosphère	:	400	–	600	km

Le schéma de la page suivante donne la pression et la température de chaque couche et situe les principaux phénomènes atmosphériques sur les 100 premiers kilomètres.

On retrouve dans la troposphère la totalité de l'eau contenue dans l'atmosphère, regroupée sous forme de nuages. C'est donc dans cette couche que se forment les nuages et que naissent les précipitations. Le brassage d'air y est intense, tant dans le sens horizontal que vertical.

Au dessus, on y trouve la stratosphère, totalement dépourvue d'eau, qui est caractérisée par une température constante d'environ  $-55\text{ °C}$  quelque soit l'altitude comprise dans la partie inférieure de la couche. Le brassage de l'air y est très important, mais surtout horizontalement. On peut y retrouver des couloirs où les vents ont une vitesse de plus de 400 km/h.

Les ballons stratosphériques ont permis aux scientifiques de découvrir et d'étudier la nature de ces deux couches inférieures de l'atmosphère. Pour les couches supérieures, il a fallu avoir recours aux fusées et satellites artificiels.



Dans l'ionosphère, qui regroupe les couches supérieures de l'atmosphère, ont lieu les phénomènes d'ionisation, dans lesquels le rayonnement solaire joue un rôle prépondérant.

Un phénomène des plus connus de l'ionisation est l'aurore polaire. Une des caractéristiques les plus importantes de l'ionosphère est de réfléchir les ondes hectométriques et décimétriques, utilisées en télécommunications. ( fréquence comprise entre 100 kHz et 30 Mhz).

Cette couche supérieure n'a que peu d'intérêts pour les météorologues. En revanche, les physiciens y étudient l'interaction entre les ondes ultraviolettes et les ondes cosmiques. C'est cette couche qui nous protègent des rayons nocifs venant de l'espace.

Jusqu'à 80 km d'altitude, la composition chimique reste relativement constante. (80 % d'azote, 20 % d'oxygène). Plus haut, on mesure moins de gaz lourds ( $O_2, N_2$ ) mais plus d'hélium, d'hydrogène et d'argon.

## 2.2 VARIATION DE LA PRESSION EN FONCTION DE L'ALTITUDE

La quantité d'air dans l'atmosphère, soumise à la gravité, exerce une pression sur la surface terrestre. Au fur et mesure qu'on monte dans l'atmosphère, la pression diminue. Cette variation est calculée à l'aide de modèles thermodynamiques liés aux caractéristiques de la troposphère (quasi-adiabatique) et de la stratosphère (quasi-isotherme).

On peut donc calculer la pression en utilisant les deux formules :

$$P = P_0 \left( 1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{M \cdot g_0}{R \cdot T_0} \cdot h \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \text{ entre 0 et 11 km.}$$

Avec :

- P : Pression absolue à l'altitude h (Pa).
- P<sub>0</sub> : Pression absolue au sol (Pa).
- γ : Rapport des capacités calorifiques à pression et volume constant de l'air.
- M : Masse molaire de l'air (28.84 g/mol).
- g<sub>0</sub> : Accélération de la pesanteur au niveau du sol (9.81 m/s<sup>2</sup>).
- R : Constante des gaz parfait (8.31 J/K).
- T<sub>0</sub> : température au sol (K).
- H : altitude.

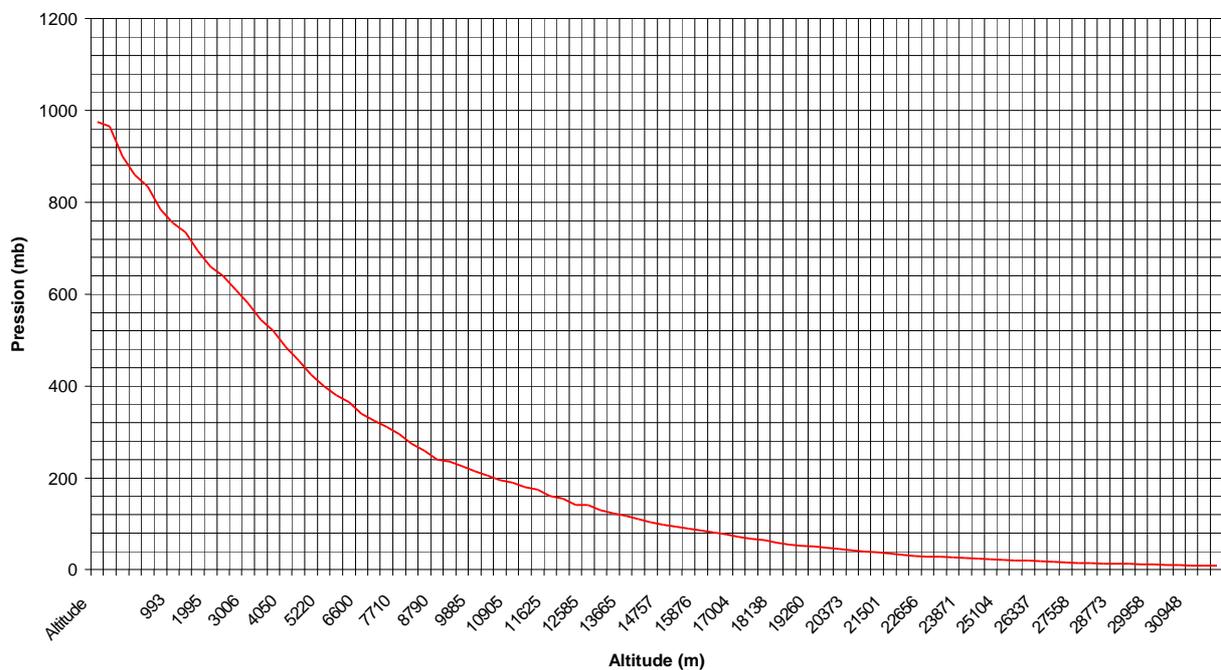
Entre 11000 m et 40000 m – stratosphère inférieure – la pression répond plutôt à la formule

$$\text{suivante : } P = P_{11km} \exp\left(-\frac{Mg0}{RT_{11km}}(h - 11km)\right)$$

Avec une température à 11 km d'environ  $-55^{\circ}\text{C}$ .

Dans les basses couches la pression diminue rapidement, puis cette diminution ralentit progressivement, au fur et à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère.

Pression en fonction de l'altitude



La pression suit la courbe ci-dessus. Cette courbe a été réalisée à l'aide de mesures effectuées par ballon sonde.

A 9000 m d'altitude, la pression est d'environ 35 % de la pression au sol. Ce qui implique qu'un avion croisant à cette altitude aura 65 % d'atmosphère en dessous de lui.

A 40 km d'altitude, la pression est d'environ 3% de la pression au sol; 97% de l'air est donc situé en dessous.

A 6000 m, la pression n'est plus que de 40 %, ce qui implique qu'à volume égal, l'organisme n'absorbe plus que 40 % de l'oxygène au sol.

On n'admet qu'à partir de 6 km d'altitude, l'homme doit être assisté d'un masque à oxygène.

A 13 km, l'homme doit nécessairement habiter dans une cabine pressurisé. A 19 km, le sang se met à bouillir car la pression n'y est plus que de 10 %.

## 2.3 VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE L'ALTITUDE.

La température varie très irrégulièrement en fonction de l'altitude. C'est par cette variation que l'on définit les différentes couches de l'atmosphère.

A chaque changement de la variation de température, on définit une nouvelle couche.

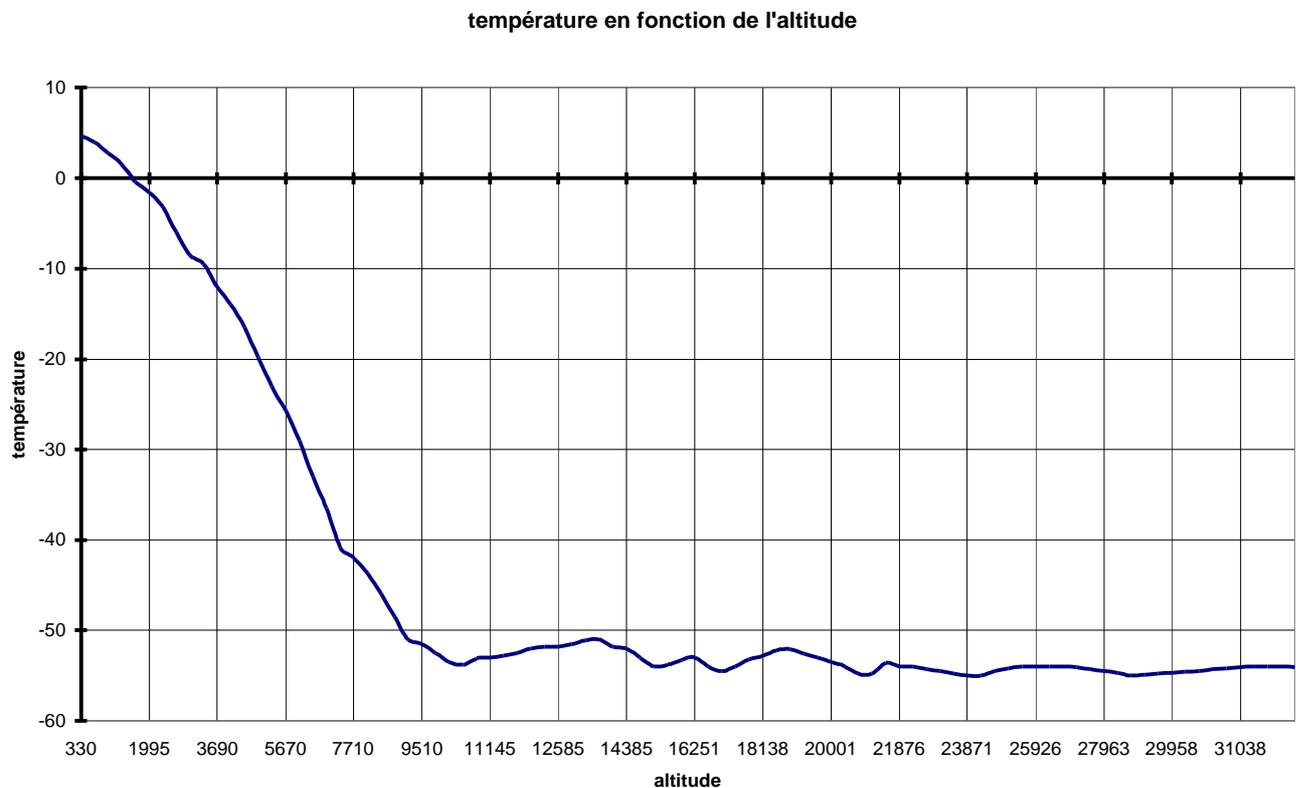
On observe ainsi un changement de variation entre la troposphère et la stratosphère à 11 km d'altitude, à notre latitude. La limite s'appelle la tropopause.

En fait cette température varie en fonction de l'absorption des rayonnements solaires. Les hautes couches sont très chaudes, puisqu'elles bloquent les rayonnements cosmiques et rayons X. On y enregistre des températures de 2200°C !

L'absorption des ondes ultraviolettes par la stratosphère fait que la température y est quasi-constante, légèrement croissante. En dessous, la température suit une loi thermodynamique connue, qui découle du caractère adiabatique de cette couche. Les nuages cependant, qui créent un effet de serre, font varier cette température.

La variation de la température dans la troposphère peut être approchée par une perte de  $6^{\circ}\text{C}$  tous les 1000m.

Jusqu'à 40 km, la température suit la courbe ci-dessous :



Ces courbes sont les résultats d'une expérience réalisée par un ballon sonde. La courbe montre l'évolution de la température extérieure. On remarque une décroissance rapide jusqu'à la stratosphère où la température est relativement constante.

Le niveau délimitant le changement de variation s'appelle la tropopause, où il y a des courants d'air très rapides. Certains peuvent atteindre 200 km/h. Son altitude dépend des conditions thermiques au sol ainsi que de la météorologie. Alors que la tropopause est d'environ 8 km aux pôles, elle peut atteindre 18 km à l'équateur. Les anticyclones font remonter cette couche, alors qu'elle descend en présence de dépressions. La température varie de  $-75^{\circ}\text{C}$  à l'équateur à  $-50^{\circ}\text{C}$  aux pôles.

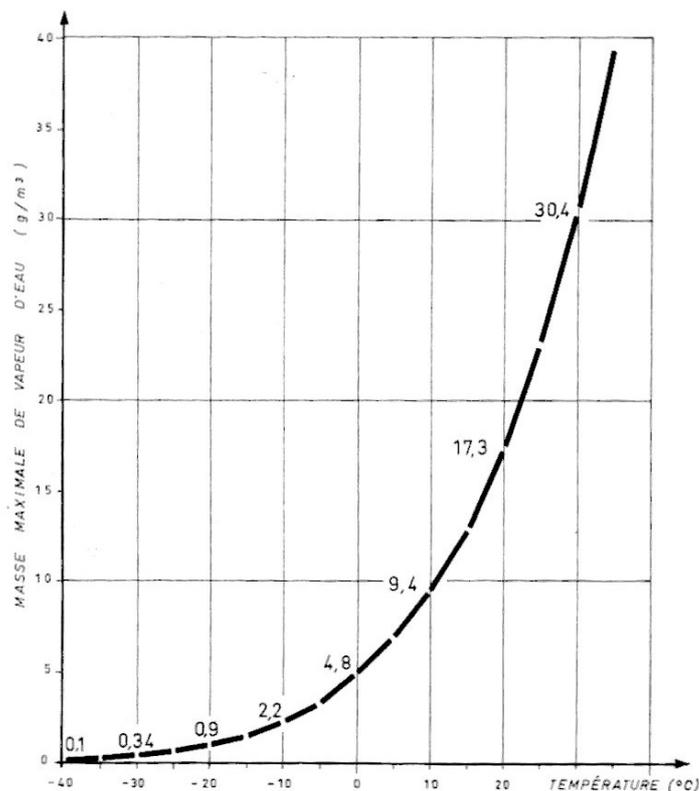
## 2.4 L'HUMIDITE EN FONCTION DE L'ALTITUDE

Dans la troposphère, l'air n'est jamais sec et contient toujours une part plus ou moins importante d'eau à l'état de gaz, de liquide (micro - gouttelettes) ou de glace.

Cette quantité en eau dépend de la température, de la pression et de l'humidité de l'air ambiant. Avant d'exposer l'humidité dans l'air, rappelons d'abord deux définitions :

**L'humidité absolue** : C'est la masse d'eau contenue dans une unité de volume d'air. Pour un volume donné, l'humidité absolue ne peut croître indéfiniment. Elle ne peut dépasser une certaine valeur maximum appelée tension critique. A partir de ce seuil, l'eau passe à l'état liquide, la vapeur d'eau se condense sous forme de fines gouttelettes.

La valeur critique dépend de la température. Elle est plus faible pour l'air froid que pour l'air chaud. La quantité d'eau que peut supporter l'air varie dans un rapport de 30.



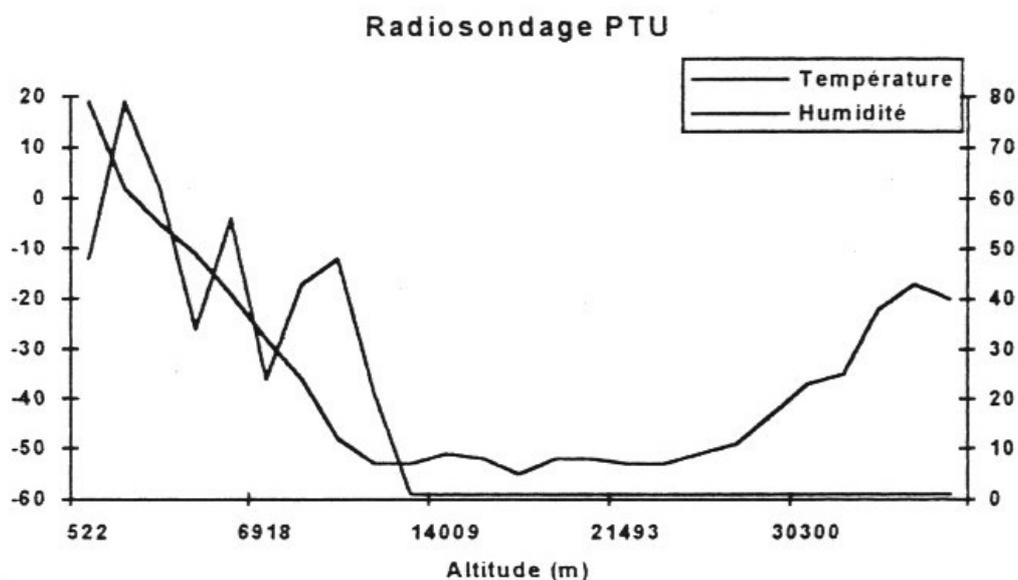
La figure précédente montre la variation de masse d'eau dans l'air en fonction de la température. On remarque l'absence d'eau aux basses températures.

**L'humidité relative.** Cette mesure situe l'humidité ambiante par rapport à l'humidité maximale avant condensation (point de rosée).

Si l'humidité relative tend vers 100 %, on peut matérialiser l'environnement par une couche nuageuse et par un temps pluvieux.

Si l'air froid ne peut supporter une quantité importante d'eau, on comprend que l'humidité va décroître rapidement avec l'altitude. En fait l'humidité est relativement faible au dessus de 8000 m pour disparaître totalement dans la stratosphère, où on note donc l'absence totale de nuages. Dans la troposphère, sa variation dépend des couches nuageuses.

Une radiosonde nous donne une forme classique de la variation de l'humidité en fonction de l'altitude :



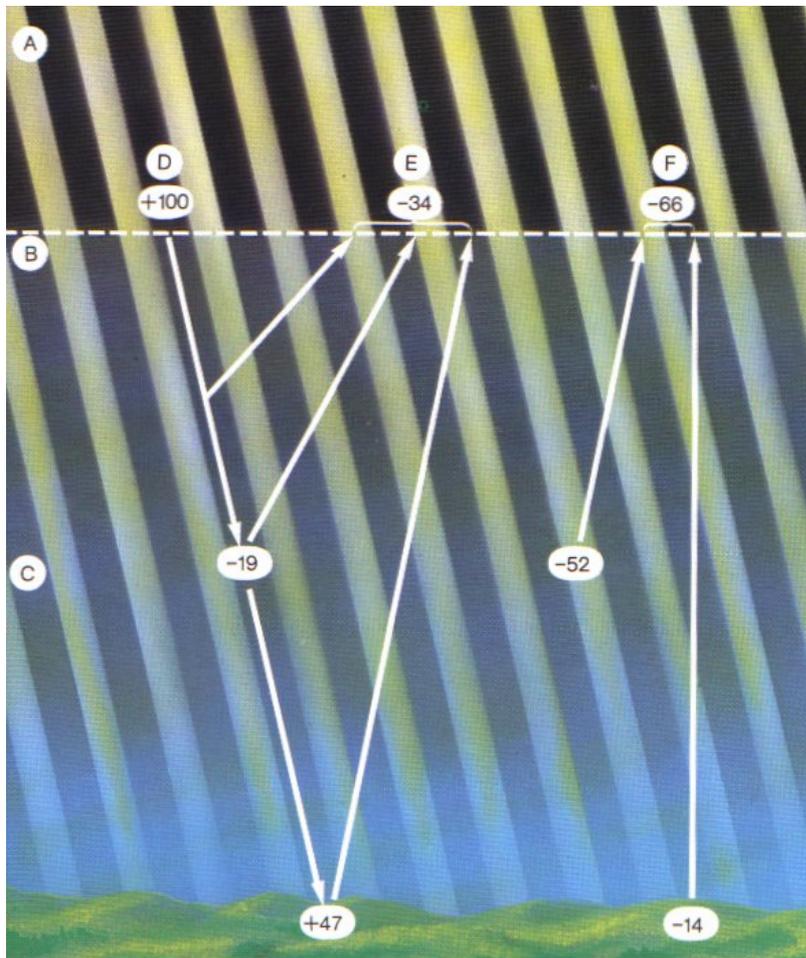
On observe sur cette courbe une variation irrégulière dans la troposphère, due à la présence de nuages, de basses, moyennes et hautes altitudes. A partir de la stratosphère, l'humidité est nulle. De telles courbes permettent de déduire les types de nuages présents dans l'atmosphère, et donc d'avoir une idée du temps.

## 2.5 L'ECLAIREMENT

Imaginons que nous soyons dans un avion, nous remarquerions que l'atmosphère semble de plus en plus sombre au fur et à mesure que l'on monte dans l'atmosphère. Ceci est dû à une présence d'air de plus en plus faible, donc de molécules qui dispersent la lumière qu'elles reçoivent.

Si on mesure la luminosité de l'ombre, celle-ci diminue progressivement avec l'altitude.

En revanche, si le capteur est mis au soleil, la lumière qu'il reçoit est de plus en forte. L'éclaircissement mesuré est alors très important.



L'image ci-contre montre un bilan de rayonnement dans l'atmosphère terrestre.

### Légende :

- A : stratosphère.
- B : tropopause.
- C : troposphère.
- D : rayonnement global.
- E : pertes par absorption.
- F : rayonnement en retour.

Sur le rayonnement global atteignant la tropopause, 34 % sont dispersés et réfléchis, 19 % sont absorbés par la vapeur d'eau et le gaz carbonique, 47 % seulement arrive sur la surface terrestre. Si on compte les infrarouges, 33 % du rayonnement atteignent le sol. Cette énergie

est finalement réfléchi vers l'atmosphère . Ces radiations seront donc captées par un capteur de température placé à l'ombre.

On doit donc pouvoir observer une forte diminution de l'éclairement à la limite de la troposphère et la stratosphère.

## 3 DONNEES THEORIQUES SUR LA MECANIQUE DU VOL

### 3.1 PRINCIPE DU BALLON A HELIUM

Le ballon est soumis à trois forces :

- Son poids, orienté vers le bas.
- La poussée d'Archimède, qui pousse le ballon vers le haut.
- Le frottement, qui n'apparaît qu'en cas de déplacement.

La poussée d'Archimède est égale au poids du fluide déplacé. L'hélium étant plus léger que l'air, la masse de volume déplacé est supérieure au poids du ballon entier. Globalement, les forces entraînent donc le ballon vers le haut.

### 3.2 VITESSES LIMITES DE MONTEE ET DE DESCENTE

Globalement la montée est calculée par l'équation différentielle suivante :

$$\left(\frac{rv}{M} - 1\right)g - \frac{rC_x S}{2M}v^2 = \frac{dv}{dt}$$

$\rho$  : densité volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  : vitesse du ballon (m/s)

$C_x$  : coefficient aérodynamique de la chaîne de vol

$S$  : surface en coupe perpendiculaire du ballon (m<sup>2</sup>)

$M$  : masse de la nacelle

A partir de cette formule, on peut obtenir la vitesse de montée. Par une simplification (poussée d'Archimède nulle), on peut aussi calculer la vitesse de descente.

En utilisant ces formules dans le sens inverse, on peut obtenir la densité volumique de l'air.

La vitesse limite de montée vaut

$$V_{lm} = \sqrt{\frac{2(\mathbf{r}.V - M)}{Cx.S.\mathbf{r}}}$$

La vitesse de descente vaut :

$$V_{ld} = \sqrt{\frac{2M.g0}{S.Cx.\mathbf{r}}}$$

### 3.3 ALTITUDE D'ÉCLATEMENT DU BALLON.

Le fabricant donne le volume d'éclatement du ballon. Or nous connaissons le volume au lancement respectant le cahier des charges d'un lancement réussi ( montée à 5.5 m/s jusqu'à 20 km). Nous connaissons aussi la pression extérieure. On peut donc calculer l'altitude d'éclatement de notre ballon.

Pour un ballon de type 1200 g, le volume approximatif à l'éclatement vaut environ 350 m<sup>3</sup>.

Le ballon est gonflé pour avoir une vitesse de montée d'environ 5 m/s. Le poids de la chaîne de vol vaut environ 4 kg.

Le ballon devra avoir un volume approximatif de 10 m<sup>3</sup> au lâcher pour respecter les conditions de sécurité.

Ceci laisse prévoir une altitude d'éclatement d'environ **25 km**. En effet le ballon peut augmenter son volume d'un rapport 20 environ . Par la loi thermodynamique des gaz parfait, il est facile de calculer son altitude d'éclatement.

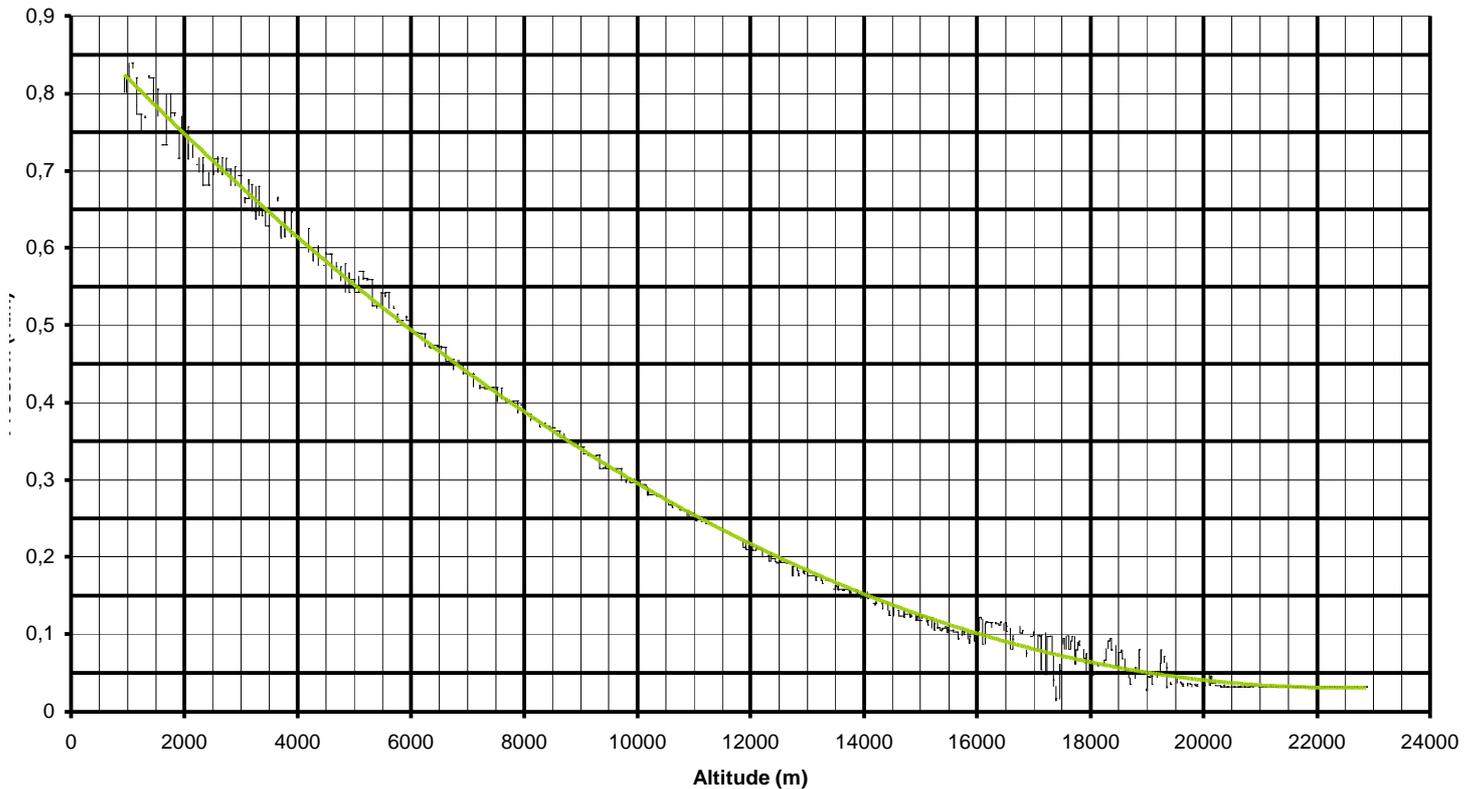
## 4 EXPLOITATION DES RESULTATS THERMODYNAMIQUES DE PEGASE

N.B. : Toutes les exploitations ont été effectuées par le club et sont donc relatives et sujettes à caution.

Globalement, les conclusions ont été confirmées par des livres de météorologie et de climatologie.

### 4.1 LA PRESSION

PRESSION EN FONCTION DE L'ALTITUDE



La courbe ci-dessus représente les mesures rapportées par Pégase. Les mesures réelles ont été corrigées par une approximation polynomiale afin de lisser la courbe.

La pression mesurée est à 5% près celle donnée par une table d'atmosphère standard.

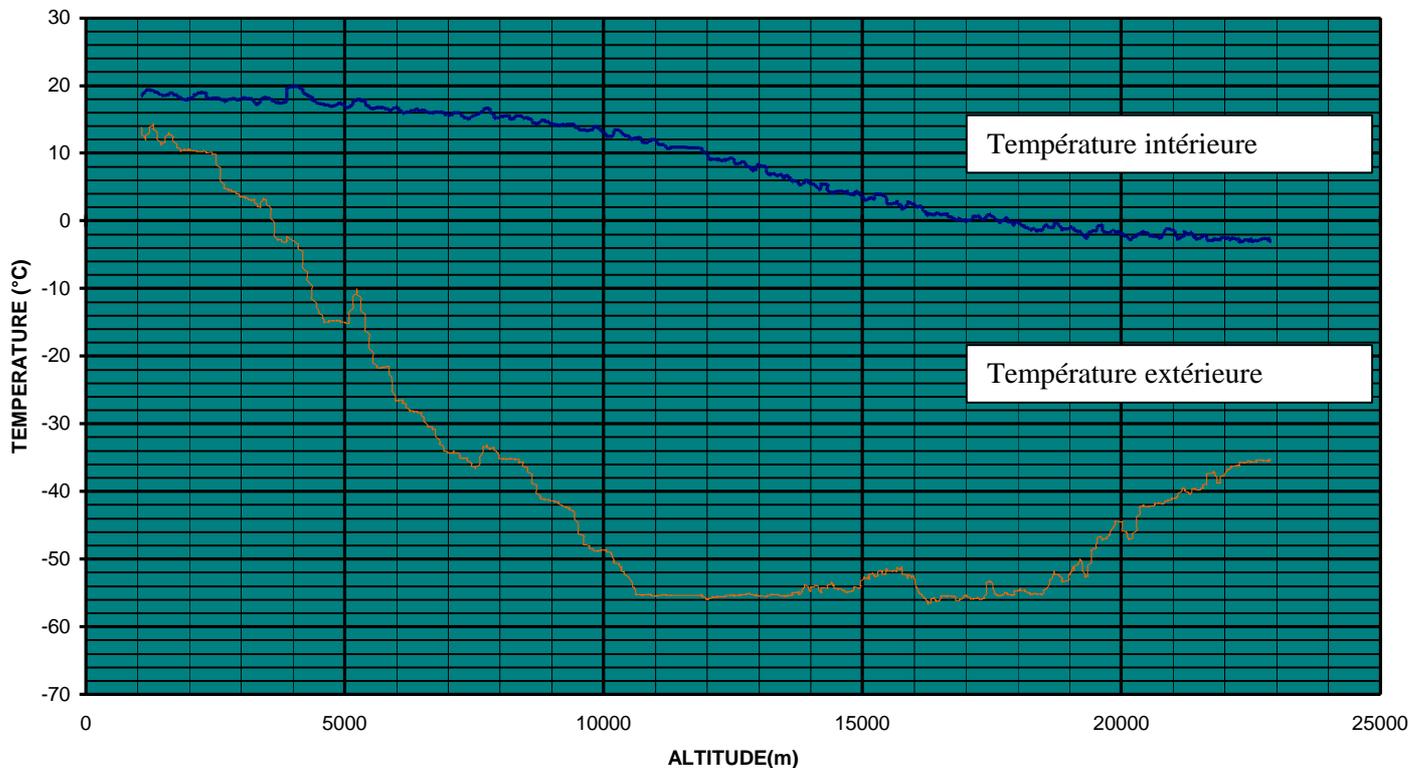
La première partie de la courbe montre une diminution proportionnelle à l'altitude. Plus l'altitude augmente, plus la courbe se transforme en une hyperbole. A 4500m, la pression n'est plus que de moitié, tandis qu'elle est inférieure à 5 % de celle du niveau de la mer à partir de 19000 m. La diminution est ensuite beaucoup plus lente jusqu'à 23 km.

On remarque bien que la diminution est presque linéaire dans la troposphère alors qu'elle est exponentielle dans la stratosphère. Cela montre qu'il existe deux environnements aux caractéristiques thermodynamiques bien différentes.

La courbe montre bien l'avantage que possède le ballon sur l'avion : Il peut voler à très haute altitude, dans une atmosphère à très faible pression. Les avions les plus performants montent à une altitude de 18 km maximum, alors que les ballons peuvent atteindre 50 km d'altitude.

## 4.2 LA TEMPERATURE

### TEMPERATURE EN FONCTION DE L'ALTITUDE



La courbe bleue du haut montre la température à l'intérieur de la nacelle, tandis que l'orange, en bas, représente celle de l'atmosphère ambiante.

On remarque que la variation de la température interne est relativement faible. Cela est dû à un isolement très soigné de la nacelle. Elle était en effet réalisée en polystyrène extrudé peint, recouvert à l'extérieur par une couverture de survie, et tapissée à l'intérieur par du carton de protection. De plus, les composants électroniques ont été regroupés en petits compartiments compacts afin de concentrer la chaleur dégagée. La température diminue progressivement avec l'altitude et ce, avec un retard par rapport à la température extérieure qui correspond au refroidissement progressif des parois de la nacelle.

La courbe de température est relativement bonne puisque Météo France prévoyait 0°C à 4100 m (cf. TEMSI) alors que nous l'avons mesuré à 3800m. Cela est probablement dû au fait que l'isotherme 0°C varie légèrement d'un lieu à un autre.

La température extérieure diminue linéairement avec l'altitude, pour se stabiliser vers 10500 mètres, niveau de la tropopause. Aux basses altitudes, la chute constatée d'environ 7 °C tous les 1000 m ce qui montre un taux de décroissance suivant un gradient « moyen » entre la décroissance « adiabatique humide, et « adiabatique sèche ».

La connaissance des courbes de température et de pression permet de connaître les caractéristiques des vents et de la thermodynamique de l'atmosphère.

En effet, l'air soumis à un mouvement ascendant subit une pression moindre, se détend et par conséquent se refroidit. Inversement, un mouvement descendant comprime l'air et chauffe sa température. De plus, si les mouvements d'air sont rapides, les échanges de chaleur entre les couches d'air sont faibles, et la pression suit une loi adiabatique.

Ainsi, une chute de 10°C par km montre que l'air est humide, alors qu'une chute de 5°C montre qu'il est sec.

Cependant, nos courbes ne sont pas assez précises pour étudier précisément les mouvements des vents. Les mesures effectuées par le GPS nous permettront d'en dire plus par la suite.

Ce qui est intéressant dans la courbe de température est de remarquer les remontées de températures à 4000, plus marquées à 5200 et 6500 m. Elles correspondent à des remontées d'humidité, et certainement à la présence plus prononcée de nuages. On remarque aussi des chutes de l'éclairement, bien que cette valeur soit moins révélatrice.

Les mesures nous permettent, à priori de penser à la présence de plusieurs couches de nuages.

La deuxième partie de la courbe montre une rupture très nette, par l'affichage d'une température constante de -55°C.

L'altitude de 11 km place la couche limite tout à fait dans la moyenne d'un jour classique des climats tempérés. Cette limite, aux latitudes de l'Europe est caractérisée par une température quasiment constante de -50 à -60°C.

Les mesures montrent bien le caractère isotherme de la couche stratosphérique, au dessus de 11000 mètres.

Cette stabilité est due à une absorption des rayonnements ultraviolets et visibles, qui est encore plus forte à haute altitude, ce qui entraîne une augmentation de la température jusqu'à

0°C à 50 km. Ceci explique partiellement la remontée de la courbe au-dessus de 16000 mètres.

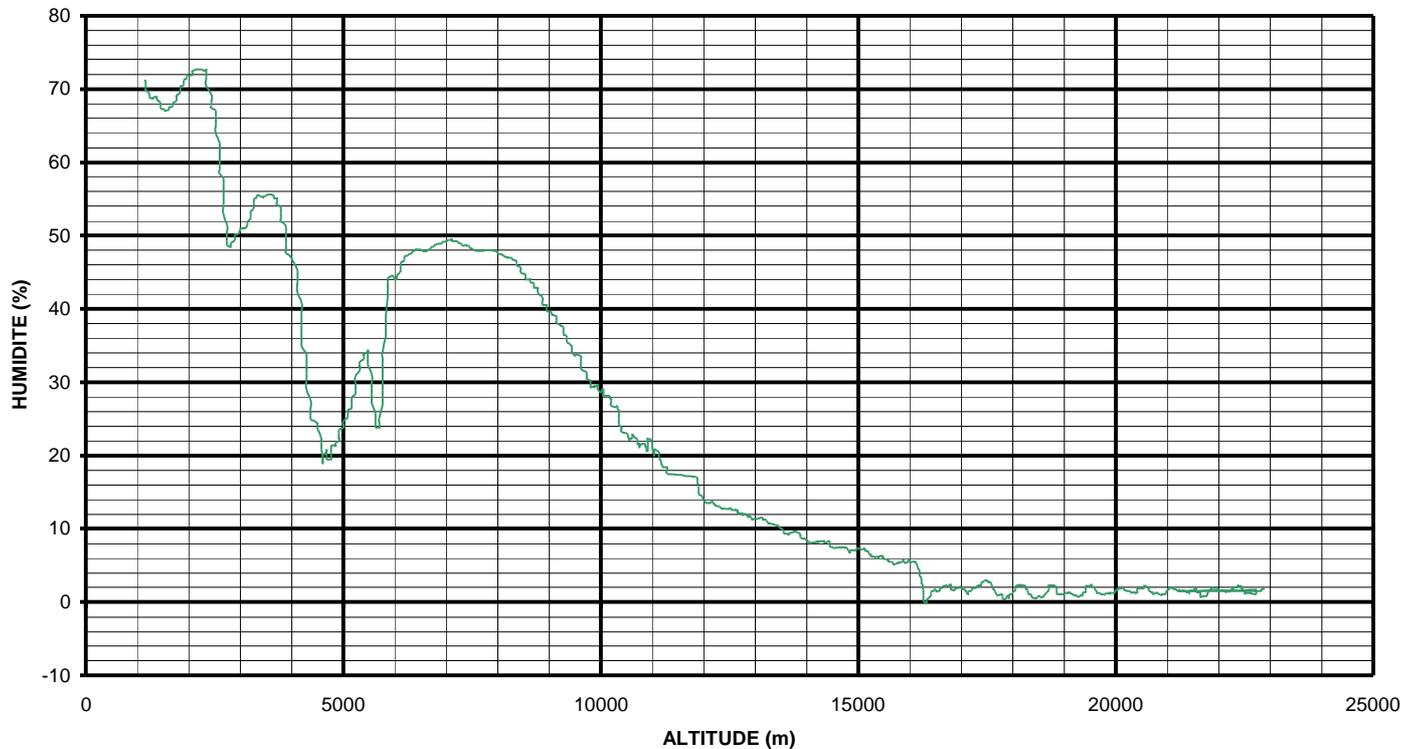
Cependant nos mesures amplifient cette pente, à cause de plusieurs raisons.

Le polystyrène rayonne l'énergie emmagasinée au sol. De plus, l'air raréfié provoque une prépondérance de l'effet d'auto-échauffement du capteur de température. Enfin l'effet Joule n'est pas négligeable (1mA passe dans le capteur). A la place de  $-35^{\circ}\text{C}$  à 23000m, nous devrions plutôt mesurer  $-45^{\circ}\text{C}$  environ. Il est en fait très difficile d'effectuer une bonne mesure de température à haute altitude, où la densité d'air est très faible. La température révèle alors plus la vitesse des particules que le sentiment de « chaleur ».

Les mesures de températures sont donc globalement très correctes.

### 4.3 L'HUMIDITE

HUMIDITE RELATIVE EN FONCTION DE L'ALTITUDE



L'explication des variations de l'humidité est difficile, d'autant que la documentation sur ce sujet est difficile à trouver. Cette courbe, valide à 20 % près, permet cependant de tirer quelques conclusions.

On observe tout d'abord une chute de l'humidité due au refroidissement de l'atmosphère. L'air froid ne peut contenir en effet autant de vapeur d'eau que l'air chaud. Globalement, l'humidité diminue pour disparaître vers 15000 m. Cette variation est tout à fait conforme à celle prévue avant le vol.

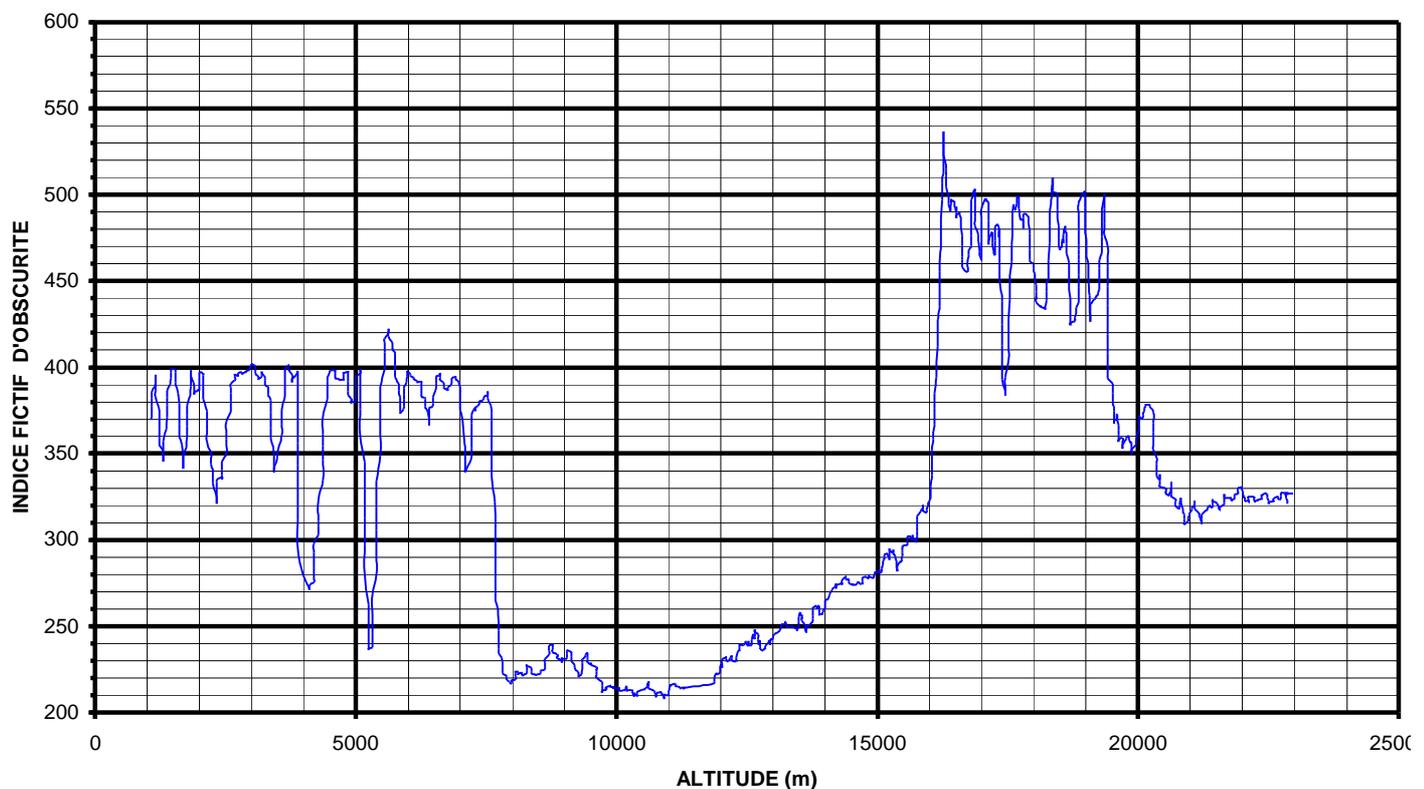
Autour de cette variation générale, on observe des pics et des creux d'humidité. Les pics peuvent s'expliquer par la présence de nuages. On montre bien la cohérence de cette courbe avec celle de la température, par la similitude des pics d'humidité et de température.

La courbe montre aussi qu'il existe une partie de l'atmosphère où l'humidité est forte (6000-10000m). Dans cette couche la température est en moyenne plus forte que la normale.

Sans montrer l'existence de nuages, ces mesures révèlent la présence d'une couche humide, qui trahissent souvent l'humidité à basse altitude. C'est pourquoi les avions à réaction laissent une traînée lorsqu'ils circulent dans ces couches.

#### 4.4 L'ECLAIREMENT

**ECLAIREMENT EN FONCTION DE L'ALTITUDE**



De toutes nos mesures réalisées et ce, bien que le capteur soit très fiable, l'éclaircissement est certainement la plus difficile à interpréter. Les variations sont aussi bien dues aux nuages qu'à la rotation de la nacelle ou à la dispersion et absorption théorique.

Il faut tout d'abord signaler que la courbe montre un indice tout à fait fictif d'obscurité. Nous ne disposons en effet d'aucun moyen d'étalonnage propre à nous donner une valeur quantifiée.

On peut cependant en tirer quelques conclusions. Les brusques chutes sont dues à un déchirement des nuages ou à l'apparition d'un rayon solaire directe sur la nacelle. Les pics sont donc de plus en plus prononcés, car il y a de moins en moins de nuages au dessus du ballon. Au dessus de 8000 m, il n'y a plus aucun nuage, et le soleil tape directement sur la nacelle. On observe ensuite une stabilité.

L'entrée dans la stratosphère entraîne le changement brusque du comportement du capteur. La luminosité est de plus en plus faible, comme prévue théoriquement. La variation d'un indice 200 à un indice 300 montre une variation très sensible de la luminosité.

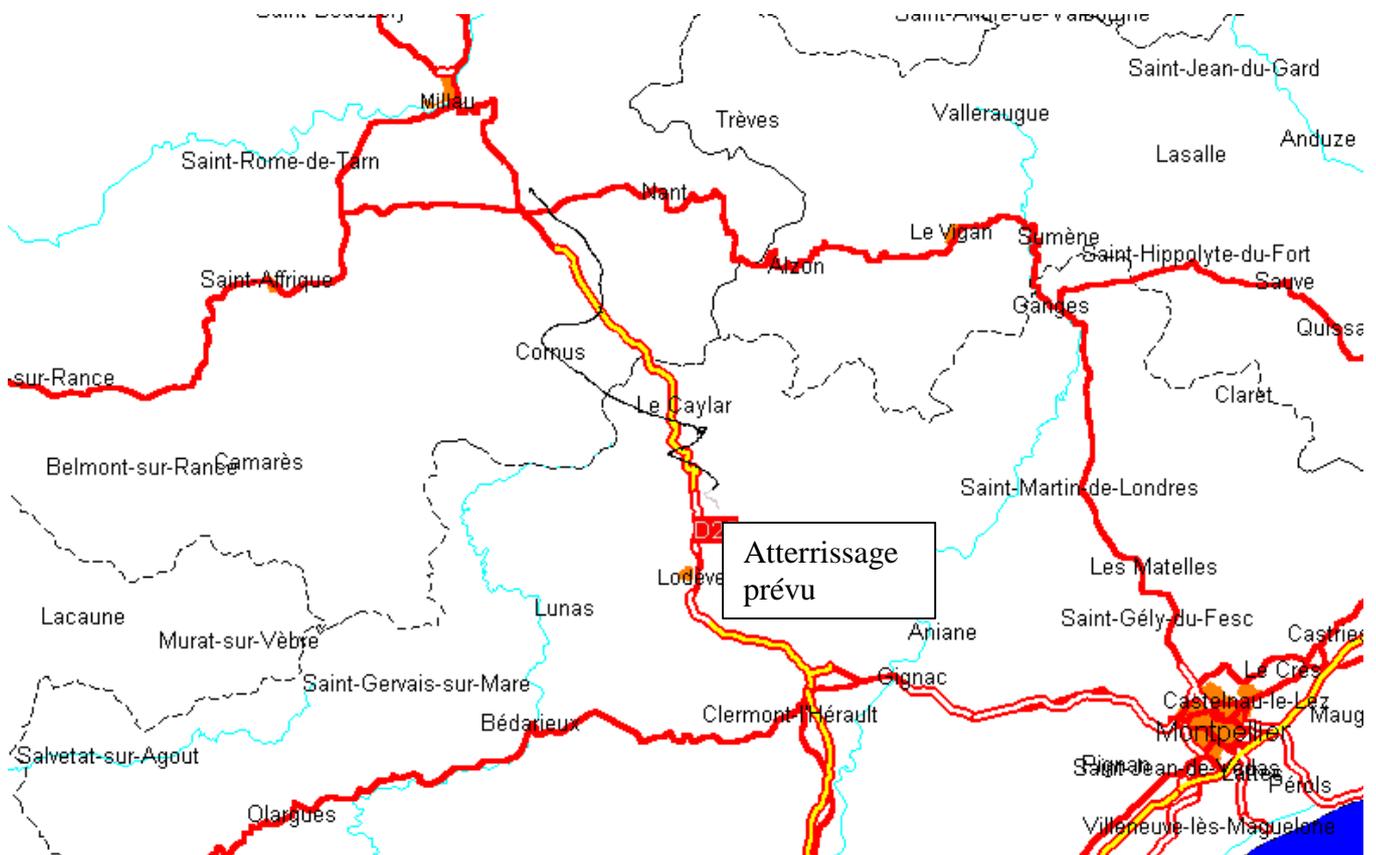
A 16000 m, on observe une brusque baisse de la luminosité qui est inexplicable par la dispersion ou l'absorption. La nacelle a sans aucun doute changé d'orientation vis à vis du soleil. A 21000 m, la nacelle change à nouveau d'orientation et l'éclairement augmente. Remarquons alors que la courbe est continue avec celle observée entre 10000 et 15000 m.

En résumé, cette dernière expérience n'est pas forcément concluante. On peut cependant retenir une baisse générale de l'éclairement dans la stratosphère, et un passage au dessus des nuages vers 8000 m.

## 5 EXPLOITATION DES DONNEES DYNAMIQUES DU GPS.

### 5.1 DIRECTION DES VENTS

Le GPS nous a permis de suivre le ballon sur une carte routière, et ainsi d'en déduire l'orientation des vents. Voici ci-dessous la trajectoire du ballon sur une carte simplifiée :



En gris clair, la trajectoire prévue pour la descente après la perte de contact.

On voit que la trajectoire a suivi principalement la direction de la tramontane, qui était relativement faible. Dans la tropopause, le ballon a rencontré des vents d'est qui l'ont poussé vers Cornus. Ensuite, dans la stratosphère, le ballon a retrouvé des vents de Nord-Ouest qui l'ont poussé vers l'Hérault.

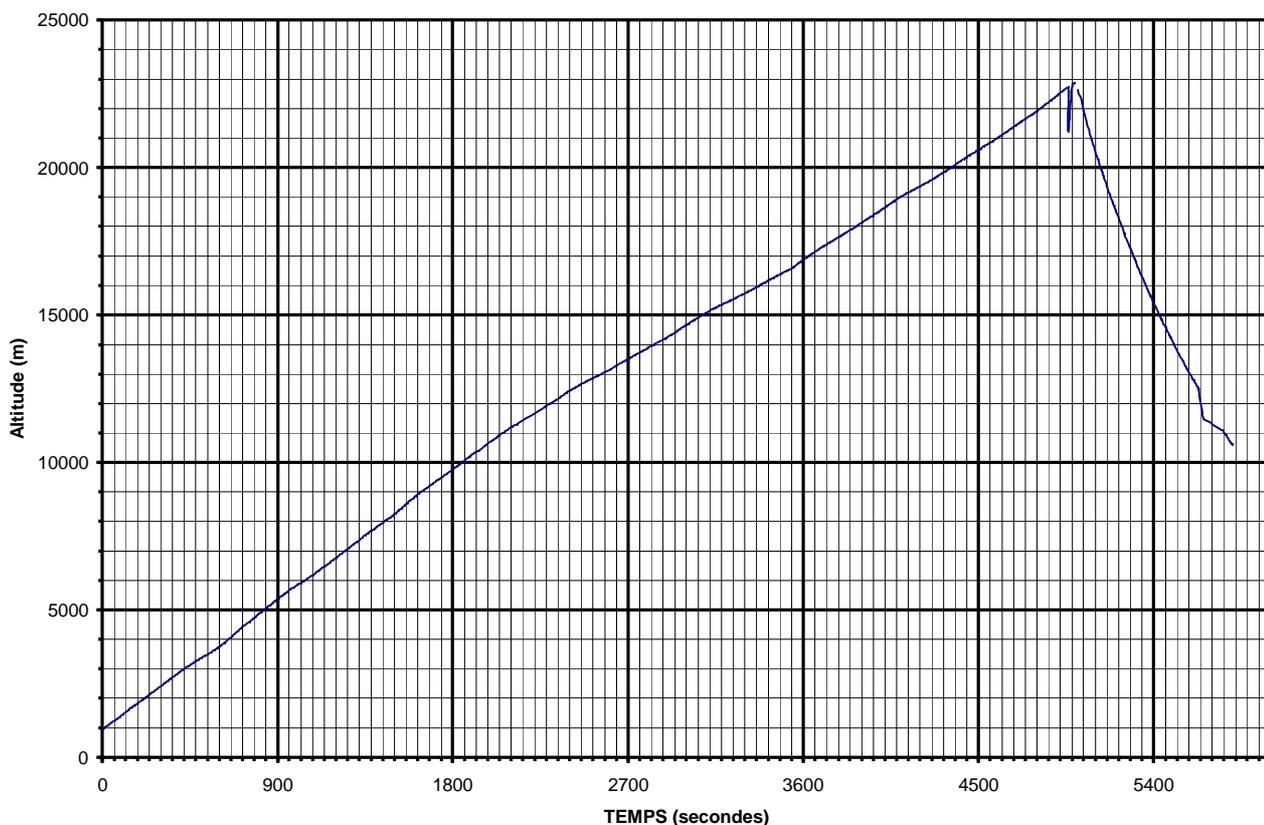
En haute altitude, le ballon rencontre différents couloirs, qui le font changer de direction, en faisant une boucle, puis en dessinant un « zig-zag ». A l'éclatement, le ballon retrouve les

vents rencontrés lors de la montée. La perte de la télémessure à 10 km d'altitude ne nous a pas permis de connaître le lieu d'atterrissage avec précision.

En moyenne, les vents ont été modérés, mais de force irrégulière. Le ballon s'est donc éloigné de 30 km seulement ce qui est relativement peu (200 km est plus courant).

## 5.2 ASCENSION ET DESCENTE DU BALLON.

EVOLUTION DE L'ALTITUDE EN FONCTION DU TEMPS



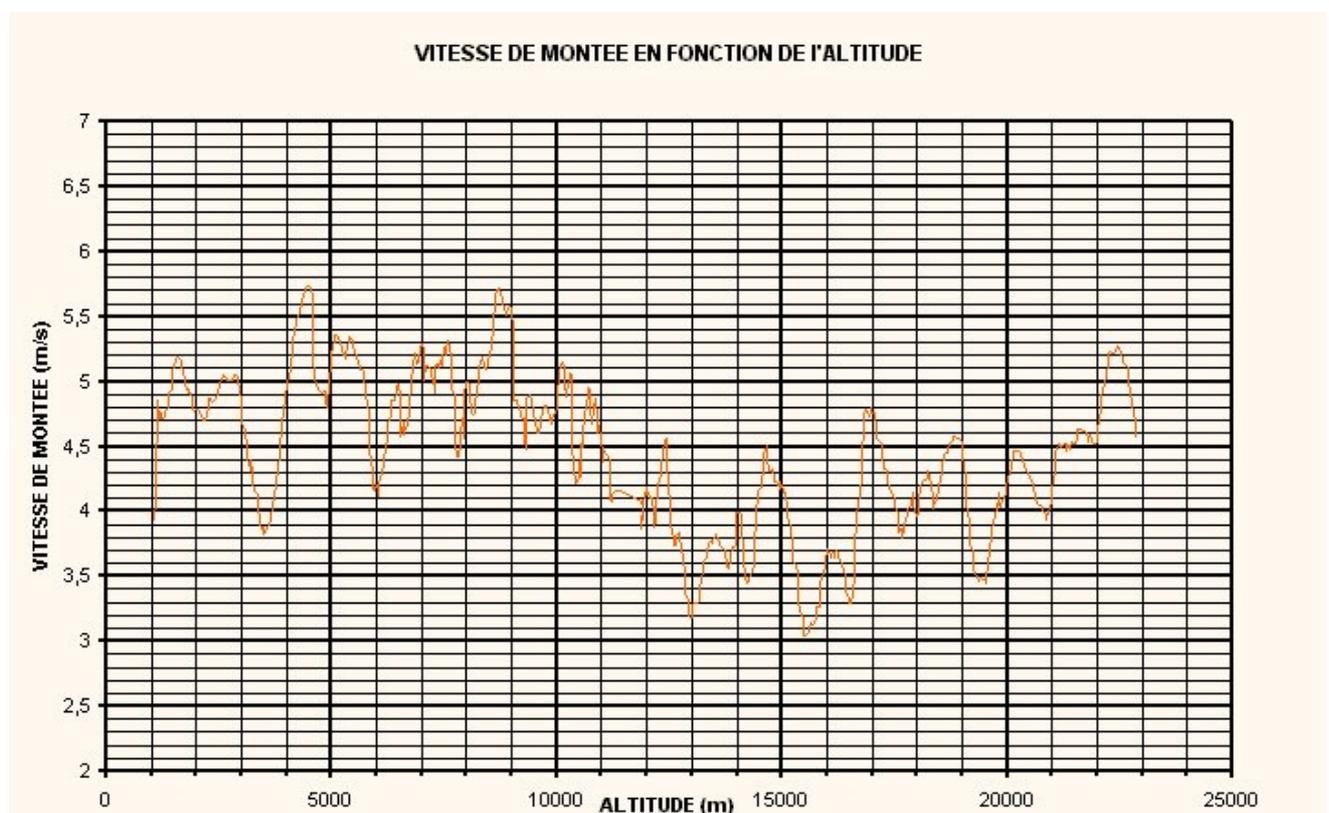
On remarque que la montée est régulière jusqu'à éclatement à 23 km d'altitude. La montée a duré 82 minutes, soit une vitesse moyenne de 17 km/h. On remarque cependant un léger changement de vitesse lors du passage dans la stratosphère, vers 11 km. En effet, dans la troposphère, la vitesse mesurée est de 20 km/h, alors qu'elle n'est plus que de 14 km/h dans la stratosphère. Cette baisse de vitesse n'est pas prévue par un modèle théorique simple. Au contraire, la vitesse, en théorie, devrait augmenter jusqu'à 30 km/h environ. Cette différence entre théorie et expérience peut être due aux vents ascendants, différents dans la stratosphère.

Le ballon éclate à 23 km pour retomber avec une vitesse qui varie de façon exponentielle, qui nous permettra de calculer la masse volumique de l'air.

On peut estimer à 20 minutes le temps de télémétrie manquant avant l'atterrissage.

### 5.3 VITESSE ASCENSIONNELLE DU BALLON

La vitesse ascensionnelle, relevée par le GPS, suit la courbe suivante :

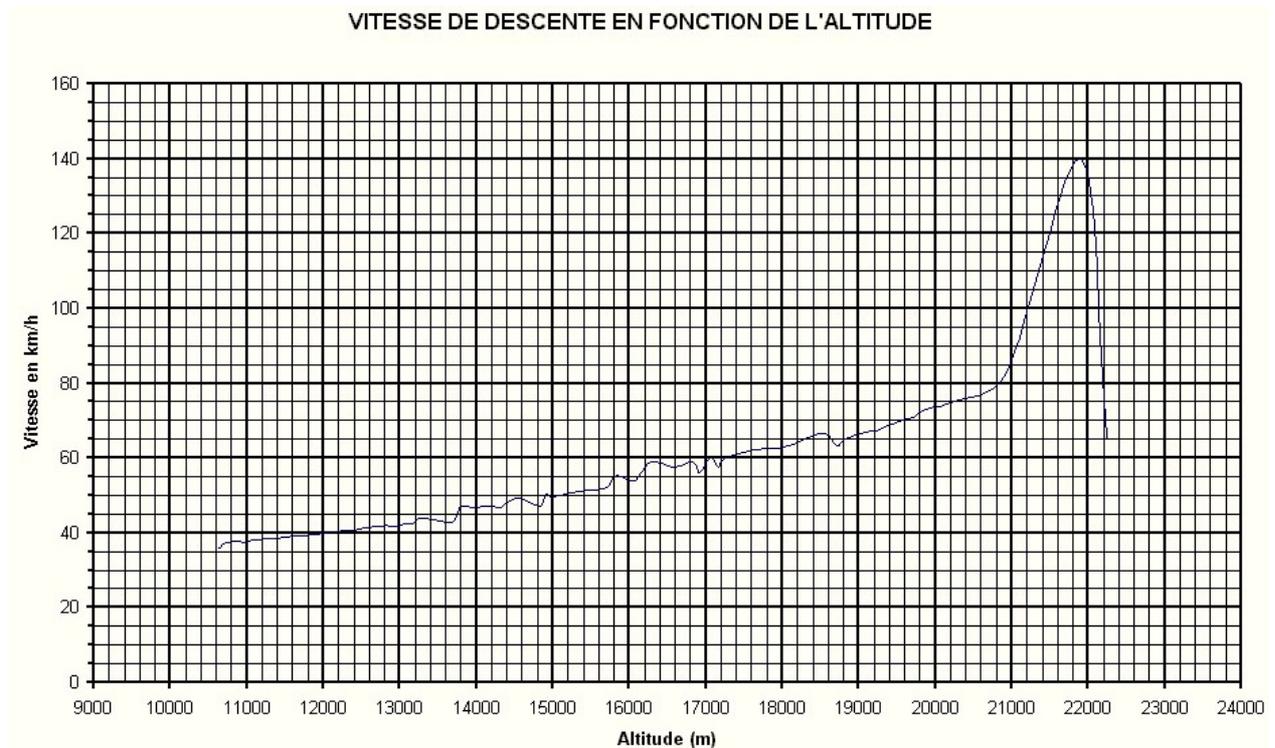


On peut voir sur ce graphique les deux vitesses moyennes de montée. Alors que la vitesse de montée est d'environ 5 m/s dans la troposphère elle est plutôt de 4 m/s dans la stratosphère.

L'irrégularité de la vitesse de montée montre la présence de perturbations atmosphériques à tous les niveaux de l'atmosphère. Cette irrégularité peut être due à la présence de vents, de courants ascendants.

A 4000 m, on voit une forte irrégularité. Cela peut nous laisser penser que les nuages dont nous avons supposé l'existence créent des courants perturbateurs.

## 5.4 VITESSE DE DESCENTE DU BALLON



Cette courbe - qui se lit de la droite vers la gauche - montre la vitesse de chute.

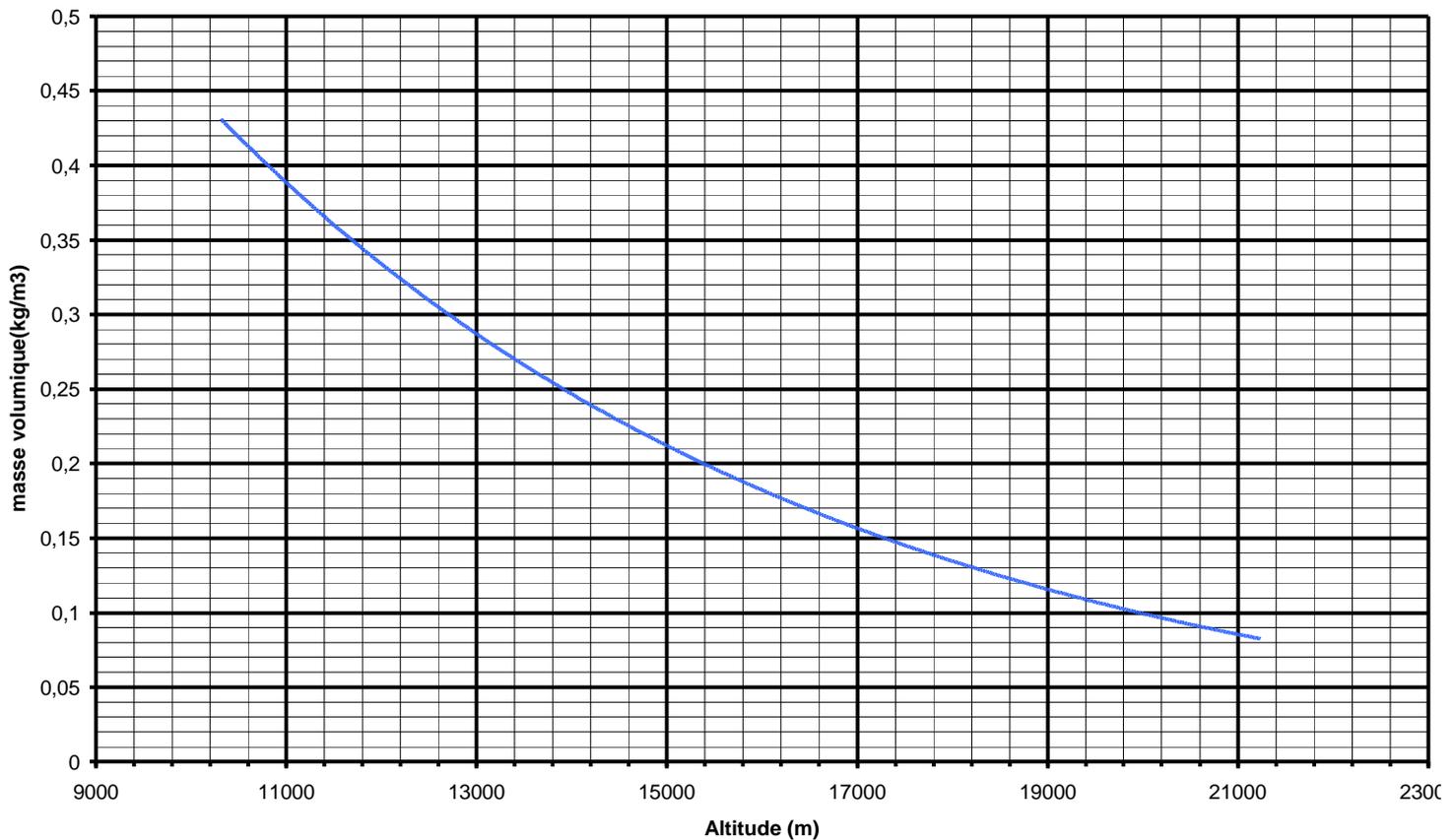
Juste après l'éclatement, le GPS a eu quelques difficultés à calculer la vitesse, le point à 140 km/h est donc à prendre avec réserve. Il est possible que la nacelle ait basculé et que le GPS ait perdu le contact avec les satellites de navigation.

La chute est rapidement freinée pour atteindre une vitesse limite à 20 km d'altitude. La descente semble ensuite assez régulière, avec cependant quelques sursauts qui correspondent certainement à des turbulences. Ceux-ci se sont cependant révélés assez faibles dans la stratosphère.

## 5.5 MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR

A partir de la vitesse de chute du ballon on peut calculer la masse volumique de l'air, ce qui donne la courbe, assez convaincante, suivante :

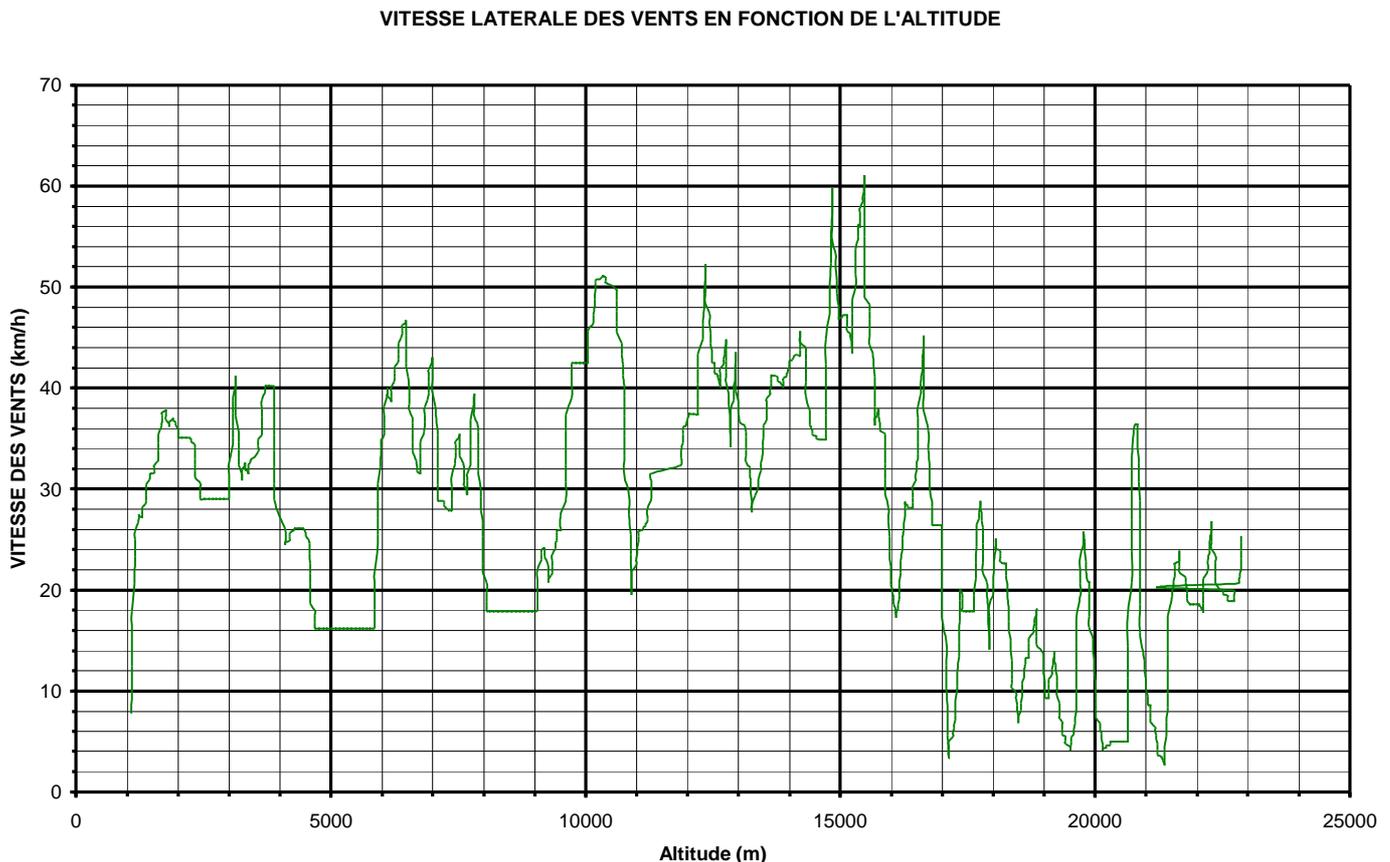
**MASSE VOLUMIQUE APPROCHEE EN FONCTION DE L'ALTITUDE**



Par rapport à la table standard de l'atmosphère, la précision est de l'ordre de 15 % ! C'est donc une mesure de qualité simple, qui exploite pourtant un paramètre qui semble assez éloigné de la thermodynamique ! Le calcul n'a pu être fait que entre 9 et 22 km, avant la perte radio du signal de télémétrie.

## 5.6 VITESSE LATÉRALE DES VENTS.

Le ballon sonde se laissant dériver au grès des vents, il donne une très bonne idée de la vitesse des vents latéraux dans la haute atmosphère. Les mesures montrent la courbe suivante :



Ce graphique montre que l'atmosphère est très dynamique, et qu'elle est parcourue par des vents dont la vitesse est très variable selon l'altitude. On remarque, notamment dans la stratosphère, la présence de « couloirs » où les vents sont plus importants. Ces mesures montrent des vents modérés, mais ceux-ci peuvent atteindre quelquefois 200 km/h. On observe un pic de vent juste avant la traversée de la tropopause. Ce vent est caractéristique du passage de la troposphère à la stratosphère. A cette altitude, les vents sont souvent utilisés par les avions de lignes long courrier (utilisation des « jet-stream »). Ils expliquent aussi qu'un avion peut mettre 3 heures de plus dans un sens du trajet Paris – New York par rapport à l'autre.

Si on fait correspondre la courbe ci-dessus avec la trajectoire du ballon, on s'aperçoit que la stratosphère est composée de couches isothermes juxtaposées (d'où peut-être son nom) aux vents de forces et directions bien différentes. On peut remarquer aussi que les vents y sont plus transversaux que verticaux, contrairement à la troposphère où les mouvements peuvent être dans les deux sens simultanément.

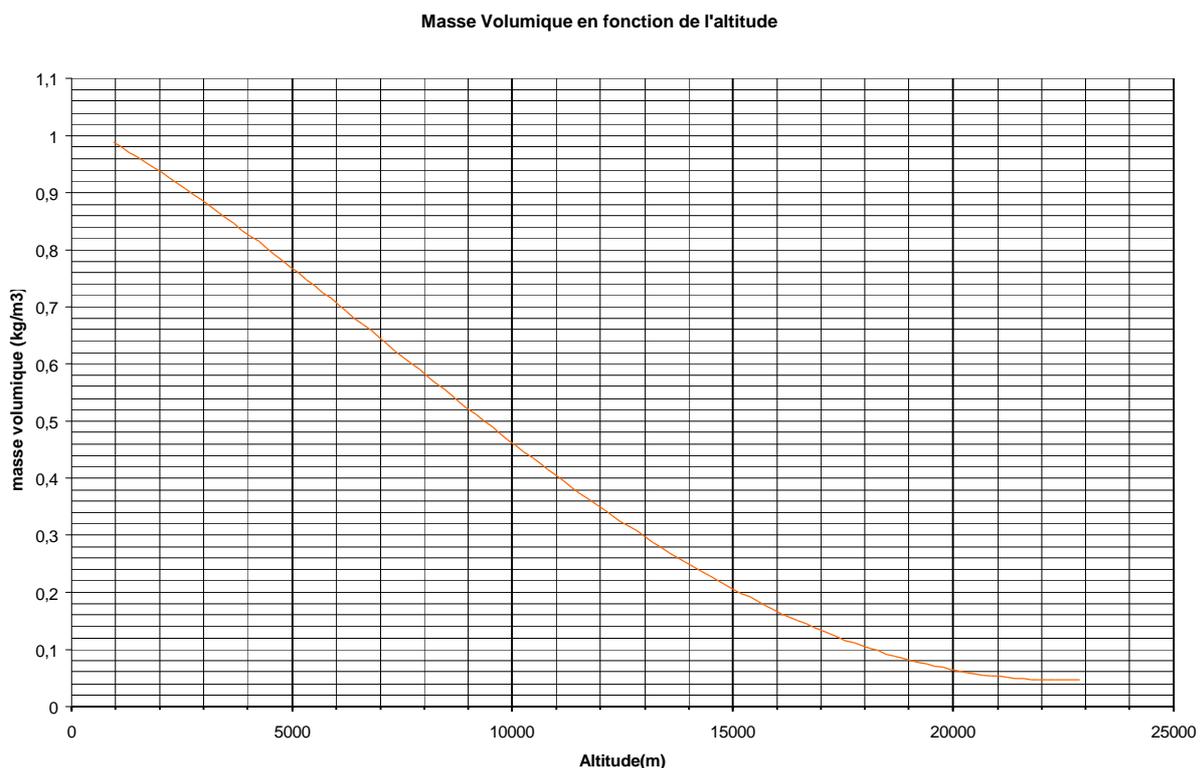
## 6 AUTRES COURBES

### 6.1 LA MASSE VOLUMIQUE DE L'AIR PAR LA LOI DES GAZ PARFAIT.

On peut facilement calculer la loi qui régit la masse volumique par la célèbre loi des gaz parfait. Il s'agit cependant seulement d'un modèle, et non d'une mesure directe.

On a :  $PV = nRT$  soit :  $\frac{Pm}{r} = \frac{mRT}{M}$  avec  $R = 8.314$ ,  $M$  la masse molaire de l'air :  $28.84 \text{ g m}^3$ .

On a donc  $r = \frac{PM}{RT}$ . On obtient la courbe suivante :



Cette courbe est assez précise (15 %) et correspond bien au modèle standard. Son avantage est qu'elle montre bien le changement de variation à l'entrée dans la stratosphère, à cause d'un changement de variation de température de l'atmosphère.

## 6.2 LE VOLUME DU BALLON

Par la loi des gaz parfait, on peut obtenir :

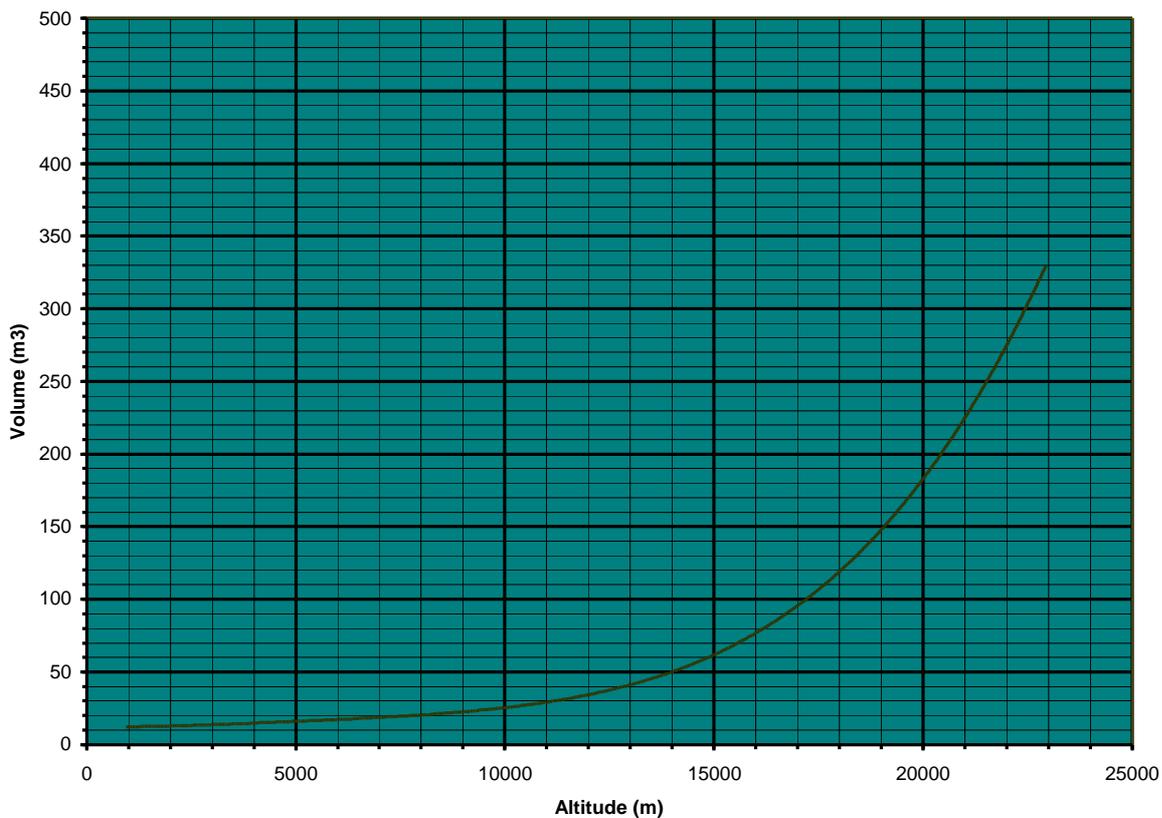
$$V = \frac{TP_0}{T_0P} V_0$$

Au sol, le ballon a un volume approximatif de  $10\text{m}^3$ .

En connaissant ce point, on peut connaître le volume approché de l'enveloppe en fonction de l'altitude.

La courbe (approximation polynomiale) montre le volume avec une précision qu'on peut estimer à 20 % environ jusqu'à 15000m.

Volume approximatif du ballon en fonction de l'altitude



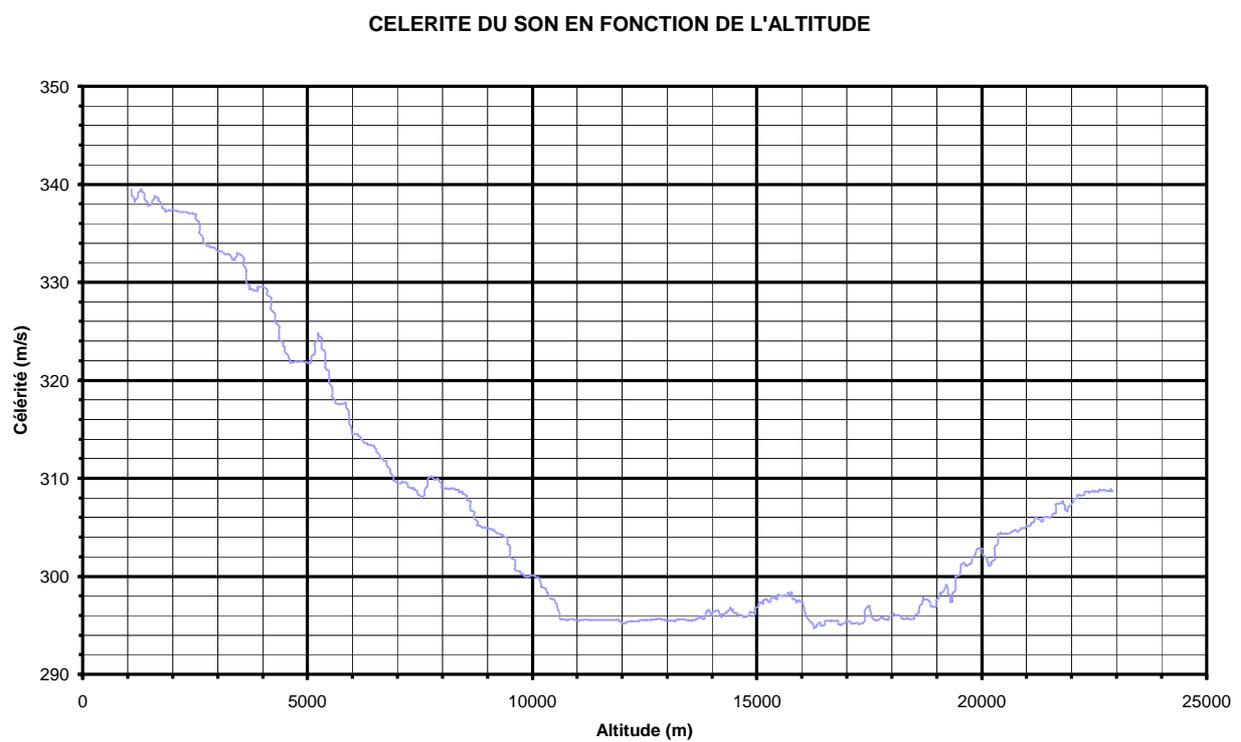
Cette courbe est intéressante car elle montre que l'augmentation de volume est beaucoup plus importante en haute altitude, d'où la limite des ballons stratosphériques fermés. Un tel ballon

ne permet pas de dépasser 40 km. Le CNES utilise donc régulièrement des ballons stratosphériques ouverts, qui permettent d'atteindre 50 km d'altitude facilement.

### 6.3 CELERITE DU SON

Il est facile de tracer la célérité du son en fonction de l'altitude par la formule simple :

$$c = \sqrt{\frac{gRT}{M}}$$



En calculant avec une température stable de  $-55^{\circ}\text{C}$  la vitesse reste constante autour de 296 m/s jusqu'à 25 km environ.

## CONCLUSION

Sur de nombreux points, Pégase a été pour l'équipe un projet remarquable.

Au niveau humain tout d'abord, le projet fut l'occasion pour chacun des membres de s'investir dans un projet extra-scolaire autour d'une expérience exceptionnelle. En particulier, chaque membre a pu s'initier au travail d'équipe, à la conduite de projet, de l'idée au cahier des charges, du cahier de projet à la réalisation.

Au niveau technique ensuite, Pégase est une réalisation pratique mettant en œuvre beaucoup de connaissances apprises à l'ESEO en première et deuxième année Ingénieur.

Le projet regroupe en effet des connaissances dans des domaines aussi variés que l'électronique numérique et analogique, les télécommunications HF, l'informatique temps réel, l'informatique embarquée...

Au niveau expérimental enfin, les résultats de Pégase sont tous de qualité, surtout pour une première expérience. Les mesures permettent de retrouver les tables scientifiques de l'atmosphère, de vérifier des lois thermodynamiques, et d'appréhender les caractéristiques des hautes altitudes.

Cependant, pour le club, Pégase n'est pas un aboutissement. Certaines mesures peuvent encore être améliorées. En particulier, la mesure de température extérieure pourra gagner en précision en haute altitude. Un nouveau projet est donc déjà lancé.

En plus de nouvelles mesures, le prochain ballon rapportera des images numériques à partir de la haute atmosphère. Une autre expérience aéronautique exceptionnelle en perspective...