

**Axel
TALON**

**Etienne
LALIQUE**



Phaéton, le ballon solaire

**Lycée Jacques
de Vaucanson
37 Tours - FRANCE**

2007-2008

Sommaire

Introduction	3
A. Quelle masse théorique un ballon peut-il soulever ? Etude statique	3
1) Etude mécanique	3
a) Bilan des forces extérieures s'exerçant sur le ballon	3
b) Paramètres influençant les forces s'exerçant sur le ballon	4
c) Masse théorique qu'un ballon donné peut soulever	4
d) Masse réelle que notre ballon a soulevé	5
2) Comment optimiser cette masse soulevée par le ballon ? Etat du rayonnement ?	6
a) Energie solaire (rayonnement direct)	6
b) La propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère	7
c) L'effet des nuages	8
d) L'effet du sol	8
B. Quel profil de vol pour un ballon solaire ?	8
1) Prévisions et suivi de la trajectoire du ballon	9
a) Suivi à l'aide d'un système G.P.S./A.P.R.S.	9
b) Prévisions	9
2) Etude mécanique du vol	11
a) Bilan des forces extérieures s'exerçant sur le ballon	11
b) Mesures réalisées pour l'étude du vol	12
3) Etude du second lâcher	13
4) Etude du troisième lâcher	14
a) Décollage	15
b) Ascension	16
5) Perspectives	17
Conclusion	19
Remerciements	19

Elèves de première scientifique, nous avons décidé de nous intéresser aux ballons solaires. Nous avons eu la possibilité de travailler sur un ballon sonde gonflé à l'hélium en seconde et c'est à la suite de recherches sur Internet que nous sommes tombés par hasard sur un ballon solaire dont nous ignorions l'existence : le principe et le côté écologique nous a tout de suite séduits ! Il s'agit d'une montgolfière qui n'utilise que les propriétés du rayonnement solaire pour s'élever. En effet, son enveloppe est constituée d'une matière plastique noire qui absorbe la quasi-totalité de l'énergie lumineuse et la rediffuse sous forme de rayonnements infrarouges qui vont réchauffer l'air intérieur.

Dans un premier temps, nous nous sommes limités à une étude statique d'un ballon solaire en tentant de répondre à la question suivante : Quelle masse un ballon solaire donné peut-il soulever ?

Dans un second temps, nous avons voulu étudier le vol d'un ballon solaire tout en essayant de prévoir son trajet horizontal et de justifier son trajet vertical.

A. Quelle masse un ballon peut-il soulever ?

Notre système d'étude sera donc l'ensemble de la chaîne de vol constitué par le ballon (polyéthylène, ruban adhésif, cordage), l'air intérieur et la charge accrochée. Nous étudierons l'équilibre du système dans le référentiel terrestre supposé Galiléen. Lorsque le système est en équilibre dans ce référentiel, il est, d'après la première loi de Newton, soumis à des forces qui se compensent. Ainsi, dans un premier temps, nous devons faire un inventaire des forces qui s'exercent sur le ballon à l'équilibre, évaluer les paramètres dont dépendent ces forces, puis appliquer le principe d'inertie pour en déduire la masse que peut soulever notre ballon.

1) Etude mécanique de l'équilibre du ballon

a) Bilan des forces extérieures s'exerçant sur le ballon

Dans cette expérience, nous distinguerons deux forces exercées sur le système :

Le poids \vec{P} : le poids de l'ensemble peut se diviser en trois : poids de l'enveloppe (ficelle, ruban adhésif et cordage), poids de l'air intérieur et poids de la charge accrochée.

On peut donc écrire : $P = P_{\text{charge}} + P_{\text{air int}} + P_{\text{ballon}} = (m_{\text{charge}} + m_{\text{air int}} + m_{\text{ballon}}) \times g$.

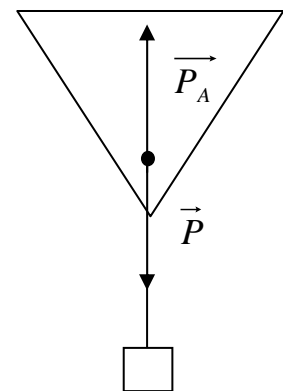
- \vec{P} : Poids en Newton (N).

- m_{charge} : masse de la charge en kg ; $m_{\text{air int}}$: masse de l'air intérieure en kg ; m_{ballon} : masse du ballon en kg.

- g : intensité de la pesanteur en N.kg^{-1} . (g est environ égal à 9.81 N.kg^{-1} au sol à Tours).

Pour le calcul du poids de l'air intérieur, nous aurons besoin de la masse volumique μ de l'air intérieur et du volume V du ballon. En effet, $\mu = m/V$ donc $m = \mu V$.

- la poussée d'Archimède \vec{P}_a : d'après le principe d'Archimède, tout corps plongé dans un fluide (gaz ou liquide) subit une force de la part de ce dernier, verticale vers le haut et qui est égale au poids du volume de fluide déplacé. Le fluide en question est l'air extérieur. Ainsi la norme est $P_a = m_{\text{air ext}} g = \mu_{\text{air ext}} V g$.



Doc.1 : Bilan des forces

P_a : poussée d'Archimède en Newton (N) ; g : intensité de la pesanteur en $N.kg^{-1}$; V : volume du ballon en m^3 .

Ainsi pour évaluer ces deux forces, nous avons besoin d'exprimer le volume du ballon, la masse volumique de l'air intérieur et celle de l'air extérieur.

b) Paramètres influençant les forces s'exerçant sur le ballon

→ Volume du ballon

Pour des raisons pratiques et pour un gain de temps, nous avons opté pour un tétraèdre qui ne nécessite qu'une seule découpe. Si nous notons a , l'arrête du tétraèdre, son volume est donné par la relation suivante : $V = \frac{\sqrt{2}}{12} a^3$. Dans notre

cas, compte tenu du film plastique à notre disposition, notre arrête est de 5,77m, soit un volume $V = 22,7m^3$.

→ Masse volumique de l'air

On suppose que l'air est un gaz parfait, ce qui signifie que l'on néglige les interactions entre les molécules, parce qu'elles sont suffisamment éloignées les unes des autres.

D'après la loi des gaz parfaits : $pV = nRT$. Sachant que : $\mu = \frac{m}{V}$ et $n = \frac{m}{M}$ alors, $pV = \frac{m}{M} RT$.

Ainsi nous obtenons :
$$\mu = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}$$

p : la pression atmosphérique en Pascal (Pa) ; M : la masse molaire de l'air extérieur en $kg.mol^{-1}$.

R : la constante des gaz parfaits en $Pa.m^3.mol^{-1}.K^{-1}$ ($R = 8.314 \text{ USD}$) ; T : la température de l'air en Kelvin (K).

μ : la masse volumique de l'air en $kg.m^{-3}$.

A partir de cette formule, nous pouvons obtenir la masse volumique de l'air connaissant sa température, sa pression et de sa masse molaire.

Exemple : $p = 1,013.10^5 \text{ Pa}$; $R = 8,314 \text{ Pa.m}^3.mol^{-1}.K^{-1}$; T (en K) = θ (en °C) + 273,15 ;

$M_{\text{air}} = (80/100) \times M_{N_2} + (20/100) \times M_{O_2}$ (on suppose que l'air est simplement composé de 80% de diazote N_2 et 20% de dioxygène O_2) : $M_{\text{air}} = 0,80 \times 28,8 + 0,20 \times 32 = 28,8 \text{ g.mol}^{-1} = 28,8.10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$.

A une température de 30°C : $\mu = 1,013.10^5 \times 28,8.10^{-3} / (8,314 \times 303) = \underline{1,16kg.m^{-3}}$; à 0°C : $\underline{\mu = 1,29kg.m^{-3}}$.

c) Masse théorique qu'un ballon donné peut soulever

D'après le principe d'inertie, pour que le ballon soit en équilibre, il faut que la poussée d'Archimède compense exactement le poids. Dans notre cas, nous allons faire varier la masse de la charge afin d'obtenir des forces qui se compensent ($\vec{P}_a + \vec{P} = \vec{0}$), ainsi, le ballon restera en suspension dans l'air.

Le poids doit donc avoir la même intensité que la poussée d'Archimède. Soit :

$$P_a = P \leftrightarrow \mu_{\text{air ext}} g V = P_{\text{charge}} + P_{\text{air int}} + P_{\text{ballon}} \leftrightarrow \mu_{\text{air ext}} g V = (m_{\text{charge}} + m_{\text{air int}} + m_{\text{ballon}}) g \leftrightarrow$$

$\mu_{\text{air int}} V = m_{\text{charge}} + m_{\text{air int}} + m_{\text{ballon}}$. Donc, la masse soulevée est égale à :
$$m_{\text{charge}} + m_{\text{ballon}} = (\mu_{\text{air ext}} - \mu_{\text{air int}}) \times V$$

d) Masse réelle que notre ballon a soulevé

→ Premier essai

Lors de notre première expérience, nous avons installé un thermomètre au centre du ballon de 22,7 m³ de volume. . Alors que la température extérieure était d'environ 0°C, la température intérieure a atteint 30°C au centre du ballon. Il a alors soulevé 2,0 kg en plus de sa propre masse. Comparons ce résultat à la théorie :

$$A 0^{\circ}: \mu_{\text{air ext}} = pM/RT = 1,013.10^5 \times 28,8.10^{-3} / (8.314 \times 273) = \underline{1,285 \text{ kg.m}^{-3}}$$

$$A 30^{\circ}: \mu_{\text{air int}} = pM/RT = 1,013.10^5 \times 28,9.10^{-3} / (8.314 \times 303) = \underline{1,158 \text{ kg.m}^{-3}}$$

$$D'o\grave{u} m_{\text{charge}} + m_{\text{ballon}} = 1,285 \times 22,7 - 1,16 \times 22,7 = \underline{2,88 \text{ kg.}}$$

Calcul de la charge théorique soulevée par notre ballon solaire

largeur PET (en m)	T_ext (°C)	T_int (°C)	Pression (en hPa)	masse ballon (en kg)	g (en N/kg)	M _{air} (g/mol)
5	0	30	1012	1.23	9.81	28.8

arrête (en m)	V (en m ³)	μ _{ext} (kg/m ³)	μ _{int} (kg/m ³)
5.77	22.7	1.28	1.16

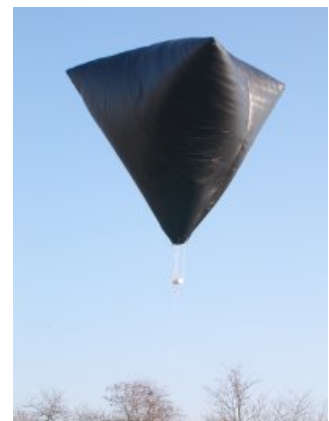
Pa (en N)	P _{air} (en N)	P _{ballon} (en N)	P _{charge} (en N)
285.6	257.3	12.1	16.1

m _{charge} (en kg)
1.65

Doc.2 : Capture d'écran de la feuille que nous avons mise au point pour calculer la charge théorique soulevée

Le ballon pouvait donc soulever, dans ces conditions, 2,88kg. Sachant que sa masse était de 1,23kg, thermomètre et nacelle comprise, celui-ci peut donc soulever une charge de 1,65kg. Ainsi on peut voir qu'il y a entre la valeur expérimentale et la valeur théorique, une différence de 350g. Nous nous sommes interrogés sur l'origine de cette différence, et nous avons fait deux hypothèses :

- Lorsque les parois du ballon se réchauffent, le polyéthylène peut se dilater et prendre une forme plus arrondie. On peut le voir sur la photo ci-contre. Ainsi le volume augmente et la masse que le ballon peut soulever également. Cependant pour soulever 350 g de plus il faudrait que le volume du ballon soit de 25,8 m³, soit un peu plus de 3 m³ supplémentaires, ce qui semble peu probable ;
- L'hypothèse la plus réaliste nous a semblé être sur la non homogénéité de la température à l'intérieur du ballon. En effet, notre capteur température se trouvait au centre du ballon. Puisque l'enveloppe absorbe le rayonnement solaire et le diffuse sous forme d'infrarouge, l'air présent dans le ballon est réchauffé principalement près de la surface du polyéthylène et par convection, l'ensemble se réchauffe de façon moindre. La température intérieure moyenne du ballon serait plus élevée que ce que nous indique notre capteur de température.



Doc.3: Essais du 24/12/07

→ Second essai

Nous avons donc décidé de renouveler l'expérience en plaçant cette fois deux thermomètres : l'un au centre et l'autre à environ 30 cm de la paroi supérieure du ballon.

Mesures : pression atmosphérique : 1003 hPa ; température extérieure : 5°C ; Température intérieure au centre : 29°C

Température intérieure à proximité de la paroi supérieure : 37°C ; Charge soulevée : 1,80 kg

Ainsi, nous avons constaté effectivement que la température dans le ballon est loin d'être homogène. Elle est beaucoup plus élevée au niveau des parois. Il reste néanmoins difficile, même avec plusieurs thermomètres, d'en faire une moyenne. Cependant, nous pouvons, connaissant la charge soulevée, en déduire une valeur moyenne de cette température :

$$\text{A } 5^\circ : \mu_{\text{air ext}} = pM/RT = 1,003 \cdot 10^5 \cdot 28,8 \cdot 10^{-3} / (8,314 \cdot 278) = 1,27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\text{A } 29^\circ : \mu_{\text{air int}} = pM/RT = 1,003 \cdot 10^5 \cdot 28,9 \cdot 10^{-3} / (8,314 \cdot 302) = 1,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\text{A } 37^\circ\text{C} : \mu_{\text{air int}} = pM/RT = 1,003 \cdot 10^5 \cdot 28,9 \cdot 10^{-3} / (8,314 \cdot 310) = 1,12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\text{D'où } m_{\text{charge}} = 1,270 \cdot 22,7 - 1,15 \cdot 22,7 - m_{\text{ballon}} = \underline{1,49 \text{ kg}}$$

$$m_{\text{charge}} = 1,270 \cdot 22,7 - 1,12 \cdot 22,7 - m_{\text{ballon}} = \underline{2,17 \text{ kg}}$$

La masse réellement soulevée, de 1,80 kg, est bien intermédiaire. A l'aide de cette masse, nous pouvons retrouver à la masse volumique moyenne de l'air intérieur $\mu_{\text{air int}} = 1,14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, soit une température intérieure moyenne de 32,6°C.

Pour que la charge soulevée soit maximale, il faut une différence de température maximale entre l'air extérieur et l'air intérieur. Quelles sont les conditions à réunir pour la favoriser ?

2. Comment optimiser cette masse soulevée par le ballon ? Etat du rayonnement

Nous avons choisi le polyéthylène noir pour fabriquer notre enveloppe car il a l'avantage d'être suffisamment résistant avec une faible épaisseur (18 à 20 μm d'après le fournisseur), mais surtout pour son pouvoir absorbant. En effet, son albédo c'est-à-dire la part de l'énergie qu'il réfléchit par rapport à celle qu'il reçoit, est quasi nulle. Ainsi, il absorbe la quasi totalité de la lumière, soit 95% (albédo de 0,05), d'après nos mesures réalisées avec un radiomètre. Mais, de quoi dépend l'énergie lumineuse reçue par le ballon ?

a) Energie solaire (rayonnement direct)

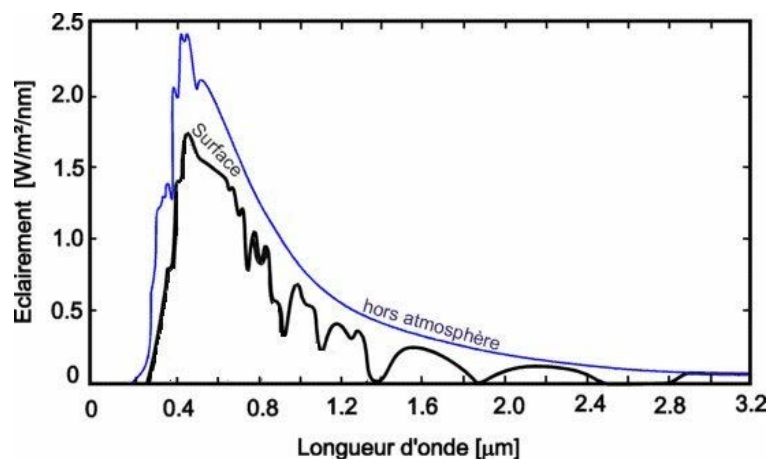
L'énergie émise par le Soleil l'est d'abord sous la forme de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire. Notre œil ne perçoit qu'une partie de ce rayonnement. Cette partie est située dans le domaine dit visible, de longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm.

Doc.4 : Densité spectrale de l'éclairement énergétique du rayonnement solaire direct

Courbe bleue : rayonnement solaire au-dessus de l'atmosphère.

Courbe noire : rayonnement solaire direct au sol pour une hauteur du Soleil de 65° et une atmosphère claire standard.

La plus grande partie de l'énergie solaire est donc



rayonnée principalement dans le domaine visible et infrarouge mais aussi dans les UV. L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface d'un m^2 , perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire. Elle a été estimée à $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

b) La propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère

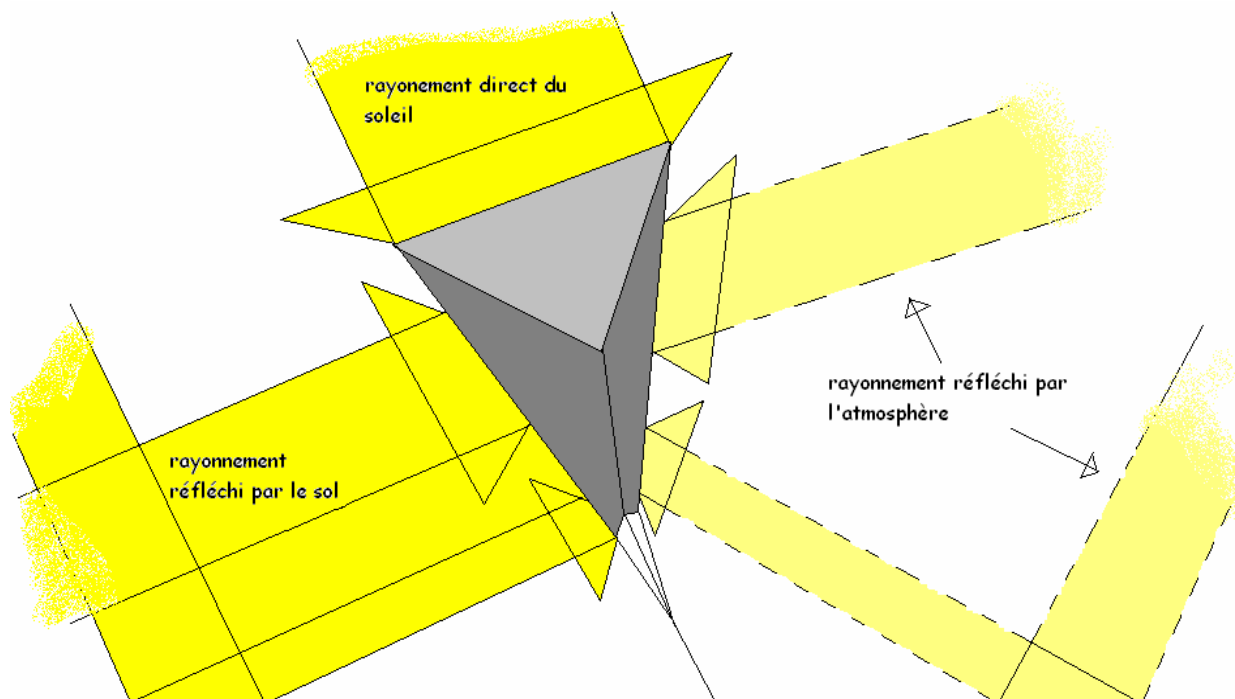
Lorsque le rayonnement solaire se propage dans l'atmosphère, il interagit avec les constituants gazeux de celle-ci et avec toutes les particules présentes en suspension (aérosols, gouttelettes d'eau et cristaux de glace).

Le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé :

→ **Réfléchi**, par la surface terrestre, c'est-à-dire renvoyé dans une direction privilégiée (réflexion dite spéculaire).

→ **Diffusé**, c'est-à-dire renvoyé dans toutes les directions. Le phénomène de diffusion se produit dans un milieu contenant de fines particules ou des molécules et dépend fortement de la taille des particules considérées. Par exemple, l'influence des molécules dans l'air est plus intense pour les courtes longueurs d'onde (bleu) que pour les grandes (rouge), en raison de la loi de diffusion de Rayleigh.

→ **Absorbé**, par les composants gazeux de l'atmosphère. Cette absorption est dite sélective, car elle s'opère pour des valeurs de longueurs d'onde bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, à un degré moindre, à l'oxygène.



Doc.5 : Rayonnement direct, réfléchi et diffusé par l'atmosphère

On appelle rayonnement solaire direct celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. Le spectre du rayonnement solaire direct reçu à la surface terrestre est présenté sur la courbe noire. Il s'éloigne de façon notable du rayonnement atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier à cause de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère. Dans certaines bandes de longueur d'onde, le rayonnement est atténué ou même annulé.

c) L'effet des nuages

La présence de nuages modifie sensiblement l'importance des rayonnements diffus et directs, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant. On rappelle que l'albédo est le rapport entre énergie réfléchie et énergie incidente. L'albédo des nuages varie de 0,4 à 0,9 selon leur nature, leur épaisseur, la hauteur du Soleil, etc. Les nuages absorbent en outre une fraction du rayonnement solaire, mais celle-ci reste assez faible et ne dépasse pas 10 % de l'énergie incidente pour les nuages les plus épais.

Le tableau ci-dessous montre des mesures du rayonnement global subsistant après le passage au travers de différents types de nuages. Pour ces types de nuages, on voit que le rayonnement global reçu au sol par ciel couvert est toujours inférieur au rayonnement global reçu au sol par ciel clair dans des conditions équivalentes. On note aussi que ce sont les nuages bas qui réduisent le plus le rayonnement incident et que les nuages hauts en laissent passer la plus grande partie.

Nuages hauts		Nuages moyens		Nuages bas			
Cirrus	Cirrostratus	Alto cumulus	Altostratus	Strato cumulus	Stratus	Nimbostratus	Brouillard
0,83	0,80	0,50	0,41	0,34	0,25	0,18	0,17

Doc.6a : Albédo des nuages (source : La météorologie 8ème série n°31, septembre 2000)

d) L'effet du sol

De la même façon que l'on a défini un albédo des nuages, il existe un albédo de la surface qui représente la fraction de rayonnement qu'elle réfléchit par rapport à celui qu'elle reçoit. Cet albédo est très variable selon la nature et l'état de la surface (et selon la longueur d'onde incidente et la hauteur du Soleil). On peut citer quelques valeurs moyennes pour différentes sortes de sols ou d'états de surface.

Doc. 6b : Albédo de différentes surfaces (source : La météorologie 8ème série n°31, septembre 2000)

type de surface	Albédo
corps noir	0
roche foncé (ex: basalte)	0,05
eau peu clair (ex:océans)	0,07
sols noir(ex:cendre)	0,05 à 0,16
Béton	0,15 à 0,30
Sable	0,25 à 0,30
Glace	0,30 à 0,50
neige tassée	0,50 à 0,80
neige fraîche	0,80 à 0,90
miroir parfait	1,0

B- Quel profil de vol pour un ballon solaire ?

A la suite de ces études au sol, nous avons décidé de prolonger notre travail en étudiant le profil de vol d'un ballon solaire. Nous nous sommes fixé deux objectifs principaux : prévoir le trajet du ballon et analyser le trajet réel. Nous avons donc dû construire un tétraèdre plus volumineux de 76 m³ et une nacelle pour y embarquer un certain nombre d'expériences : mesures de grandeurs physiques (pression, température extérieure du ballon, températures intérieures et éclairement), suivi GPS et prises de vue horizontales et verticales (appareil photographique et caméra).

1. Préviation et suivi de la trajectoire du ballon

a) Suivi à l'aide du système G.P.S./A.P.R.S.

→ **Le G.P.S. (Global Positioning System) :** Pour suivre le trajet de notre ballon, nous avons utilisé une tête GPS fixée à l'intérieur de la nacelle. Le système GPS fonctionne à l'aide de satellites en orbite autour de la Terre, dont les positions sont connues exactement. Pour déterminer une position sur Terre, le système GPS utilise le principe de la triangulation : la position de l'objet se trouve dans la trajectoire d'au moins 3 satellites, qui décrivent 3 sphères distinctes dans l'espace, autour de l'objet. Avec 4 satellites, on mesure le temps, l'altitude, la latitude/longitude, et la vitesse. Ce sont les 4 données qui nous ont été transmises suite aux paramétrages par les radioamateurs de Tours de notre système. Chacun des satellites envoie son numéro d'identification, sa position précise par rapport à la Terre et l'heure exacte d'émission du signal. Grâce à ces renseignements, le récepteur, qui possède une horloge synchronisée avec celle des satellites, calcule le temps de propagation à la vitesse de la lumière et en déduit la distance satellite-objet.

→ Fonctionnement de l'APRS (Automatic Position Reporting System) :

Pour pouvoir suivre notre ballon en temps réel, la tête G.P.S. a été reliée à un système A.P.R.S. composé par :

- un modem (tinitrack) qui encode les données provenant de la tête GPS dans un format (AX25) qui va pouvoir être envoyé sous forme de trames très rapides par paquet ;
- un émetteur radio VHF (Very High Frequency) qui envoie les données encodées sur la fréquence 144,800 MHz réservée au réseau A.P.R.S.. Ces données sont réceptionnées par des relais radioamateurs et/ou en direct. Les relais radioamateurs les retransmettent par voie radio et Internet (système VPN, Virtual Private Network, réseau privé virtuel), notamment sur le site <http://aprs.fi/>. L'identifiant de notre système était F6KCI-11, vous pouvez aller consulter nos différents essais sur ce site, les données étant disponibles pendant 6 mois.

L'émission directe ou par les relais radioamateurs permet un suivi en temps réel grâce à un récepteur combiné à un ordinateur portable équipé par exemple du programme UI-View créé par le radioamateur Roger Barker G4IDE.

b) Prévisions

Le logiciel Balloon Track créé par un autre radioamateur permet de prévoir le point de chute du ballon, connaissant ses vitesses moyennes d'ascension et de descente, le moment de la redescente ainsi que les prévisions de la direction, du sens et de la force des vents en altitude données par le laboratoire N.O.A.A. (National Oceanic and Atmospheric Administration)



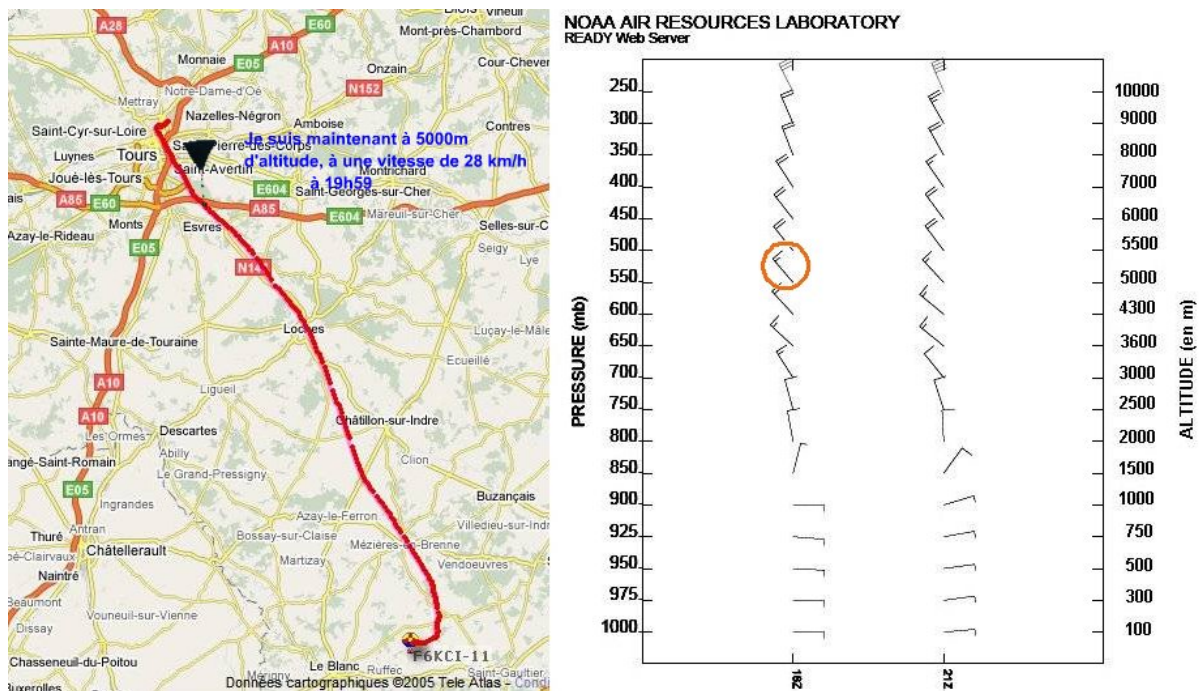
Doc.7 : Trajet réel de la chaîne de vol en rouge et prévision en bleu pour le 3^{ème} lâcher (25/04/2008).

Notre premier lâcher qui a eu lieu le 4 avril 2008 à 18h30 locale, nous a permis :

→ D'estimer les vitesses d'ascension et de redescente de notre ballon en fin de journée en quasi absence de nuages, soit $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ à l'ascension, et $1,9 \text{ m.s}^{-1}$ à la descente. Certes, ces valeurs peuvent être amenées à varier légèrement en fonction de l'éclairement donc de la présence de nuages et de la position du Soleil ;

→ De constater que la redescente du ballon coïncide à peu de chose près avec le coucher du Soleil, ce qui nous permet de prévoir l'altitude maximale atteinte par le ballon. Notons que la chaîne de vol commence à ralentir avant le coucher du Soleil car le gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur du ballon devient insuffisant.

Ainsi, pour les lâchers qui ont suivi nous avons pu prévoir le point de chute de notre ballon. Pour le troisième lâcher par exemple, nous pouvons constater sur la carte ci-dessous que la prévision est très proche du trajet réel du ballon : le ballon est retombé à seulement 5 km du point de chute prévu. Cette prévision nous a permis de nous rendre sur le lieu de chute très rapidement : nous avons retrouvé le ballon seulement 10 minutes après son atterrissage, grâce au système G.P.S./A.P.R.S. qui nous a envoyé une dernière trame alors qu'il était au sol. Cela n'aurait pas été possible si nous n'avions pas été à proximité, car sa puissance d'émission n'était pas suffisante (100mW). Ci-dessous, nous avons capturé l'une des images de l'animation qui figure sur notre site Internet. Elle permet de comparer le trajet réel du ballon (direction et vitesse) avec les vents horizontaux annoncés. Nous pouvons constater par exemple qu'au bout de 3/4 d'heure de vol, alors que le ballon se trouve à environ 5000 m d'altitude, il se déplace à environ 28 km.h^{-1} avec un angle 140° par rapport à l'axe Nord-sud. . Cela concorde parfaitement avec les prévisions sur les vents aussi bien en direction qu'en intensité (15 nœuds, soit 27 km.h^{-1}). Remarquons tout de même que la vitesse de déplacement indiquée par le GPS, n'est pas la vitesse horizontale, mais comme la vitesse verticale n'est que de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$, soit environ $5,4 \text{ km.h}^{-1}$, elle est négligeable devant la vitesse horizontale ($v^2 = v_x^2 + v_y^2$, soit $v_x^2 = v^2 - v_y^2$). Nous obtenons $27,5 \text{ km.h}^{-1}$.



Doc.8 : Comparaison du trajet horizontal du ballon aux vents annoncés pour le 3^{ème} lâcher (28/04/2008).

2) Etude mécanique du vol

a) Bilan de forces et condition de décollage

→ Caractéristiques des composants de la chaîne de vol :

Le ballon : nous avons opté pour un tétraèdre de 76 m^3 soit 8.4 m d'arête en utilisant trois bandes de polyéthylène accolées de $2,5 \text{ m}$ de large chacune. Le ballon a une masse de 2.0 kg , ruban adhésif et cordage compris. En effet, pour espérer soulever une charge de 2 kg en plus de sa propre masse, avec un gradient de température de 15°C , ce volume semblait être un minimum.

Le parachute de 50 g ; Réflecteur radar de masse 150 g ; la nacelle : cube de 30 cm d'arête et de masse $m = 1,800 \text{ kg}$ en polystyrène extrudé.

Notre système d'étude sera l'ensemble constitué par la chaîne de vol ayant une **masse totale de $4,0 \text{ kg}$** sans oublier l'air intérieur. Nous étudierons le mouvement de l'ensemble dans le référentiel terrestre supposé Galiléen.

→ Bilan des forces extérieures s'exerçant sur le système S :

Poids de l'ensemble : \vec{P} ; - Poussée d'Archimède : \vec{P}_a

La traînée ou force de frottements \vec{f} qui est colinéaire au mouvement donc qui peut être décomposée en une composante verticale \vec{f}_v et une horizontale \vec{f}_h .

La force \vec{F} due au vent que l'on suppose selon l'horizontale uniquement au-delà de 3000 m d'après nos discussions avec les techniciens de Météo France Tours.

→ Condition de décollage : Pour que notre ballon puisse s'envoler, il

faut que la poussée d'Archimède \vec{P}_a dirigée vers le haut soit supérieure au poids \vec{P} dirigé vers le bas. Il n'y a pas de frottements lors du décollage puisqu'il n'y a pas encore de mouvement et nous négligeons les courants

ascendants. Donc, notre tétraèdre pourra s'élever si : $P_a > P$. Voici un petit calcul qui nous permet de connaître l'écart de masse volumique minimum qu'il faut pour que notre ballon s'élève :

$$P_a > P \Leftrightarrow \mu_{\text{air ext}} g V > P_{\text{charge}} + P_{\text{air int}} + P_{\text{ballon}} \Leftrightarrow \mu_{\text{air ext}} g V > (m_{\text{charge}} + m_{\text{air int}} + m_{\text{ballon}}) \times g \Leftrightarrow$$

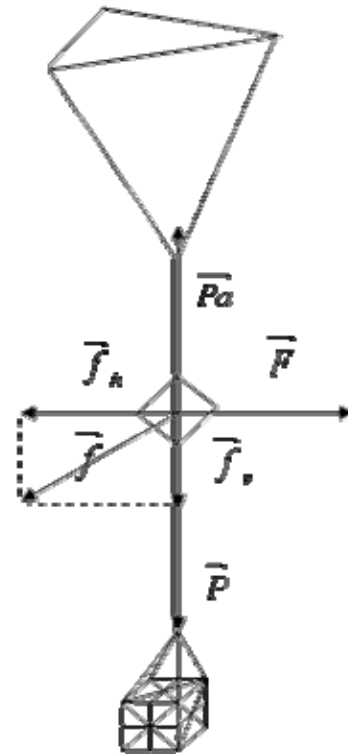
$$\mu_{\text{air ext}} V > m_{\text{charge}} + m_{\text{air int}} + m_{\text{ballon}} \Leftrightarrow \mu_{\text{air ext}} V > m_{\text{charge}} + \mu_{\text{air int}} V + m_{\text{ballon}} \Leftrightarrow$$

$$\mu_{\text{air ext}} - \mu_{\text{air int}} > (m_{\text{charge}} + m_{\text{ballon}})/V$$

Ainsi pour notre chaîne de vol, on obtient : $\mu_{\text{air ext}} - \mu_{\text{air int}} > 4,0/76 = 0,053 \text{ kg.m}^{-3} = \underline{\underline{53 \text{ g.m}^{-3}}}$.



Doc.9 : Chaîne de vol



Doc.10 : Schéma des forces en présence

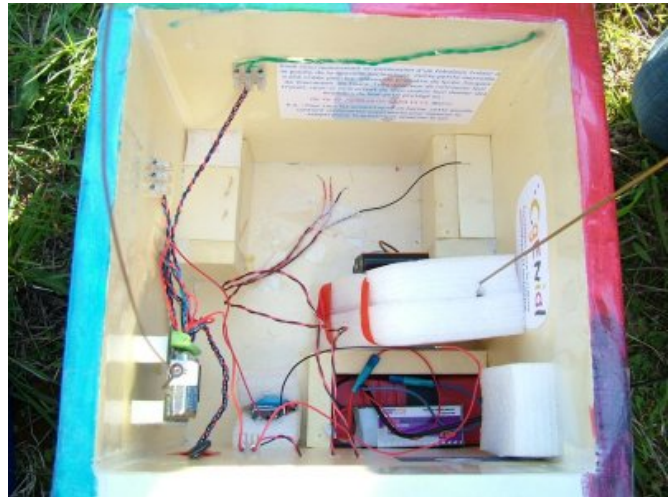
Ainsi pour un écart de masse volumique supérieur à 53 g.m^{-3} , notre chaîne de vol est sensée s'élever.

→ **Ascension de la chaîne de vol** : Une fois que la chaîne de vol s'élève, elle subit également une force de frottement de la forme $f = kv^2$, autrement dit proportionnelle au carré de la vitesse et dépendant de la forme du ballon et de la masse volumique de l'air extérieur à travers la constante k . Nous n'avons pas poussé cette étude plus loin par manque de temps et de connaissance sur cette force de frottement. Peut être un nouvel objectif en terminale...

→ **Pour le mouvement horizontal** : la chaîne de vol est entraînée à la même vitesse que la masse d'air dans laquelle elle se trouve comme nous avons pu le constater précédemment.

b) Mesures réalisées pour l'étude du vol

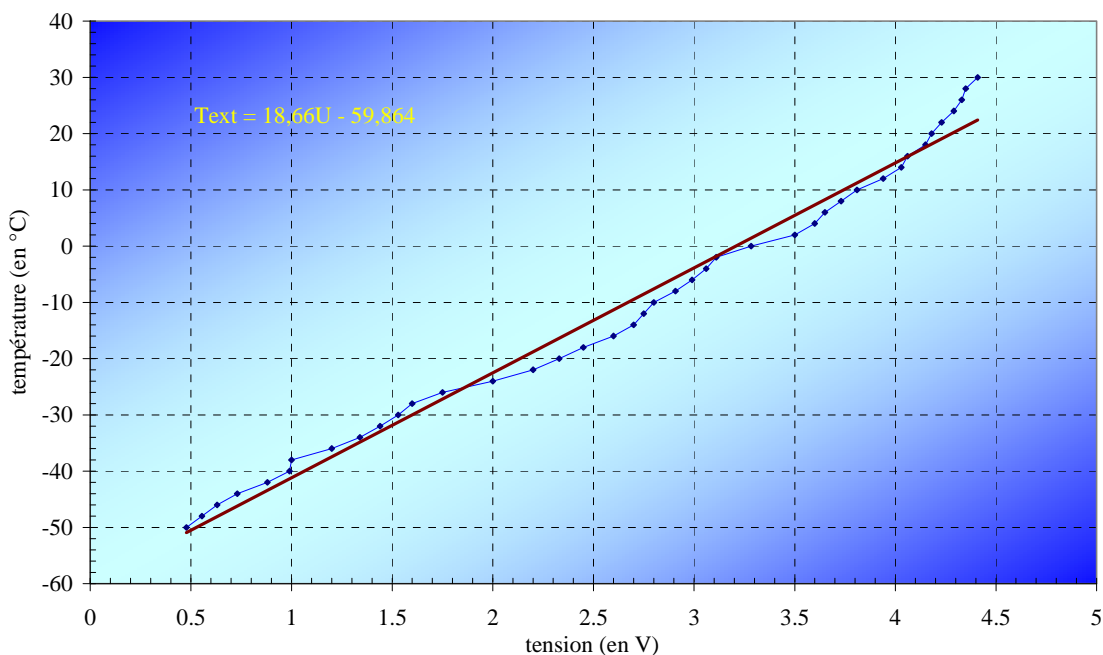
Dans la nacelle, ont été installés des capteurs de grandeurs physiques (pression, températures intérieure et extérieure du ballon, luminosité) dont les mesures seront transmises au sol par un émetteur radio qui nous a été prêté par le C.N.E.S. (Centre National d'Etudes Spatiales) via l'association Planète-Sciences Sarthe. Cet émetteur ne pouvant transmettre que des données sous forme de tensions, nous avons dû étalonner nos capteurs, c'est-à-dire faire correspondre une grandeur physique à une tension comme le montre la courbe



Doc.11 : Intérieur de la nacelle le 15/04/08

d'étalonnage d'un des capteurs températures donnée ci-dessous. Pour plus de renseignements sur nos capteurs et leur étalonnage, vous pouvez visiter notre site Internet : <http://www.vaucanson.org/actions/solaire/experiences/>.

Doc.12 : Courbe d'étalonnage du capteur température extérieure : $\text{Text} = f(U)$



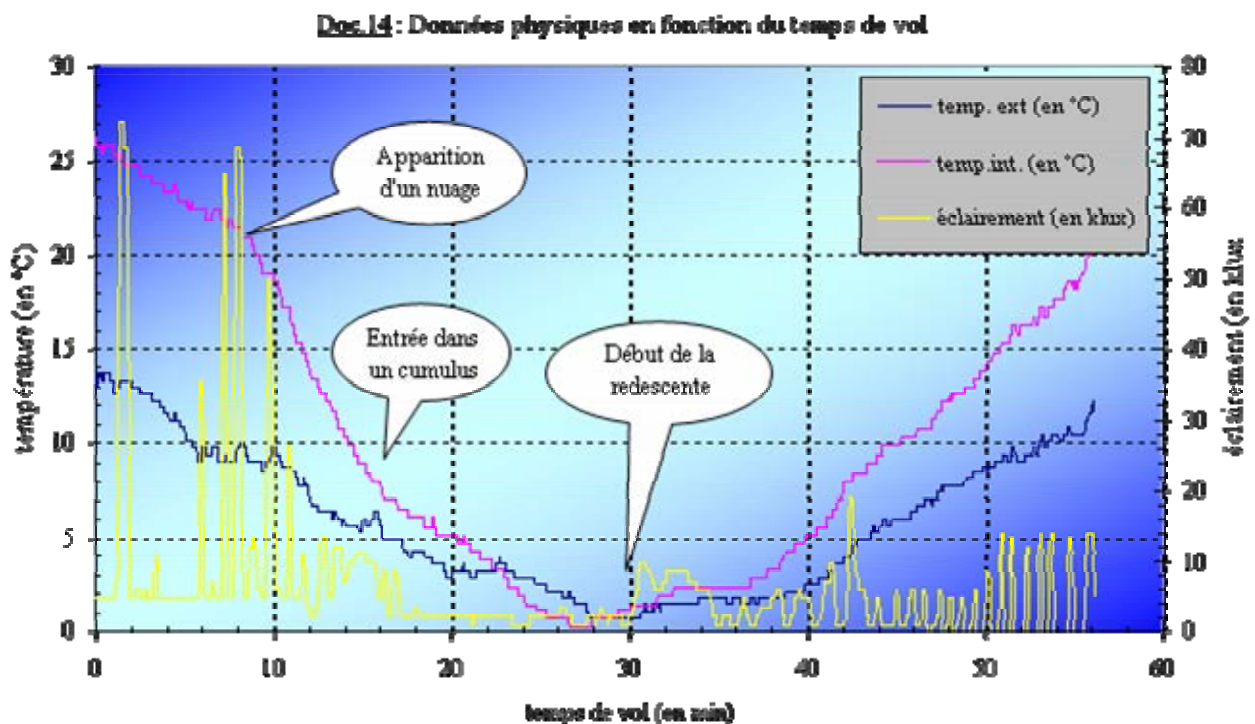
3) Etude du second lâcher

Le second lâcher a eu lieu le 15 avril 2008 à 19h07. Le ballon était sensé retomber à 200 km de Tours dans l'Allier, or il est retombé à seulement 5 km après 1 h de vol. Nous avons pu voir un nuage venir jouer les trouble-fête en s'interposant entre lui et le Soleil seulement 10 minutes après le lâcher.



Doc.13 : Photo de l'horizon prise à 1200 d'altitude

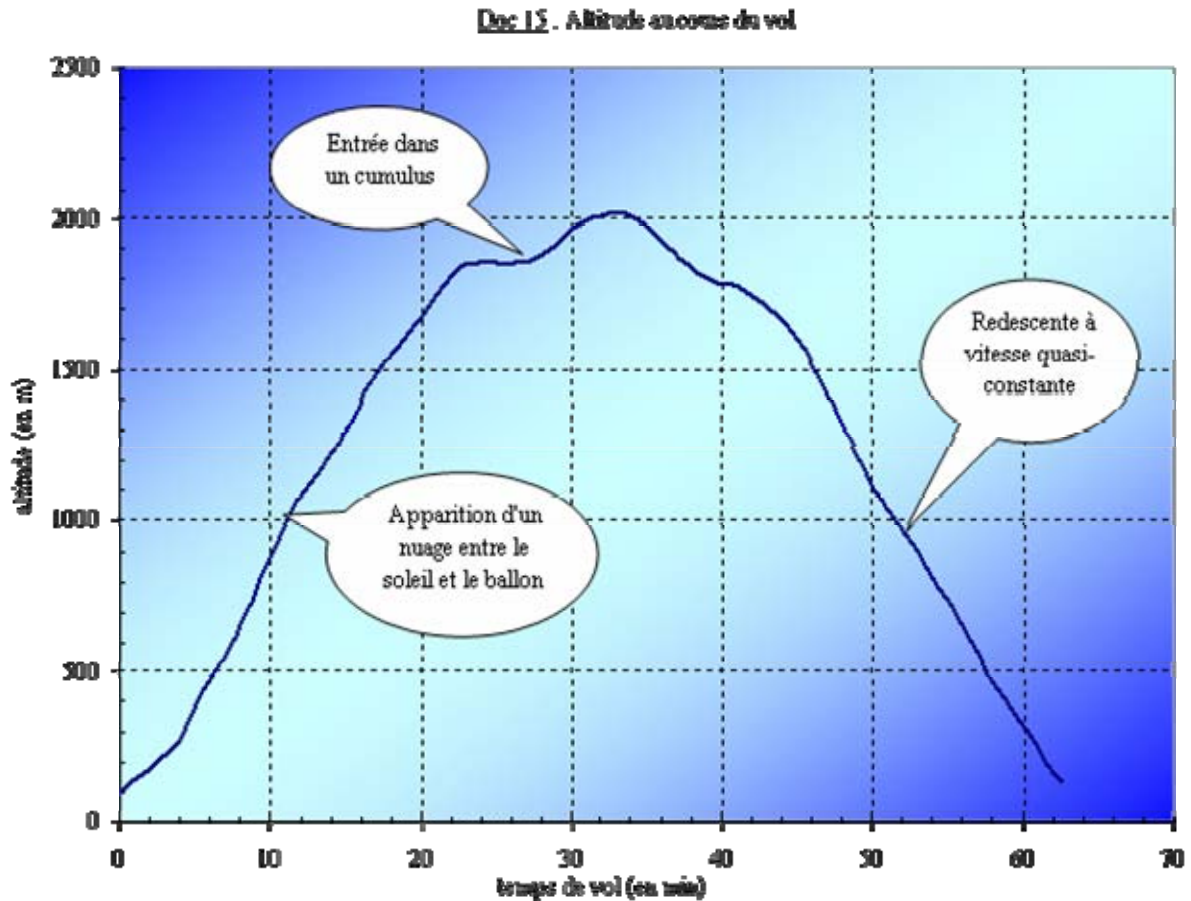
Nous pouvons effectivement le constater sur les courbes ci-dessous (doc.14 et 15) : au bout de 10 minutes de vol, alors que la température intérieure diminue lentement par rapport à la température extérieure grâce au rayonnement solaire important reçu, la diminution de celle-ci s'accroît.



Alors, très rapidement, la différence entre la température extérieure et intérieure n'est plus suffisante pour que l'ascension se poursuive. La chaîne de vol amorce donc son ralentissement comme nous pouvons le constater sur la seconde courbe (doc.15) : le coefficient directeur de la tangente à la courbe diminue. Cependant au bout de 28 min, le ballon subit une nouvelle ascension d'environ 200 m. Les forces avancées précédemment ne permettent pas de l'expliquer, mais comme nous avons pu le voir en direct, le ballon se trouvait sous un autre nuage qui l'a « aspiré ». En

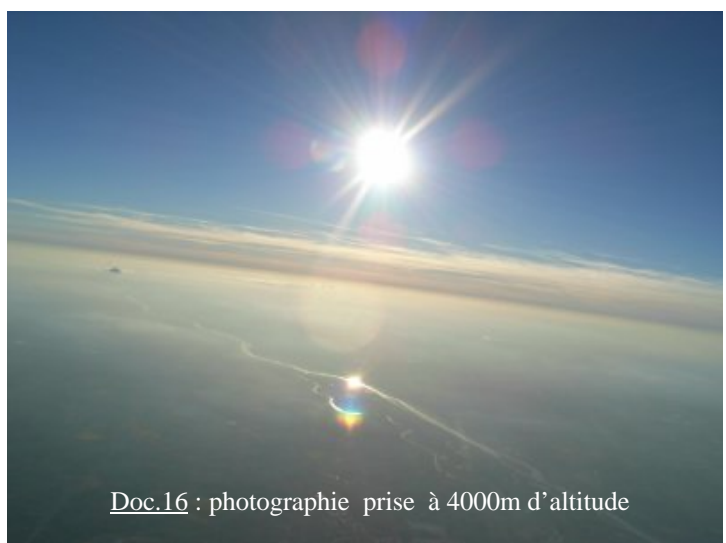
effet, à l'intérieur d'un nuage, il y a des courants ascendants dûs à un phénomène de convection comme ont pu nous l'expliquer les techniciens de Météo France Tours. Alors que ce lâcher sonnait comme un échec, nous avons appris énormément sur les nuages et leur formation :

<http://www.vaucanson.org/actions/solaire/animations/nuages/meteofrancenuage.htm>.



4) Etude du troisième lâcher

Lors du 3^{ème} lâcher, le nombre de capteurs embarqués était maximum : deux températures extérieures, deux températures intérieures (base du ballon, face supérieure), deux capteurs d'éclairement orientés selon l'horizontale, et deux capteurs de pression. Malheureusement, le capteur de température intérieure fixé à 30 cm de la face supérieure du ballon s'est décollé quelques secondes après le décollage et il nous a indiqué une température très voisine de celle extérieure. Nous avons pu le constater lors de la récupération du ballon.



a) Décollage

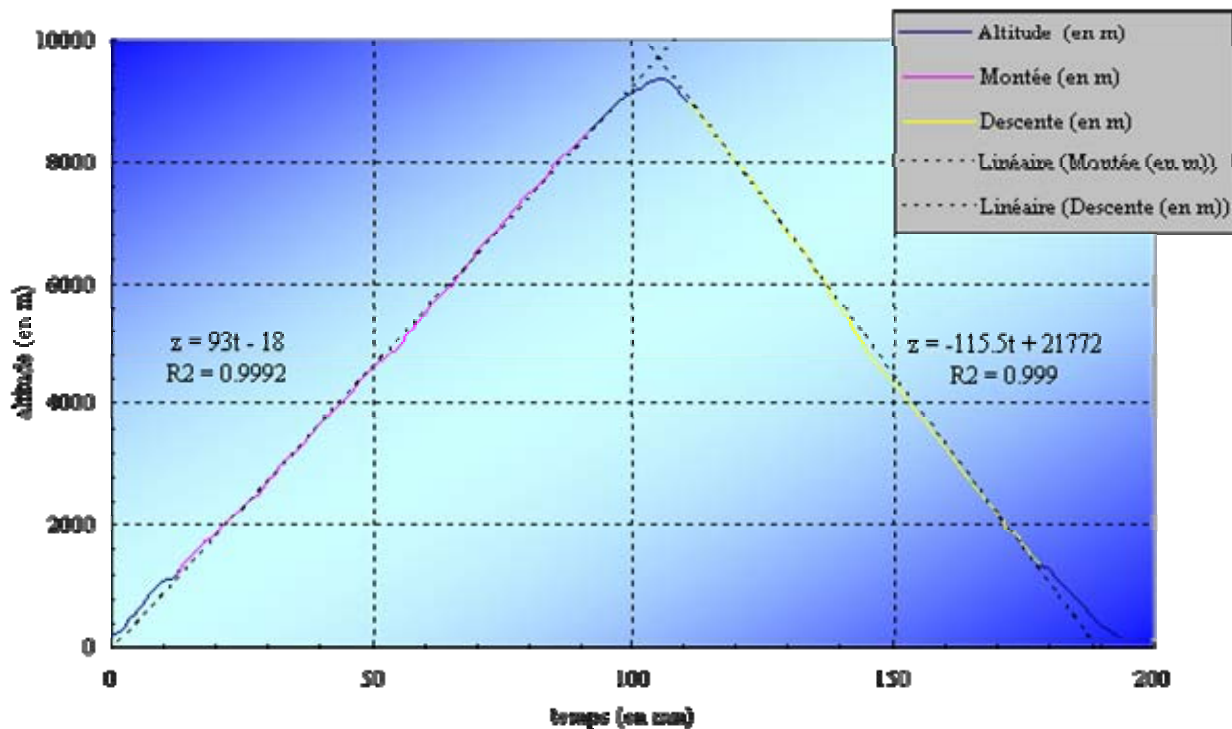
Données au décollage : température extérieure : 18°C ; température intérieure (centre du ballon) : 34°C ; pression atmosphérique : 1018 hPa ,

Ainsi, la masse volumique de l'air intérieur est de 1,15kg.m⁻³, et la masse volumique de l'air extérieur est de 1,22 kg.m⁻³.

Au décollage, nous avons une différence minimale d'environ 70 g.m⁻³ entre l'air intérieur et l'air extérieur. Puisqu'il faut une différence supérieure à 53 g.m⁻³ pour que notre tétraèdre décolle, nous en avons déduit qu'il possédait au décollage une poussée minimale de 17 g.m⁻³, soit environ 13N pour un volume de 76 m³ (et pour ceux à qui les Newton ne parlent pas, 13N équivaut à la force qu'une masse d'un peu moins de 1,3 kg pourrait exercer...).

b) L'ascension

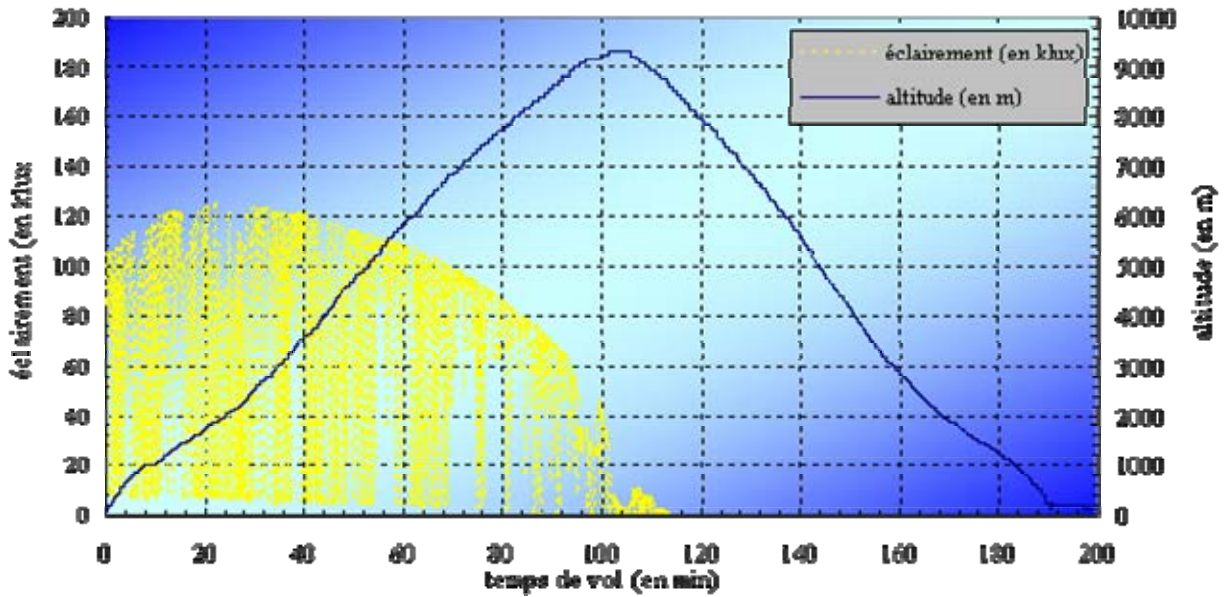
Doc.17 : Altitude et modification au cours du vol



Sur la courbe ci-dessus (doc.17), nous avons représenté l'altitude du ballon donnée par le capteur de pression au cours du vol. Nous pouvons constater que l'ascension de la chaîne de vol se fait à vitesse quasi constante de 93 m.min⁻¹, soit environ 1,5 m.s⁻¹. Même constatation pour la redescente avec une vitesse de 116 m.min⁻¹ soit environ 1,9 m.s⁻¹.

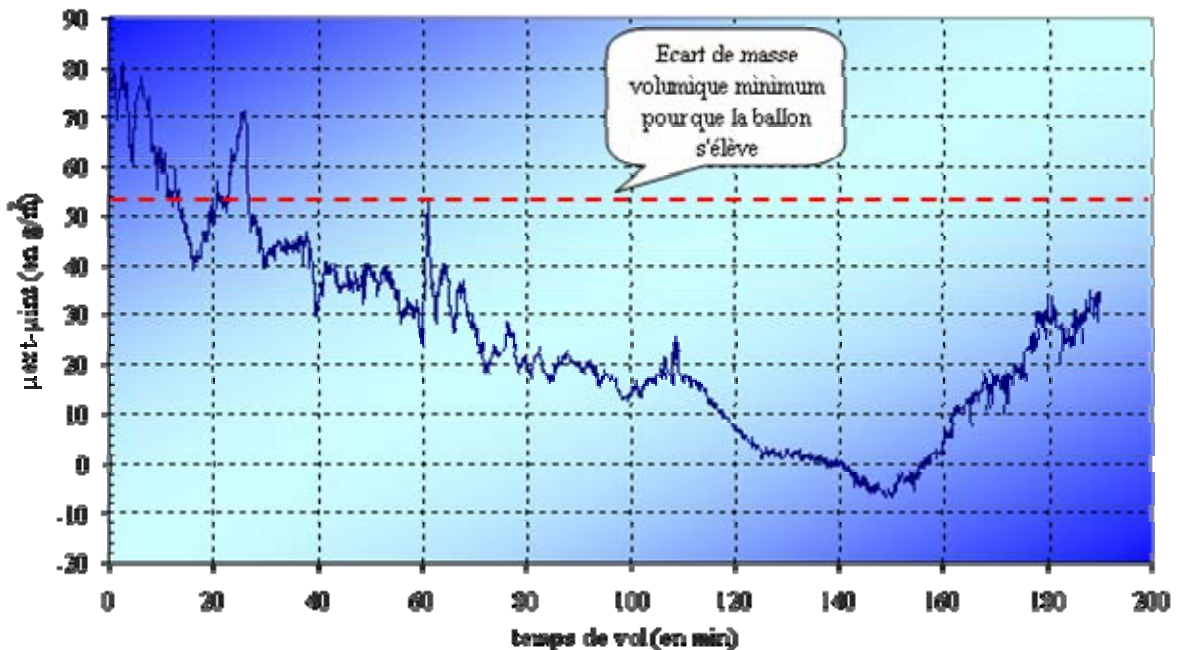
Sur le document ci-dessous (doc.18), où nous avons indiqué altitude et luminosité, nous pouvons constater que le ballon amorce son ralentissement au bout de 80 mn de vol : en effet, à ce moment, la luminosité reçue commence à diminuer fortement : le Soleil décline rapidement alors que le ballon continue son ascension.

Doc.18 - Altitude et luminosité au cours du vol



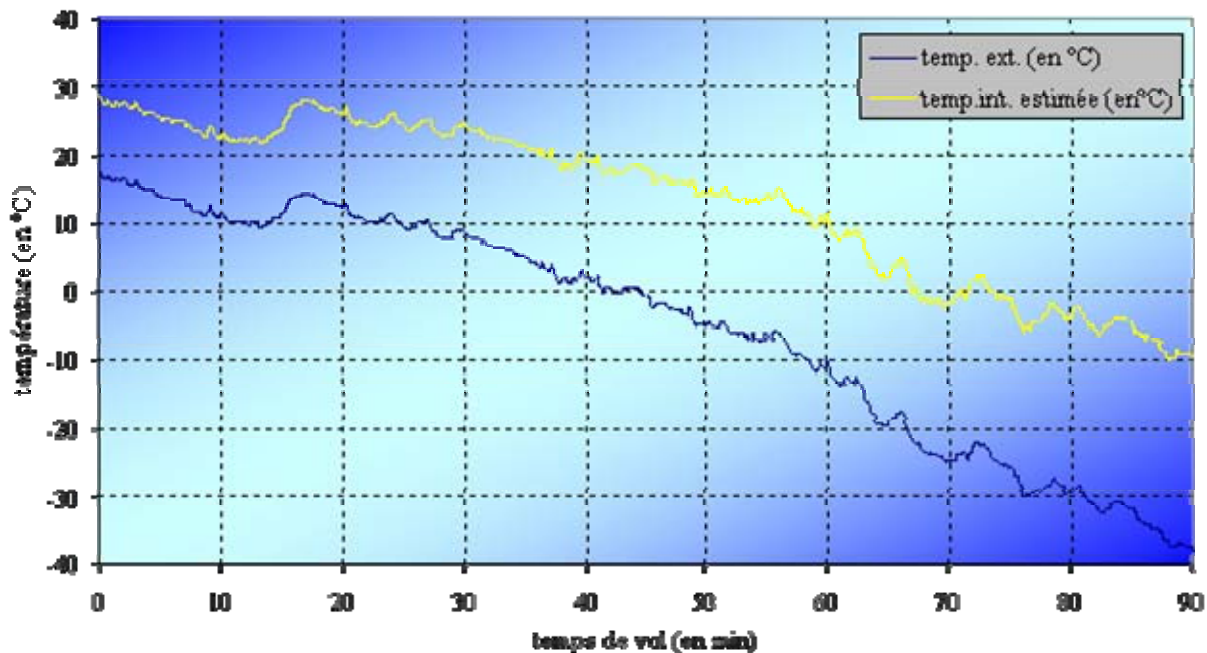
A l'aide des données température extérieure, température au centre du ballon et pression, nous avons calculé l'écart de masse volumique entre l'air extérieur et l'air intérieur au centre du ballon au cours de l'ascension et même lors de la redescente. Cependant, nous avons pu constater, comme le montre le graphique ci-dessous (doc.19), que l'écart ainsi déduit n'est pas suffisant pour justifier l'élévation du ballon tout au long du vol. L'explication est la même que pour nos études au sol : la température intérieure du ballon n'est pas homogène et donc sa valeur moyenne est nettement supérieure à sa valeur au centre du ballon.

Doc.19 : Ecart de masse volumique au cours du vol



Cependant, nous pouvons évaluer la température moyenne minimale à l'intérieure de notre ballon tant qu'il s'élève à vitesse verticale constante ou qu'il accélère car dans ces conditions cela signifie que la poussée d'Archimède est supérieure ou égale au poids et aux frottements réunis. Pour le graphique ci-dessous (doc.20), nous avons calculé la température moyenne à l'intérieure du ballon pour que la poussée d'Archimède compense le poids de la chaîne de vol. Cette température est donc à tout moment un minimum car viennent s'ajouter des frottements. Nous constatons donc qu'au fur et à mesure que la chaîne de vol s'élève, l'écart de température doit augmenter. En effet, la pression diminue et ceci de façon plus significative que la température extérieure, donc la masse volumique de l'air diminue d'après la relation donnant la masse volumique obtenue dans notre première partie. Au bout de 80 min de vol, alors que le ballon se trouve à environ 8000m d'altitude, le gradient de température doit être de plus de 25°C.

Doc.20 : Température intérieure minimale au cours de l'ascension



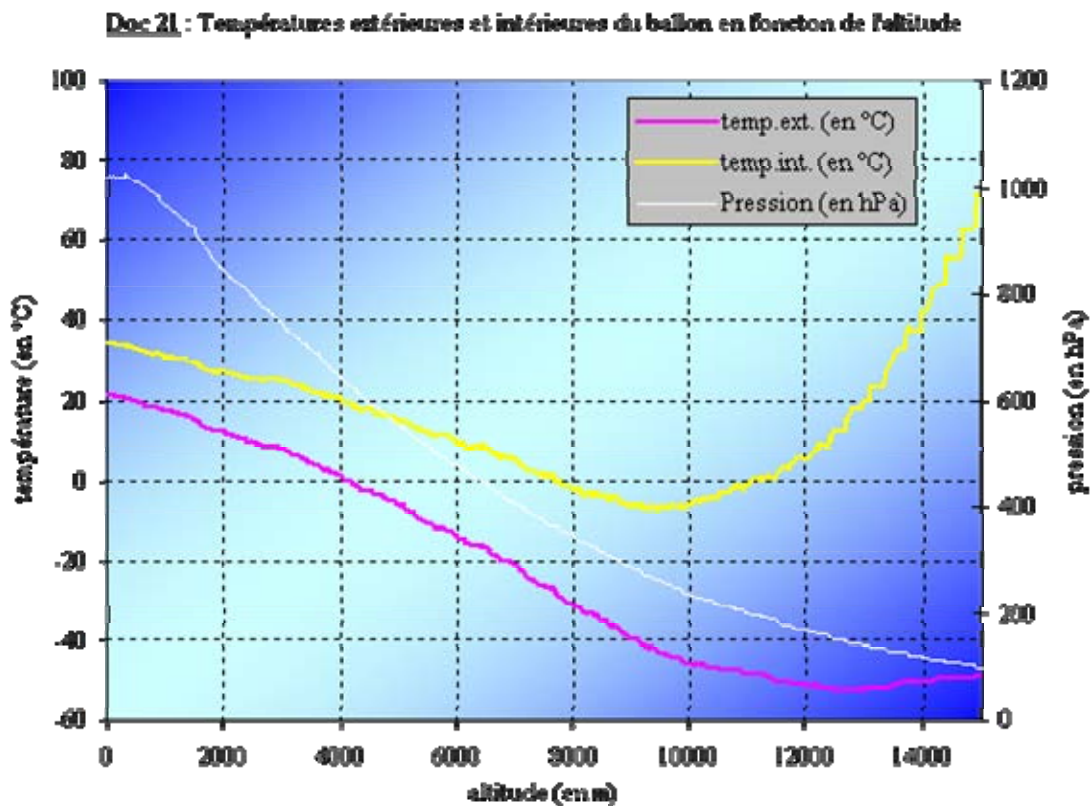
5) Perspectives

Il reste plusieurs questions auxquelles nous n'avons pas répondu, et deux en particulier :

→ Quelle est la température atteinte au niveau des parois du ballon qui font face au Soleil ? Elle doit être très élevée pour que la moyenne permette au ballon de s'élever. Ainsi il faudrait installer plus de deux capteurs température intérieure : pourquoi pas garder celui du centre, un très près de la face supérieure, mais également en coller un sur chacune des trois autres faces du tétraèdre car une seule est éclairée à la fois.

→ Jusqu'à quelle altitude notre ballon peut s'élever ? En effet, jusqu'ici, nous avons décidé de lâcher le ballon en fin de journée, deux heures maximum avant le coucher du Soleil, pour pouvoir le suivre en voiture et ne pas faire trop de chemin. Cette altitude dépend bien sûr de la charge emportée et du rayonnement reçu. En diminuant la masse de la charge et en lâchant le ballon quatre heures avant la tombée de la nuit nous devrions pouvoir atteindre une altitude

maximale. Sur les courbes ci-dessous (doc.21), en récupérant les données de pression et de température extérieure que nous avons obtenu l'an dernier en lâchant un ballon sonde, nous avons calculé et tracé la température extérieure moyenne qui devrait régner dans le ballon pour qu'il s'élève jusqu'à 15000m.



Remarquons simplement que lors de notre premier lâcher, le ballon est monté jusqu'à une altitude 11 670 m. D'après ces résultats, l'écart de température aurait atteint plus de 50°C, avec une température extérieure voisine de -50°C et une température intérieure de 0°C. Notons que pour que le ballon s'élève à 15 000 m, la différence de température doit atteindre 120°C : cela semble difficilement possible. Il est donc probable que dès le premier lâcher, compte tenu de la charge attachée à notre ballon, il a presque atteint son altitude maximale. Il faudra donc limiter la charge pour diminuer cet écart de température nécessaire à l'élévation du ballon.

Nous aimerions refaire un lâcher pour pouvoir répondre à ces deux questions. Un lâcher est très probable le 24 août 2008 à Amboise au milieu des montgolfières lors d'un meeting aérien auquel nous avons été invités.

Conclusion

Pour conclure, en effet, les ballons solaires ont un coût de revient moins important que les ballons gonflés à l'hélium que ce soit pour l'enveloppe ou surtout pour le gaz utilisé. Cependant, leur utilisation nécessite des conditions météorologiques spécifiques comme la quasi absence de vent au sol et un ciel dégagé. Nous avons pu en faire les frais lors de quelques-uns de nos essais avec des cordages qui ont cédé à cause du vent ou une retombée à 5 km du lâcher au lieu de 200 km prévus, suite à l'apparition d'un cumulus...

Son utilisation peut être envisagée sur la banquise où la réverbération due à la neige est importante et la température extérieure très faible. Il pourrait alors transporter des charges à un coût moindre (50 € pour un ballon pouvant soulever une charge de 100 kg).

Aujourd'hui, l'ARCA, association aéronautique et aérospatial roumaine, créée en 1999 qui développe de nouvelles technologies aérospatiales en vue de vol spatiaux privés et habités, réalise des essais avec ce genre de ballon dans le but d'envoyer des satellites légers ou des capsules habités. En effet, un ballon solaire volumineux (de plus de 350 000m³ pour le prochain), doit emporter au cours de mois de juin à plus de 22 000 m d'altitude une capsule qui pourrait être habitée. A cette altitude, la résistance due aux frottements de l'air est moindre et ne pose plus de problème (rappelons que pour la fusée Ariane, le premier étage qui permet de passer l'atmosphère terrestre pèse 350 tonne sur un total de 400 tonnes).

Les ballons solaires pourraient donc avoir un avenir certain, compte tenu de leur faible coût et de leur aspect écologique.

Remerciements :

Nous tenons à remercier toutes les structures qui ont permis à ce rêve de devenir réalité : la fondation C.Génial, Sciences à l'Ecole, la Région Centre, la Maison des Lycéens pour leur aide financière, Le REF 37 et Météo France Tours pour leur apports techniques ou théoriques. Enfin un grand merci à l'équipe administrative et éducative du Lycée Vaucanson et notamment à notre professeur de Physique-Chimie pour son soutien.