

Rapport de stage facultatif
Licence 1 de Physique
Centre de Ressources en Physiques
de l'Université de Bordeaux

Lioni-Moana BOURGUINAT - Romane COLOGNI
Rédigé par Lioni-Moana BOURGUINAT

Du 4 au 29 juin 2018

Sommaire

1	Présentation du stage	6
1.1	Présentation du Centre de Ressources en Physiques A1	6
1.2	Présentation du matériel et objectif du stage	6
1.3	Méthode générale	6
2	Travail effectué	7
2.1	GPS	7
2.2	Muons	14
2.3	Pression	20
2.4	Température	22
2.5	Accélération	27
2.6	Temps	29
2.7	Vitesse	31
3	Résultats du stage	34

Remerciements

À l'issue de ce stage, je tiens à remercier mon maître de stage, M. Denis DUMORA, pour sa réactivité pendant ces quatre semaines (et même pendant les vacances, pour répondre à mes questions sur le langage \LaTeX pour la rédaction de mon rapport), ses explications de la physique des particules et pour m'avoir permis d'approcher des nouvelles méthodes de penser le codage et les données.

Je remercie aussi Mathias GERBAUX et Marie-Hélène GRONDIN pour leurs conseils précieux sur les stages facultatifs de L1.

Je souhaite remercier mon tuteur Frédéric PERROT, pour l'aide qu'il m'a apporté quand aux démarches administratives.

Enfin, je remercie l'équipe du CRPhy A1 pour avoir donné l'accès aux salles de calcul à ma carte d'étudiant. Cette attention portée a été très valorisante et m'a aidé à être à l'aise.

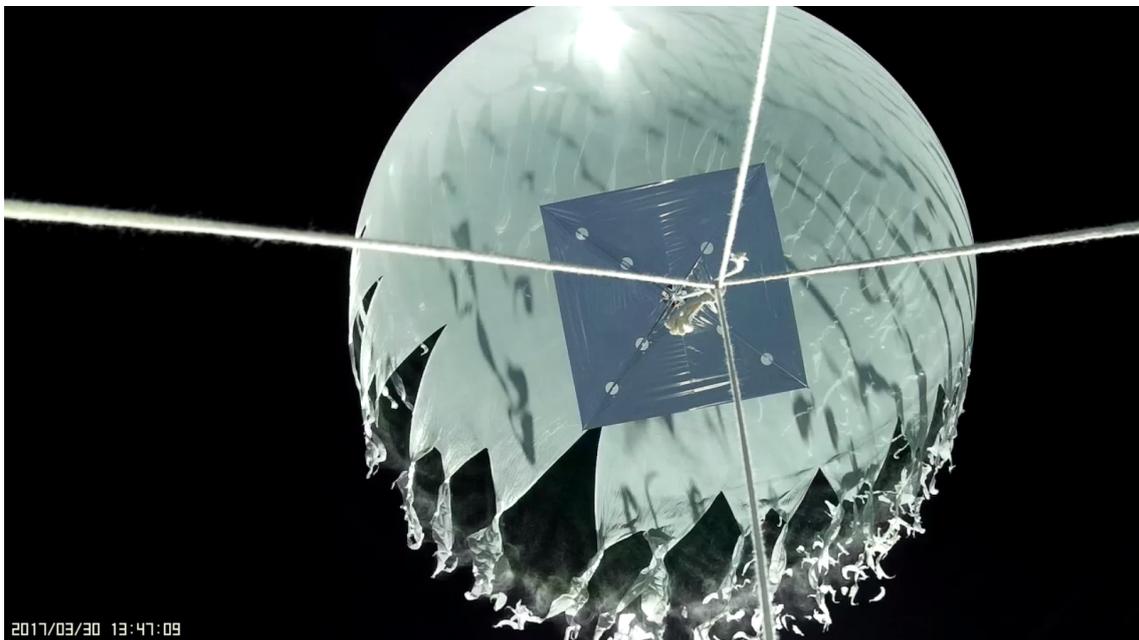


FIGURE 1 – Éclatement du ballon par la caméra TOP

Chapitre 1

Présentation du stage

1.1 Présentation du Centre de Ressources en Physiques A1

Le Centre de Ressources en Physique (CRPhy) est un groupe de l'Université de Bordeaux qui gère les expériences et l'informatique dédiées à la physique. Il est dirigé par Jérôme DEGERT, et compte un secrétaire et plusieurs techniciens. Le CRPhy est actif sur trois bâtiments du campus Sciences et Technologies : le A1, le A22 et l'Institut d'Optique d'Aquitaine (IOA).

Le stage s'est déroulé au premier étage du CRPhy A1 dans une des salles équipées de machines de calcul. Ce matériel, ainsi que celui des autres salles de TP et de calcul du premier étage est initialement destiné aux filières L3 et Master 1 et 2 en Physique.

M. Denis DUMORA, notre maître de stage, travaille au Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux-Gradignan (CENBG) dans le groupe Astroparticules en tant que Professeur des Universités. Il est aussi responsable de la mention Master Physique de l'Université de Bordeaux, et dans le cadre de cette partie de son métier, il utilise souvent les locaux du CRPhy A1.

1.2 Présentation du matériel et objectif du stage

Dans le cadre d'un projet instrumental de Master 1 Parcours Pro-CUCIPhy (Conception, Utilisation et Commercialisation de l'Instrumentation en Physique) qui forme des étudiants en ingénierie à développer et vendre des instruments de haute technologie, encadré par M. Denis DUMORA, une nacelle équipée de différents instruments de mesure a été accrochée à un ballon stratosphérique. Cet ensemble a décollé depuis un parking sur le campus du collège Sciences et Technologies de l'Université de Bordeaux à Talence le 30 mars 2017. À son bord étaient embarqués :

- un GPS
- trois caméras (une dirigé vers le bas de la nacelle, une vers l'horizon, et une vers le ballon),
- un accéléromètre,
- deux thermomètres (un à l'intérieur de la nacelle, un à l'extérieur),
- un manomètre,
- un détecteur de muons.

Chaque capteur a enregistré des données pendant la durée du vol. Cependant, du fait de la date tardive de la récupération du ballon, l'exploitation des données par les étudiants du Master a été assez limitée.

L'objectif de ce stage est de déduire des différents fichiers de données le plus d'événements et d'éléments physiques. Pour ce faire, nous utilisons le module Spyder du logiciel Anaconda pour la programmation en langage Python 3.

1.3 Méthode générale

Notre méthode générale est de :

- tracer les courbes brutes à partir des fichiers de données recensant les données,
- repérer les valeurs aberrantes des fichiers de données pour les exclure,
- déduire des informations des courbes,
- corréler les valeurs des différentes courbes pour obtenir des lois générales,
- comparer les résultats à la bibliographie disponible.

Chapitre 2

Travail effectué

2.1 GPS

2.1.1 Tracé des courbes

À la première ouverture du fichier GPS, le constat est que les valeurs valides n'ont été prises qu'à partir d'un certain temps, après le décollage. Les coordonnées du parking à partir duquel le ballon a été lancé sont obtenues grâce à un repérage sur Google Maps. Aucun problème ne découle de ce délai d'allumage, car il n'y a pas de décalage du temps par rapport aux valeurs. La première valeur du fichier GPS n'est pas notée comme correspondant à $t = 0s$. Le fichier texte du GPS comporte quatre données : la latitude, la longitude, l'altitude et le temps. Tout d'abord, les trois grandeurs sont tracées en fonction du temps.

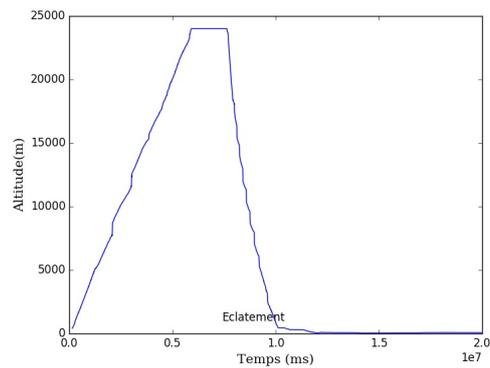


FIGURE 2.1 – Altitude en fonction du temps

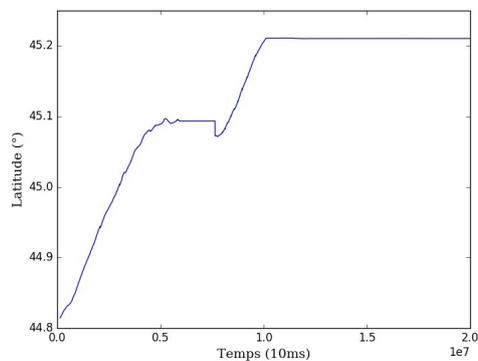


FIGURE 2.2 – Latitude en fonction du temps

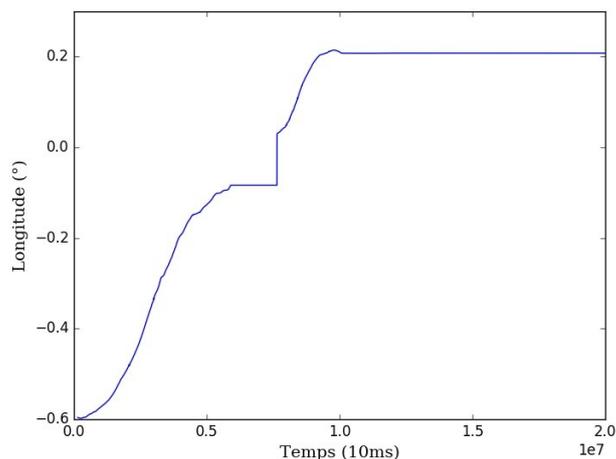


FIGURE 2.3 – Longitude en fonction du temps

Ces courbes renseignent sur la durée approximative du vol d'environ $1.0 \times 10^7 ms$ et montrent qu'un brouillage des données a été subi par le GPS au milieu du vol. Ce brouillage cache la trajectoire totale du vol et le moment d'éclatement du ballon. De plus, sur la courbe d'altitude à des moments précis, le ballon monte et descend plus vite qu'en moyenne. *Une explication est que ces variations de vitesse sont dues à des courants d'air chauds qui auraient emporté le ballon plus vers le haut.*

Pour connaître la projection sur une carte du trajet du ballon en l'air, la latitude en fonction de la longitude est tracée. Sur la période où le GPS est brouillé, le ballon a suivi un trajet qui semble étrange, car au lieu de poursuivre son mouvement vers le Nord progressivement, il dévie vers le Sud. *Des courants d'air violents peuvent avoir perturbé le ballon dans sa trajectoire.*

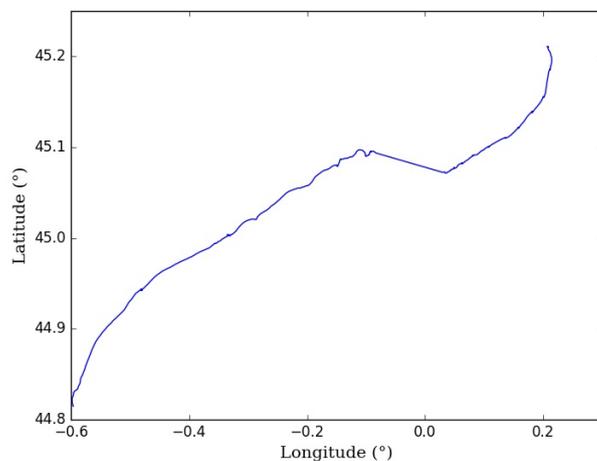


FIGURE 2.4 – Latitude en fonction de la longitude

Cette incompréhension renforce le besoin de connaître la trajectoire du ballon sur la partie brouillée du document GPS.

La fonction `curve_fit` du module `Pylab` sur `Python` aide à déterminer la trajectoire du GPS en altitude. Lors des essais pour créer des courbes polynomiales (suivant l'analyse de la trajectoire de la nacelle en chute libre selon la Seconde Loi de Newton) de nombreuses difficultés sont rencontrées. La droite est approximée à deux droites affines (une pour l'ascension et une pour la chute). Deux ajustements linéaires convaincants sont obtenus en se servant de certaines parties de la courbe pour calibrer la fonction `curve_fit`.

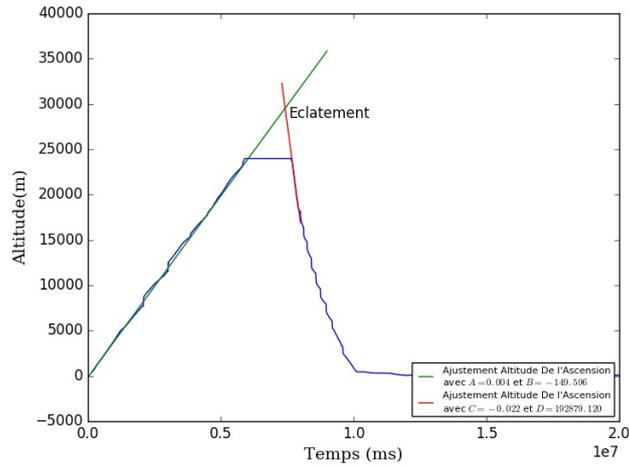


FIGURE 2.5 – Altitude en fonction du temps avec extrapolation

Pour remplacer les valeurs brouillées par celles données par régression linéaire, ce code qui crée deux fonctions pour les deux régressions linéaires est utilisé.

```

37 #####
38 #Détermination de l'altitude et du temps de l'altitude
39 #####
40
41 [A,B]=[-0.022,192879.120]
42 [C,D]=[0.004,-149.596]
43
44 def altitude_chute(xchute):
45     return A*xchute+B
46
47 def altitude_ascension(xascension):
48     return C*xascension+D
49
50 for line in F:
51     ligne=line.split(' ')
52     temps1.append(float(ligne[3]))
53     altitude1.append(float(ligne[2]))
54
55 replace_list=[]
56
57 for t in temps1:
58     if 6030000<float(t)<7423700:
59         replace_list.append(float(altitude_ascension(float(t))))
60     elif 7423000<=float(t)<=7940000:
61         replace_list.append(float(altitude_chute(float(t))))
62
63 for i in enumerate(temps1):
64     if ((temps1[i[0]]-6030000)*(temps1[i[0]+1]-6030000)<0):
65         index1=i[0]
66         break
67
68 altitude1[index1:index1+len(replace_list)]=replace_list

```

FIGURE 2.6 – Capture d'écran du programme de détermination d'altitude par régression linéaire

Ce programme sera recopié pour retrouver les approximations linéaires dans d'autres codes qui nécessiteront un traitement de l'altitude.

Dès la construction en 3D du trajet, ce programme est ajouté au code de base pour éviter le brouillage et obtenir une courbe proche des attentes.

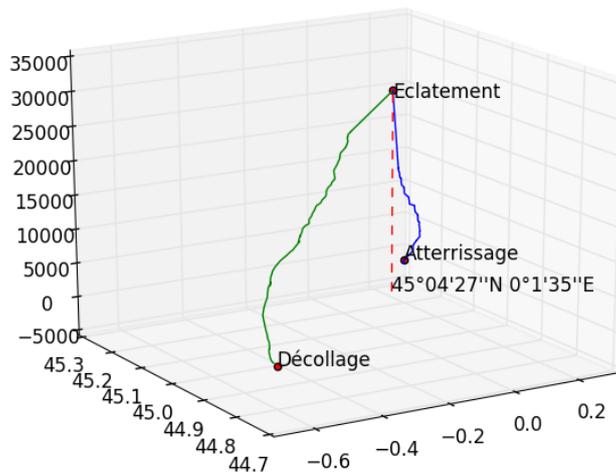


FIGURE 2.7 – Trajet du ballon en 3D avec régression linéaire

Suite à l'étude en détail de cette courbe, la conclusion est que l'approximation lors de l'ascension n'est pas parfaite, car elle ne prend pas en compte les nombreux courants d'air qui perturbent la trajectoire de la nacelle juste avant le brouillage. Comme aucune information très précise sur les mouvements de vent que subissait le ballon n'existe, il est impossible de les simuler dans la régression. En revanche, l'approximation pour la chute se rattache bien aux valeurs du GPS, ce qui la rend réaliste.

2.1.2 Incertitudes

Après avoir tracé ces différents trajets, les incertitudes sont ajoutées aux données d'altitude, pour voir à quel point les altitudes sont cohérentes. Les incertitudes peuvent être ajoutées au graphe via la fonction `errorbar` de la bibliothèque Matplotlib sur Python. La fonction choisie pour les déterminer est la suivante :

$$\sigma = \sqrt{\text{Moyenne}(\text{Valeurs}^2) - \text{Moyenne}(\text{Valeurs})^2}$$

Avec "Moyenne" la moyenne glissante sur 30 valeurs de la grandeur concernée. Une moyenne glissante sur 10 valeurs écrite à la main existe déjà, or pour 30 valeurs, il est plus simple d'utiliser une fonction. Le nombre de 30 valeurs est choisi car il permet un compromis entre un lissage efficace, et une conservation des nuances de la courbe.

```
def moyenne_glissante(a,n):
    b=np.cumsum(a,dtype=float)
    b[n:]=b[n:]-b[:-n]
    return b[n-1:]/n
```

FIGURE 2.8 – Capture d'écran de la fonction "moyenne glissante"

Cette fonction permet de sélectionner les valeurs d'un tableau, puis lors de chaque étape, ajoute une valeur après et supprime la première valeur. Cette méthode est beaucoup plus rapide que celle des sommes pour des grands tableaux ou pour des grands nombres, car elle nécessite moins d'étapes à l'ordinateur.

Appliquée à l'altitude, cette méthode donne des incertitudes qui sont aux alentours de 50m.

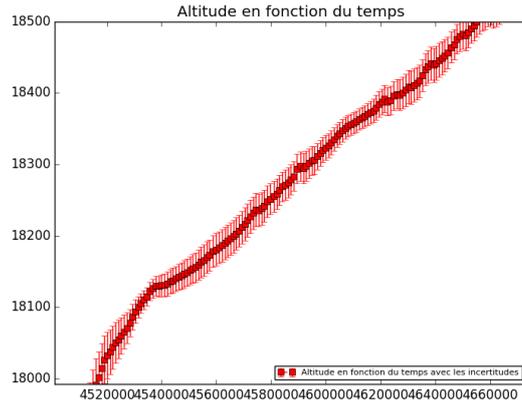


FIGURE 2.9 – Zoom sur la courbe de l’altitude avec les incertitudes

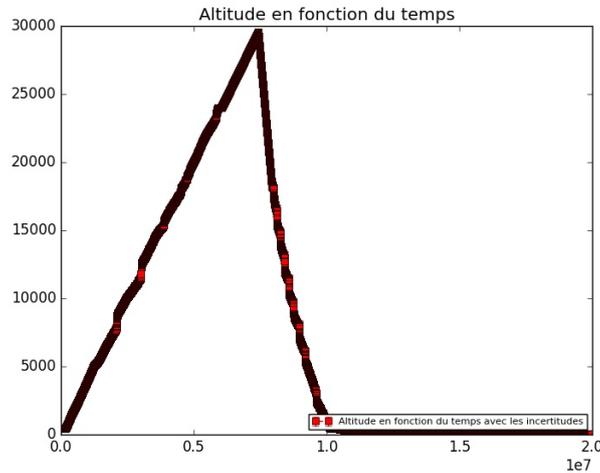


FIGURE 2.10 – Courbe de l’altitude avec incertitudes

2.1.3 Projection sur Google Maps

Le codage de la trajectoire du ballon sur Google Maps et la détermination des points importants du trajet, est rendue possible par le module GMaps. Jupyter, qui utilise le navigateur, permet la visualisation la trajectoire du ballon interactivement sur Google Maps et la détermination précise des points importants du trajet. Des marqueurs correspondent à ces points (dans l’ordre chronologique) :

- décollage de la nacelle,
- démarrage des valeurs du GPS,
- début du brouillage des valeurs,
- éclatement,
- fin du brouillage,
- arrêt des caméras.

À ces marqueurs sont associés le nom de l’événement, les coordonnées et le moment d’occurrence en horaire civil. À chaque point, une couleur est attribuée, allant du bleu pour les altitudes faibles, en passant par le vert et le jaune, jusqu’au rouge pour les altitudes plus élevées. Les coordonnées du point de décollage sont saisies à partir de Google Maps. Le point d’atterrissage correspond à l’endroit où la nacelle a été récupérée par un des membres de l’équipe de lancement du ballon.

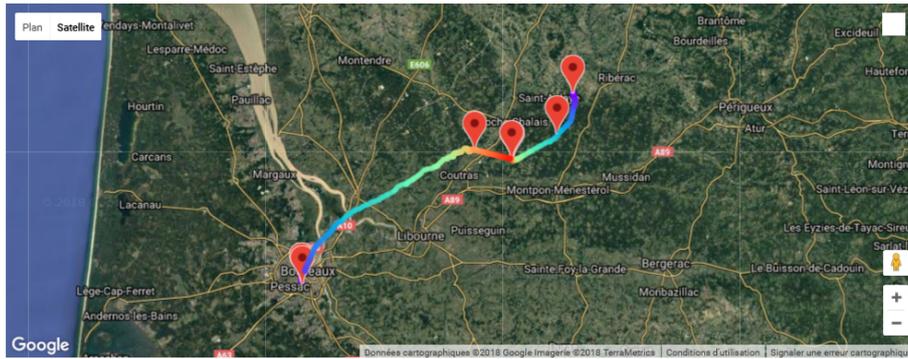


FIGURE 2.11 – Projection du trajet du ballon sur Google Maps

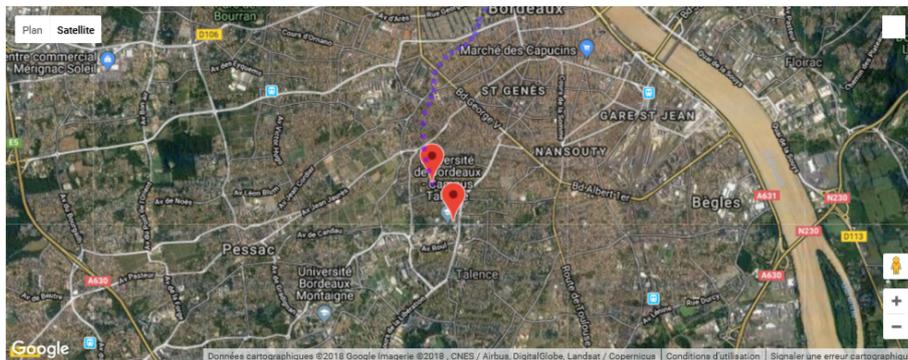


FIGURE 2.12 – Projection du décollage du ballon sur Google Maps

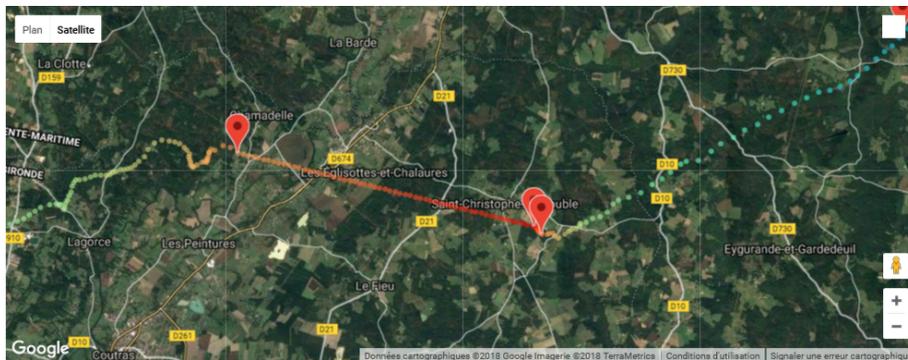


FIGURE 2.13 – Projection de la régression linéaire sur l'altitude du ballon sur Google Maps

Dans le code Python, deux fonctions permettent de générer des listes avec les valeurs d'altitude, longitude et latitude à partir de certaines coordonnées du fichier GPS. Les valeurs brouillées sont remplacées par celles qui viennent d'être créées.

```

def coord_ascension(t):
    return a_lat_1*t+b_lat_1,a_long_1*t+b_long_1,
def coord_chute(t):
    return a_lat_2*t+b_lat_2,a_long_2*t+b_long_2,

for t in temps:
    if t_GPSOFF_start<float(t)<t_eclatement:
        replace_list.append(float(altitude_ascension(float(t))))
        lat,long = coord_ascension(t)
        replace_listla.append(lat)
        replace_listlo.append(long)

    elif t_eclatement<=float(t)<=t_GPSOFF_stop:
        replace_list.append(float(altitude_chute(float(t))))
        lat,long = coord_chute(t)
        replace_listla.append(lat)
        replace_listlo.append(long)

for i in enumerate(temps):
    if ((temps[i[0]]-t_GPSOFF_start)*(temps[i[0]+1]-t_GPSOFF_start)<=0):
        index1=i[0]
        break

altitude[index1:index1+len(replace_list)]=replace_list
longitude[index1:index1+len(replace_listlo)]=replace_listlo
latitude[index1:index1+len(replace_listla)]=replace_listla

```

FIGURE 2.14 – Capture d’écran de la fonction altitude, longitude et latitude

2.1.4 Conclusion du GPS

Les valeurs de l’altitude correspondent à ce qui est attendu, en dépit de la création des valeurs lors du brouillage (qui n’est en aucun cas dépendant de la mesure en elle-même ou du codage du GPS). Le seul point encore trouble dans les valeurs est le décalage en latitude de la trajectoire du ballon, qui ne peut être compris à cause du brouillage.

2.2 Muons

2.2.1 Tracé des courbes

La courbe brute obtenue en plaçant toutes les valeurs du document de données est la suivante.

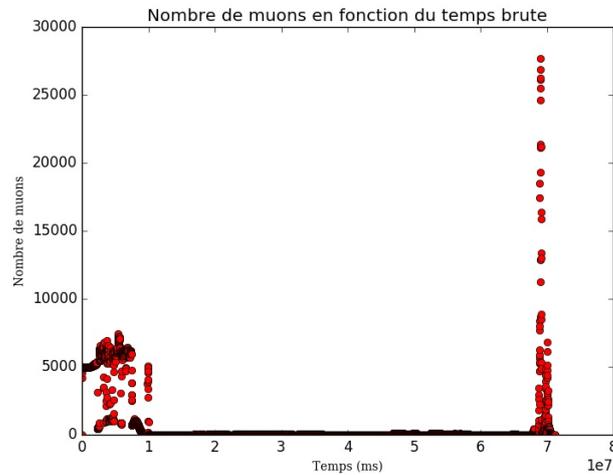


FIGURE 2.15 – Nombre de muons en fonction du temps (courbe brute)

À partir de ce qui est observable sur la durée du vol grâce à l'étude des documents de l'altitude, les valeurs dépassant les $1.1 \times 10^7 ms$ sont éliminées. En effet, à cette valeur, le ballon est déjà tombé, et le grand pic de la fin est plus un artefact électronique qu'un vrai élément physique cohérent. Pendant la partie du vol, les données forment la courbe suivante.

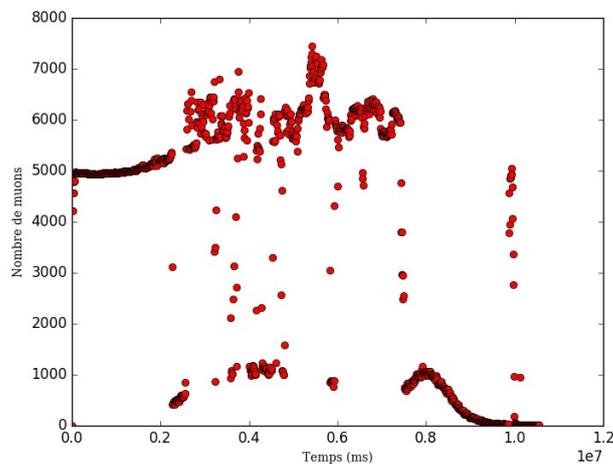


FIGURE 2.16 – Nombre de muons en fonction du temps (courbe intermédiaire)

Cette courbe peut être divisée en trois parties. La première, de $0 \times 10^7 ms$ à $0.2 \times 10^7 ms$ est très claire, et montre une augmentation dans le nombre de muons très nette et continue. En revanche, la deuxième partie, de $0.2 \times 10^7 ms$ à $0.75 \times 10^7 ms$ est plus chaotique, avec des valeurs à la fois aux alentours de 6000 muons et 1000 muons. L'explication à cette dissociation est très certainement un problème électronique. La dernière partie, de $0.75 \times 10^7 ms$ à $1 \times 10^7 ms$ est très lisse et claire et retombe à environ 1 muon par seconde au moment où la nacelle est proche du sol. On peut noter un pic au moment précis où la nacelle a heurté le sol. Ce pic est dû au choc des composants électroniques entre eux au moment de l'impact avec le sol.

La fin de la courbe est très précise et montre des valeurs en accord avec ce qui est connu (pour une petite surface de quelques centimètres carré, au niveau du sol, on peut détecter environ 1 muon par seconde). Une

conclusion serait que le matériel a donné des valeurs aberrantes pendant la première et la deuxième partie, or le fait que la première partie ressemble à la troisième pousse à penser qu'à cause d'un problème de capteur, environ 5000 muons en trop sont détectés à chaque valeur. En conséquence, la valeur totalement arbitraire de 5000 est retirée à chaque valeur de nombre de muons supérieure à 5000, et cette courbe est obtenue :

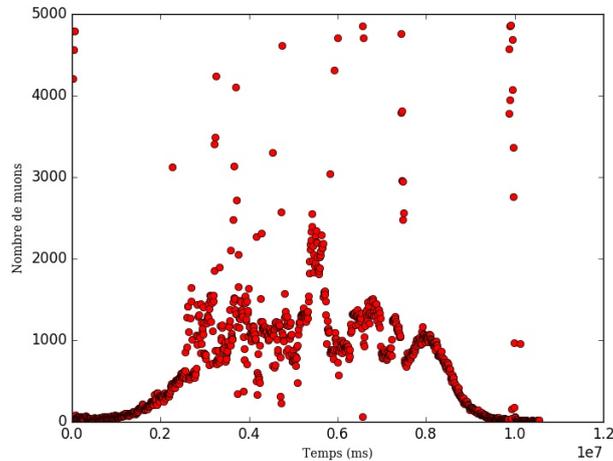


FIGURE 2.17 – Nombre de muons en fonction du temps (courbe intermédiaire 2)

Suite à l'obtention de cette courbe, les valeurs qui s'éloignent trop de l'allure globale sont ôtées de la courbe, comme le grand pic à $0.6 \times 10^7 ms$, qui apparaît sur les temps avant la chute ($0.75 \times 10^7 ms$), mais pas après. La hauteur du bug électronique du pic de l'atterrissage est réduite, sans pour autant être effacée, car le temps de trajet qu'il propose est proche de celui que nous obtenons avec les fichiers du GPS et constitue un indice important pour le moment de la chute. La courbe finale du nombre de muons en fonction du temps est donc plus claire :

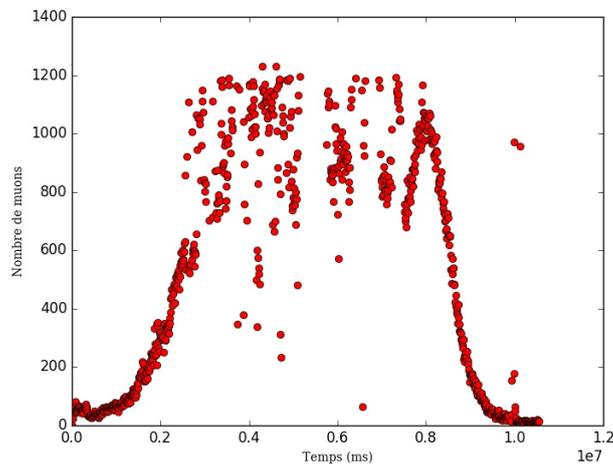


FIGURE 2.18 – Nombre des muons en fonction du temps (courbe finale)

La courbe est enfin lisse sur toute sa longueur avec des valeurs régulières. *Pour expliquer le fait qu'il y ait différentes parties, certaines lisses et d'autres moins, peuvent être évoqués les différents mouvements de vents, qui pourraient avoir secoué les capteurs à l'intérieur même de la nacelle.* Pour vérifier cette hypothèse, il faut tracer l'altitude et le nombre de muons en fonction du temps. Pour tracer cette courbe, comme le fichier de GPS avait 10 valeurs pour 1 valeur de muons (le capteur de muons prenait des valeurs toutes les 10s contre 1s pour le GPS), il a fallu sauter 9 valeurs de GPS sur 10. Le fichier de GPS contient tant de valeurs qu'aucune information importante n'est perdue.

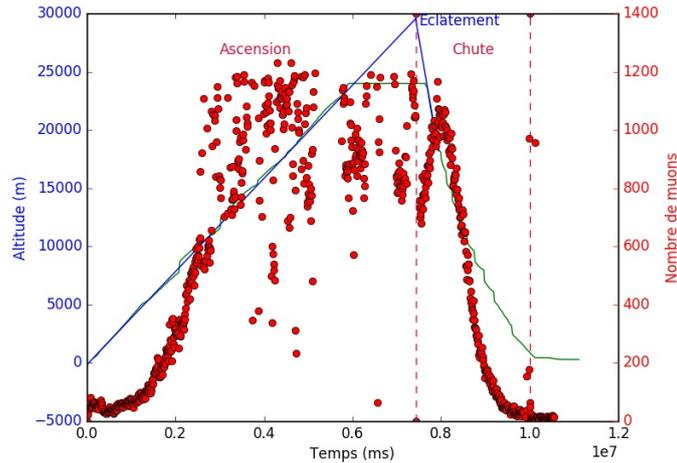


FIGURE 2.19 – Nombre de muons et altitude en fonction du temps

Les moments où les valeurs de muons s’emballent correspondent souvent aux moments où l’altitude connaît une subite accélération à cause de mouvements de vents chauds, donc ascendants, qui secouent la nacelle. À noter que la courbe des muons donne des temps d’éclatement et atterrissage presque égaux à ceux de la courbe GPS.

Pour savoir si les résultats sont aussi précis que la courbe précédente, la courbe du nombre de muons en fonction de l’altitude est tracée. Encore une fois, à cause de la différence sur le nombre de valeurs, il a fallu créer une fonction qui se sert du temps comme une valeur intermédiaire entre deux points pour déterminer les caractéristiques de droites linéaires entre deux points du GPS et s’en servir pour créer un point à ajouter dans un tableau.

```

68 altitude1[index1:index1+len(replace_list)]=replace_list
69
70 def altitude(t,altitude1,temps1):
71     try :
72         for i,t11 in enumerate(temps1):
73             if((t-t11)*(t-temps1[i+1])<0):
74                 ai=(altitude1[i+1]-altitude1[i])/(temps1[i+1]-t11)
75                 bi=altitude1[i+1]-ai*temps1[i+1]
76                 return ai*t+bi
77     except:
78         return 0

```

FIGURE 2.20 – Capture d’écran de la fonction générant des altitudes

Suite à cette manipulation, l’indice de la valeur la plus élevée est déterminé pour tracer le nombre de muons lors de l’ascension en rouge et le nombre de muons lors de la chute en bleu.

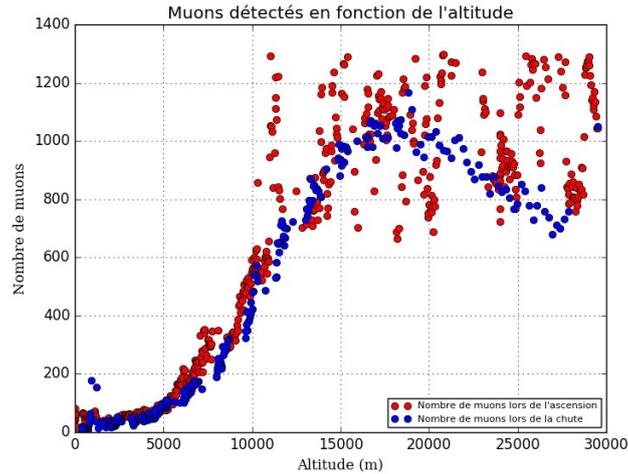


FIGURE 2.21 – Nombre de muons en fonction de l'altitude

En prêtant attention aux différences entre l'aller et le retour, le nombre de muons est légèrement plus faible lors du retour qu'à l'aller. *Il est possible que la vitesse plus élevée lors de la chute que pendant l'ascension constitue un élément de réponse sur cette légère différence. Le retrait de la valeur de 5000 muons est aussi à prendre en compte dans le sens où cette valeur n'est pas précise et même si elle permet une bonne approximation, elle n'est pas la valeur exacte pour compenser le problème électronique. Pour vérifier quelle valeur retirer de manière plus précise, il faut comparer le nombre de muons avant le décollage et après l'atterrissage et adapter l'ajustement des valeurs.*

2.2.2 Incertitudes

Déterminer des incertitudes n'aurait aucun sens, dans la mesure où certaines parties de la courbe sont corrigées. De plus, ce type de détection peut être influencé par certains événements aléatoires comme des recrudescences de rayons cosmiques.

2.2.3 Bibliographie

Les muons sont des particules du groupe des leptons (fermions élémentaires) chargées négativement ou positivement. Le muon possède les mêmes propriétés que l'électron, excepté son poids environ 207 fois plus important. Les muons résultent de la désintégration de particules chargées, les pions, créées par les chocs entre les rayons cosmiques et les particules atmosphériques. Les rayons cosmiques sont des particules de très haute énergie présentes dans le milieu interstellaire. Ils sont provoqués par des événements violents comme par exemple des supernovae. Environ $26ns$ après sa création, le pion se désintègre en muon, sans changer sa charge initiale. En dépit de son instabilité (temps avant désintégration de $2\mu s$), le muon est détectable, car il est très énergétique. En raison de sa vitesse relativiste, et de la dilatation temporelle qui en découle, un muon peut atteindre le sol avant de se désintégrer. Tout le processus complexe de désintégration et création de particules dans l'atmosphère est nommé "gerbes cosmiques".

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Pion_\(particule\)#cite_note-pdf-2](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pion_(particule)#cite_note-pdf-2)

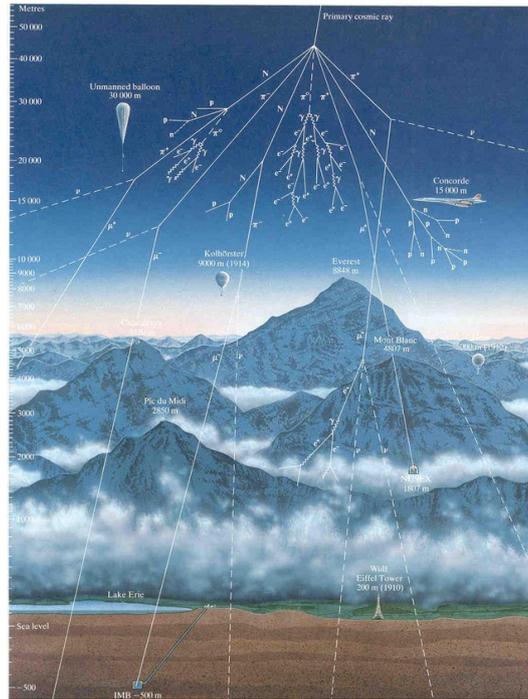


FIGURE 2.22 – Schéma d'une gerbe cosmique

<http://slideplayer.fr/slide/1807931/>

Des élèves du lycée Vaucanson de Tours ont effectué le même type de vol stratosphérique que les Masters de l'Université de Bordeaux. Ils ont publié une courbe dans leurs résultats qui peut servir d'éléments de comparaison.

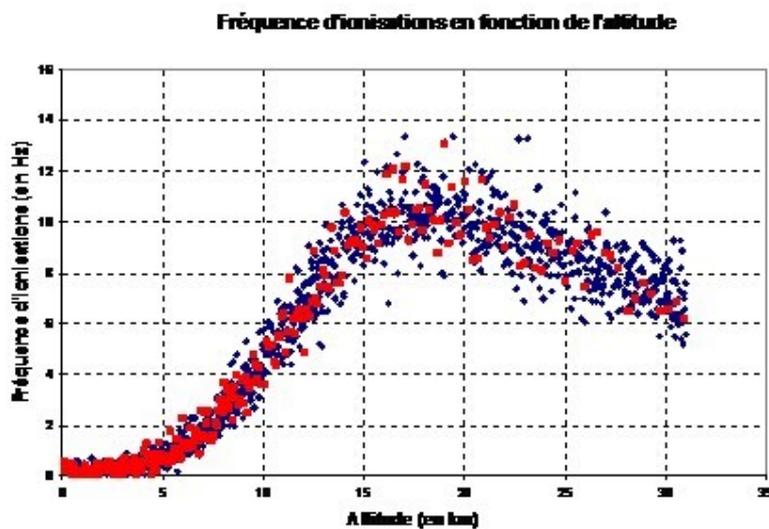


FIGURE 2.23 – Nombre de muons en fonction du temps (courbe du lycée Vaucanson)

<http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/hess-et-les-rayons-cosmiques>

Tout d'abord, les allures des courbes sont identiques : le pic de muons est environ à 17000m d'altitude, la valeur de muons à 20000m et à 15000m est le double de celle à 10000m. Le nombre de muons absolu ne peut être comparé, car la surface du capteur du lycée est inconnue, donc aucune conversion n'est possible. En revanche, le fait que les valeurs relatives soient les mêmes nous prouve bien que les valeurs de l'Université sont correctes, et que les rectifications apportées sur les données ont un ordre de grandeur cohérent avec ce qui est attendu.

Les deux courbes à comparer montrent une augmentation du flux de muons de $0m$ à $17000m$, ce qui est explicable par le fait que plus l'altitude est élevée, moins les muons ont le temps de se désintégrer. En revanche, la légère baisse après le pic trouve son origine dans un phénomène dû à la baisse de densité de l'atmosphère. En effet, les rayons cosmiques ont besoin d'interaction avec les molécules des couches supérieures de l'atmosphère pour produire des gerbes cosmiques, et moins il y a de molécules, moins les rayons cosmiques auront de chance d'en rencontrer dans leur trajet pour produire des muons et d'autres particules.

2.2.4 Conclusion des muons

Les données des muons et les observations qui en découlent, après traitement sont bien en accord avec ce que la physique des particules moderne peut démontrer. Pour améliorer les résultats initiaux et éviter les retouches qui pourraient être maladroites, il faudrait trouver un moyen d'augmenter la résistance de l'électronique embarquée du capteur aux chocs.

2.3 Pression

2.3.1 Tracé des courbes

La toute première courbe de pression en fonction du temps est la suivante :

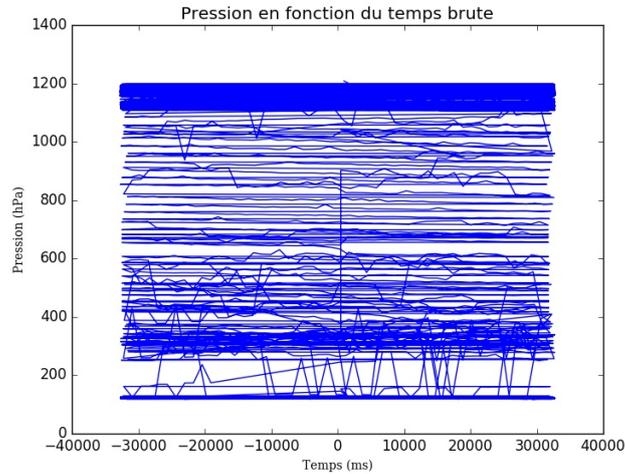


FIGURE 2.24 – Pression en fonction du temps (courbe brute)

Cette courbe est surprenante aux premiers abords à cause d'une particularité dans le codage du capteur : le temps boucle toutes les 65,537 secondes. À noter que le fichier de pression commence au temps 0s, va jusqu'à 32s, puis continue à -32s, jusqu'à 32s etc... Afin de rectifier ce problème, nous avons dû créer un offset de 65,537 secondes à rajouter dès qu'une valeur de temps était plus faible que la précédente, ou lorsque le capteur se redémarrait.

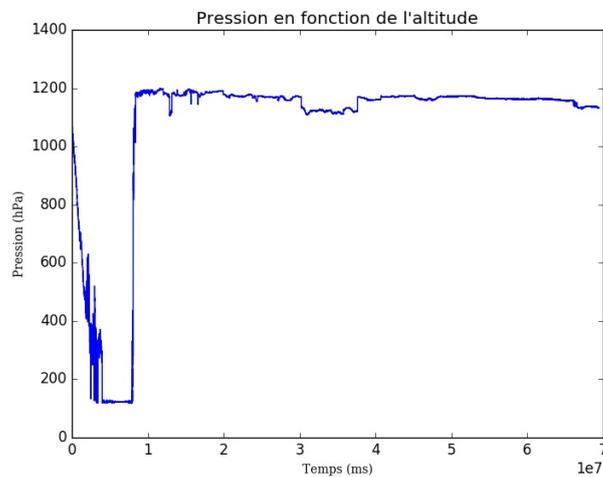


FIGURE 2.25 – Pression en fonction du temps (courbe finale)

Sur le temps du vol, nous observons une chute puis une augmentation de pression qui correspond à l'évolution de l'altitude. À une certaine valeur de pression d'environ 130hPa, le capteur ne peut plus prendre de mesure inférieure. *Ce problème peut trouver son origine dans un gel du manomètre ou dans le fait qu'aucun étalonnage n'ait été effectué au préalable.* Cette hypothèse semble confirmée en regardant les valeurs de pression après l'atterrissage, qui sont d'environ 1200hPa alors que la valeur de pression atmosphérique normale au niveau du sol est de 1013.25hPa, l'écart entre ces deux valeurs étant trop significatif et sur un trop grand intervalle de temps pour être un simple problème d'erreur aléatoire.

En considérant que le début de la courbe est suffisamment réaliste pour calculer une altitude à partir d'une loi reliant altitude et pression dans la troposphère (partie la plus basse de l'atmosphère, de $0m$ à $15000m$ d'altitude), l'altitude calculée est comparée à celle extrapolée du GPS. La formule qui a servi au calcul est celle qui décrit l'atmosphère de type OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), utilisée en aéronautique : $p(z) = 1013.25 \times \left(1 - \frac{0.0065 \times z}{288.15}\right)^{5.255}$

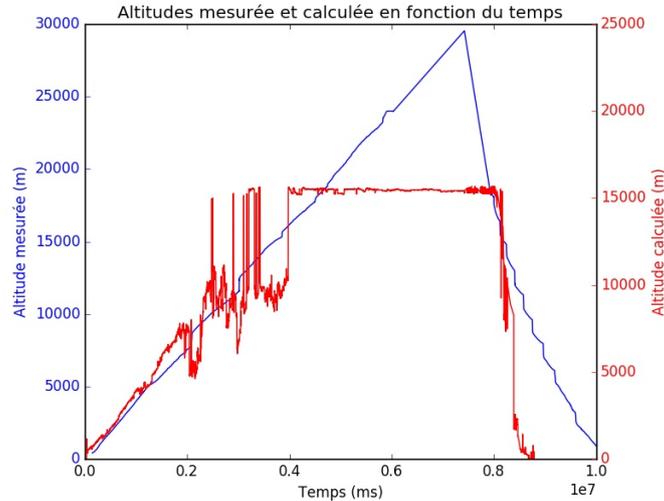


FIGURE 2.26 – Altitudes mesurée et calculée à partir de la pression

Dans ce graphique, nous retrouvons la même altitude par le calcul et par étude du fichier GPS jusqu'à $0.2 \times 10^7 ms$ (notons que les deux échelles d'altitude sur les côtés ne sont pas exactement alignées). Après cette valeur de temps, le calcul ne donne plus de valeurs intéressantes. Nous retrouvons le blocage à $15000m$ d'altitude, ce qui semble correspondre à la fin de la troposphère en plus du bug électronique. En conclusion pour cette partie, les données de la pression ne sont utilisables que jusqu'à $10000m$.

2.3.2 Incertitudes

Nous pensons que donner des incertitudes aux valeurs de pression n'est pas pertinent, car les valeurs elles-mêmes peuvent être mises en doute.

2.3.3 Bibliographie

Nous n'avons malheureusement pas réussi à trouver de document qui donnait exactement l'allure de la courbe de pression lors d'un vol de ballon stratosphérique, même en ne considérant que la partie troposphérique. Dans la mesure où nos valeurs sont peu réalistes, nous n'aurions dans tous les cas, pas pu comparer notre courbe à une courbe faite à partir de données correctes. Il aurait toutefois été intéressant d'apprendre quel type de courbe et de valeurs nous aurions dû avoir.

2.3.4 Conclusion de la pression

Les données de pression sont presque entièrement inexploitables. Un étalonnage avant de lancer le capteur dans l'atmosphère à des valeurs de pression très faibles aurait été privilégié.

2.4 Température

2.4.1 Tracé des courbes

Dans le fichier des données de la température, deux capteurs enregistrent les températures à l'intérieur et à l'extérieur. En fixant une condition, deux tableaux différents permettent de tracer deux courbes.

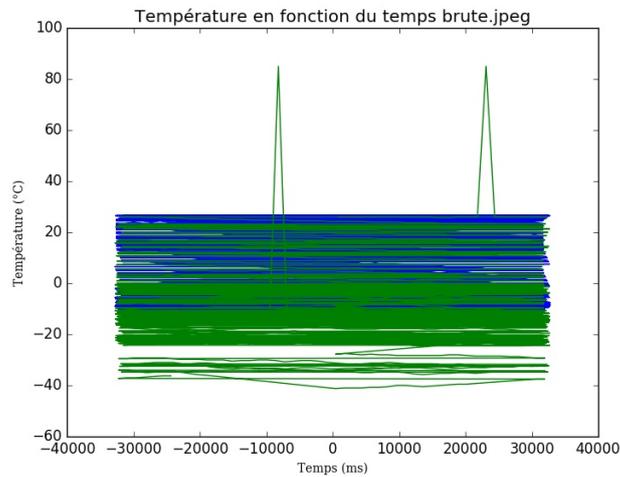


FIGURE 2.27 – Températures en fonction du temps (courbe brute)

Comme pour la pression, la température a les temps qui bouclent. Comme la situation est la même, le programme avec offset peut résoudre ce problème.

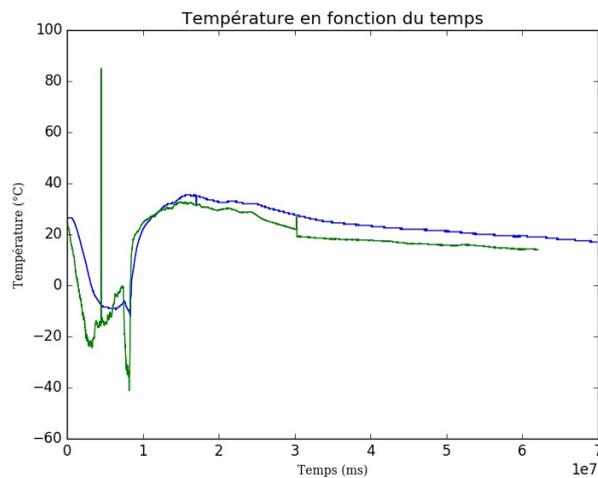


FIGURE 2.28 – Températures en fonction du temps (courbe finale)

Ces deux courbes proposent des allures réalistes : la courbe bleue, du capteur intérieur, donne des températures plus élevées et des variations moins brutales que celles notées en vert, du capteur extérieur. Effectivement, la nacelle constituant un isolant, ce comportement est cohérent.

En traçant ces températures puis la température contenue dans le fichier de l'accéléromètre et enfin l'altitude en fonction du temps, les évolutions de température sont plus claires.

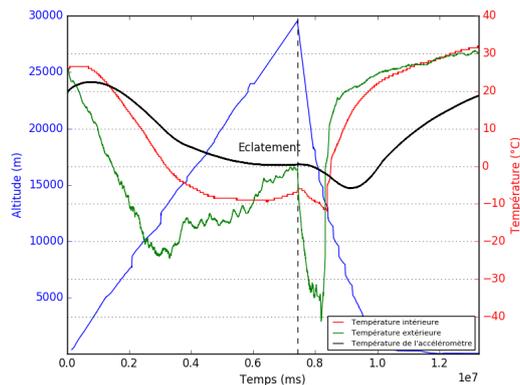


FIGURE 2.29 – Températures et altitudes en fonction du temps

Les allures des différentes courbes sont assez similaires. Les moments clé des variations sont les mêmes, à savoir $0.3 \times 10^7 ms$ pour la hausse de température après la chute, le temps de l'éclatement, pour la rechute et environ $0.8 \times 10^7 ms$ pour la deuxième hausse violente de température. Les valeurs sont toutes différentes, en raison du positionnement dans la nacelle des différents capteurs. Pour la chute, les valeurs de températures extérieures tombent plus bas qu'à l'aller, alors qu'aucune raison ne justifierait cette différence. Les valeurs finales de température des deux thermomètres donnent des températures d'environ $30^\circ C$, ce qui est au-dessus des normales de saison pour un 30 mars (date du lancement).

Afin de comparer les deux courbes d'altitudes des températures intérieure et extérieure, la méthode de la courbe du nombre de muons en fonction de l'altitude, qui utilise le temps comme donnée intermédiaire pour relier les deux autres grandeurs (température et altitude) est appliquée.

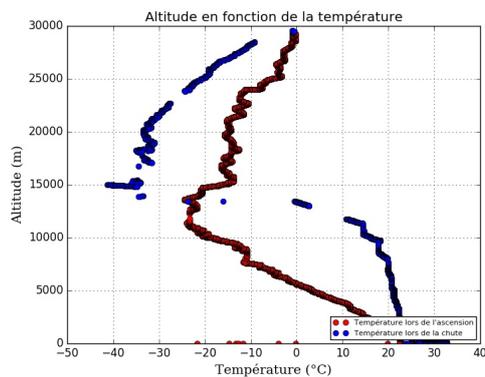


FIGURE 2.30 – Altitude en fonction de la température extérieure

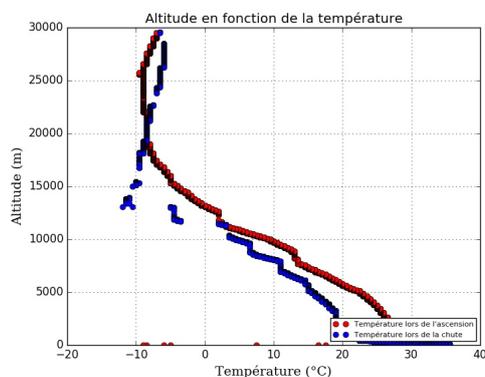


FIGURE 2.31 – Altitude en fonction de la température intérieure

Les températures à l'aller et au retour devraient se superposer (comme c'est le cas pour la courbe des muons), or seule la courbe des températures intérieure a cette tendance. Il existe un plus grand décalage entre aller et retour pour la courbe de température extérieure, ce qui correspond bien à ce qui est visible sur les courbes de température par rapport au temps. Dans les deux cas, la température est toujours plus faible au retour qu'à l'aller. *Une explication possible serait le gel du matériel lors de l'ascension. Il semblerait normal qu'il enregistre donc des valeurs plus faibles lors de la chute, car il dégèlerait et n'enregistrerait pas les bonnes valeurs.* Cependant, cette explication n'est peut être pas la seule. *Dans la mesure où nous observons des valeurs finales trop élevées, il est possible que le fait qu'aucun étalonnage n'ait été effectué joue sur ces décalages entre les valeurs.*

2.4.2 Incertitudes

Lors des premiers calculs d'incertitudes, avec la moyenne glissante, les incertitudes créées n'ont aucun intérêt. En effet, les thermomètres n'enregistrant des points que tous les $0.5^{\circ}C$, il y a à certains moments de la courbe des paliers de valeurs identiques. La conséquence sur les incertitudes est qu'au milieu de ces intervalles constants, il arrive que certaines soient nulles, ce qui est impossible. Pour corriger ce problème, la moyenne glissante a été appliquée à la fois sur la courbe et les incertitudes. En appliquant les moyennes glissantes sur la courbe, certains passages sont lissés, et il n'y a plus de morceaux "en escaliers". Pour illustrer le résultat, voici une portion de la courbe de température intérieure en premier et une portion de la courbe de température extérieure en second.

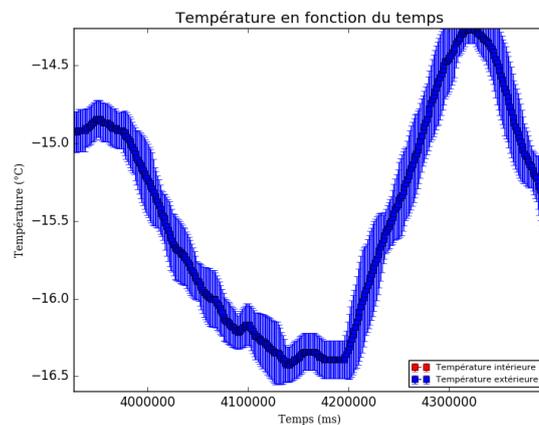


FIGURE 2.32 – Zoom sur la courbe de température extérieure avec incertitudes

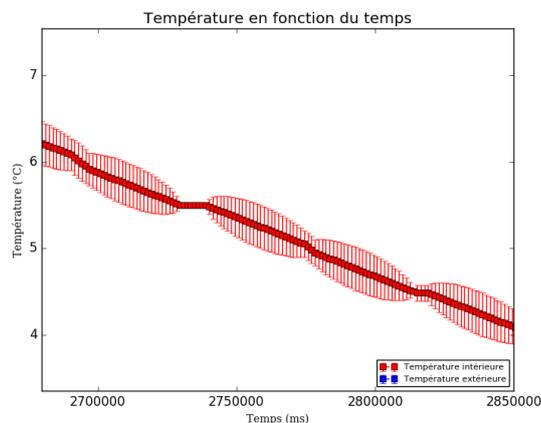


FIGURE 2.33 – Zoom sur la courbe de température intérieure avec incertitudes

La courbe finale moyennée avec les incertitudes est la suivante.

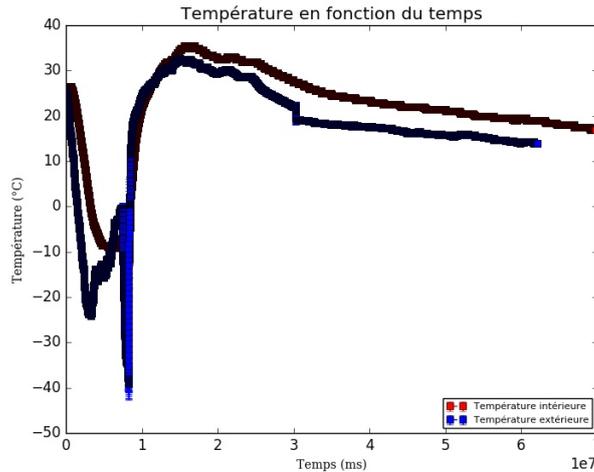


FIGURE 2.34 – Températures en fonction du temps avec incertitudes

Les incertitudes au long de la courbe varient entre $0.25^{\circ}C$ et $0.5^{\circ}C$. Ces incertitudes sont faibles, et une conclusion possible serait que les données des thermomètres ont donc très peu d'incertitudes, seulement elles sont impactées par nos moyennes glissantes sur les courbes. En raison du manque de précision sur la mesure, les incertitudes ne peuvent pas être totalement pertinentes

Des incertitudes sont ajoutées sur la courbe de l'altitude en fonction de la température extérieure.

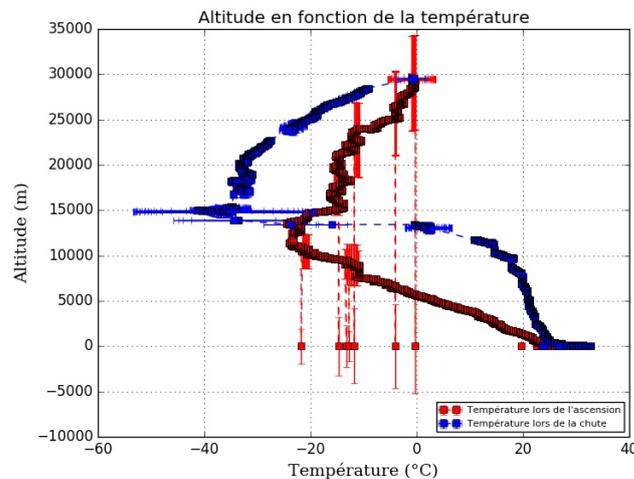


FIGURE 2.35 – Altitude en fonction de la température extérieure avec incertitudes

Les incertitudes sur l'altitude sont de moins de $50m$ et celles sur les températures sont de moins de $0.5^{\circ}C$, excepté pour certains points très éloignés de la courbe, qui ont pour origine des erreurs aléatoires, ou pour les zones qui subissent des variations très élevées. Encore une fois, des valeurs si faibles d'incertitudes confirment que les données du fichier sont très proches de celles qui devraient être enregistrées, sauf bug électronique ou erreur de calibrage, et sans compter l'influence des moyennes glissantes.

2.4.3 Bibliographie

Selon le modèle de l'atmosphère normalisée, la température diminue linéairement ($-6,5^{\circ}C/km$) dans la troposphère jusqu'à $-56^{\circ}C$ pour une altitude de $11km$ (altitude de la tropopause). Dans la basse stratosphère,

elle se maintient à cette valeur jusqu'à 20km maximum, pour augmenter de nouveau dans la moyenne stratosphère jusqu'à -44°C . Enfin dans la haute stratosphère, entre 32km et 47km d'altitude, la température croît linéairement de $+2,8\text{km}$, atteignant $-2,5^{\circ}\text{C}$ à 47km.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8re_normalis%C3%A9e

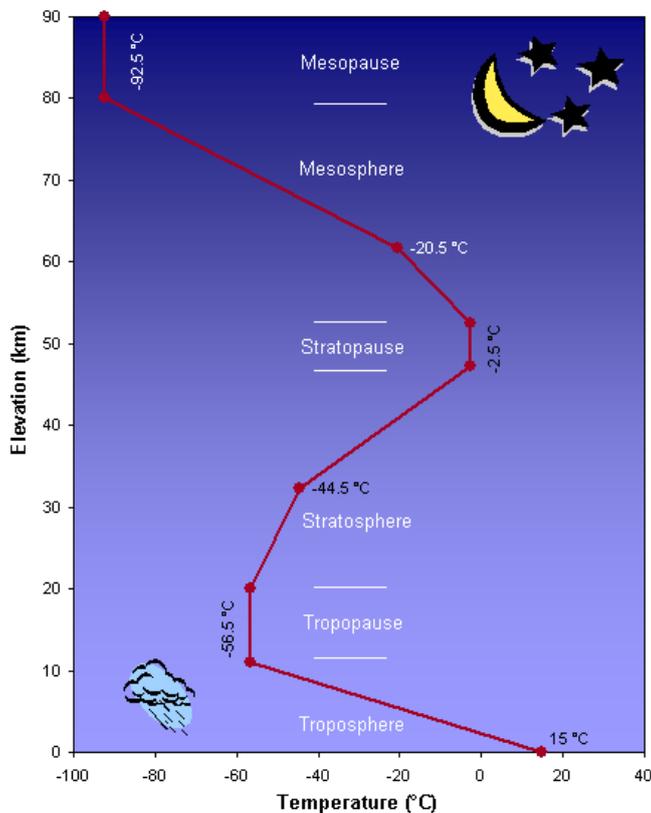


FIGURE 2.36 – Courbe d'altitude en fonction de la température bibliographique

<https://www.skepticalscience.com/argument.php?a=82&p=9>

Plusieurs différences entre ce modèle et notre courbe sont à souligner. Tout d'abord, le matériel de l'Université a enregistré des valeurs deux fois moins basses que celles attendues (-30°C au lieu de -60°C), et les valeurs finales sont deux fois trop élevées (30°C au lieu de 15°C). *Ces problèmes trouvent sans aucun doute leur origine dans l'absence d'étalonnage.* En revanche, les altitudes "clés" des variations sont similaires. Les valeurs le plus en accord avec celles de la prédiction théorique sont celles de l'ascension. Ce constat renforce la théorie du capteur gelé qui influe sur la suite des valeurs.

2.4.4 Conclusion de la température

Le fichier de température donne une allure intéressante, mais des valeurs trop éloignées de celles de la réalité à cause de l'absence de calibrage avant de lancer la nacelle. Nous avons pu vérifier à partir des données un intervalle de notre moment d'éclatement. Certaines parties de la courbe restent inexpliquées.

2.5 Accélération

2.5.1 Tracé des courbes

Le fichier de l'accéléromètre comporte beaucoup de données de mesures : à chaque valeur de temps sont associées l'accélération (selon les trois composantes de l'espace et un repère intrinsèque à l'instrument), la température et la rotation (mesurée par un gyroscope selon les trois dimensions sphériques). Cette partie sera consacrée à l'étude de la composante verticale de l'accéléromètre. En effet, les deux autres composantes ne présentent aucun intérêt car elles n'indiquent que les perturbations et les secousses subies par la nacelle.

La norme de l'accélération totale est tracée en vert, pour vérifier qu'elle est bien proche de $9.81m/s^2$, la valeur communément admise comme étant celle de la pesanteur terrestre.

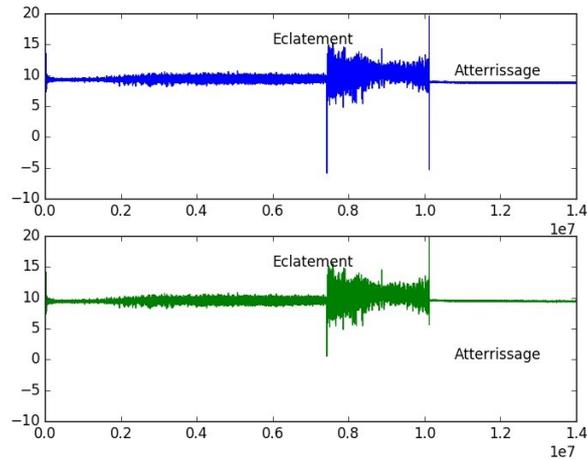


FIGURE 2.37 – Accélération verticale et accélération en fonction du temps

Deux perturbations majeures peuvent être interprétées comme dans l'ordre chronologique : l'éclatement et l'atterrissage. Les valeurs d'accélération totale sont proches de $9.81m/s^2$, même si la composante verticale est un peu plus faible, *en raison de l'inclinaison de départ du capteur*, et qui est corrigéable en étudiant les angles au cours du temps.

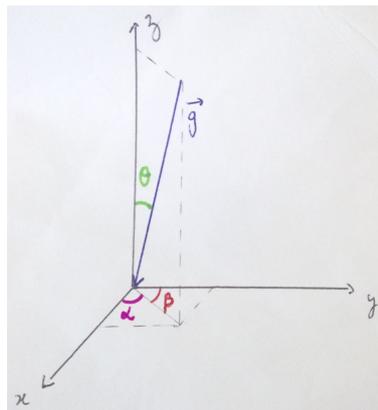


FIGURE 2.38 – Schéma des relations entre les coordonnées de \vec{g} et ses angles

La méthode pour obtenir les angles formés entre le vecteur \vec{g} et les vecteurs unitaires \vec{x} , \vec{y} , et \vec{z} est de diviser chaque composante par le module de l'accélération, ce qui donne le cosinus de chaque angle. Il faut ensuite appliquer l'arccos au résultat pour avoir l'angle en radians.

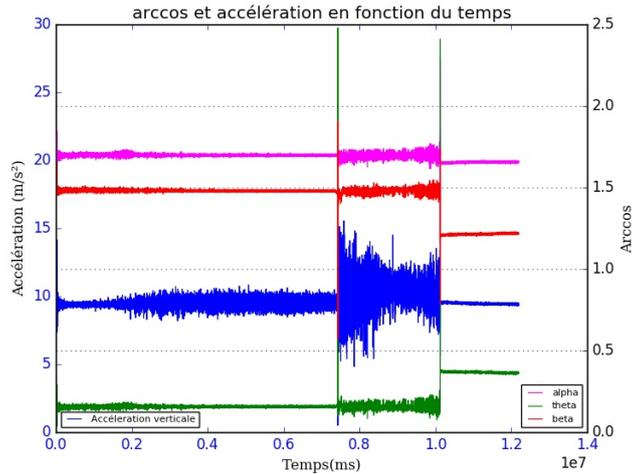


FIGURE 2.39 – Arccos des différents angles et accélération en fonction du temps

L'angle θ avec la verticale (courbe verte) est assez petit, donc lorsque l'on essaie d'ajuster la valeur d'accélération verticale, aucun changement ne se fait sentir, car les données d'accélération n'ont que 3 chiffres significatifs et la correction n'agit qu'après ces chiffres significatifs. De cette étude, le seul élément qui ressort est la position finale de l'appareil, qui est resté par terre, un peu incliné par rapport à l'horizontale ($0.2rad$, vaut environ 11.46°).

2.5.2 Incertitudes

Aucune incertitude ne peut être déterminée, car lors de l'application d'une moyenne glissante, beaucoup d'incertitudes se perdent aux moments des pics d'accélération verticale.

2.5.3 Bibliographie

Aucune courbe d'accéléromètre ayant effectué un vol similaire à celui du ballon n'est disponible sur Internet pour comparer.

2.5.4 Conclusion de l'accélération

Les valeurs d'accélération sont très cohérentes, dans la mesure où les ordres de grandeur sont les bons. Il est préférable que le capteur soit plus précis pour effectuer des corrections efficaces, car en dépit de la justesse des valeurs, sans modification, le seul résultat est la valeur approchée de la pesanteur terrestre.

2.6 Temps

2.6.1 Création du tableau brut

Grâce aux valeurs des temps importants pour chaque altitude, c'est-à-dire le décollage, l'éclatement du ballon et l'atterrissage, un tableau a pu être dressé, qui permet de croiser toutes les valeurs afin de comprendre dans le détail, à quelques secondes près, la chronologie du vol. Ce travail s'est révélé nécessaire car, exception faite pour l'accéléromètre, aucun instrument n'a enregistré clairement tous les éléments importants du vol.

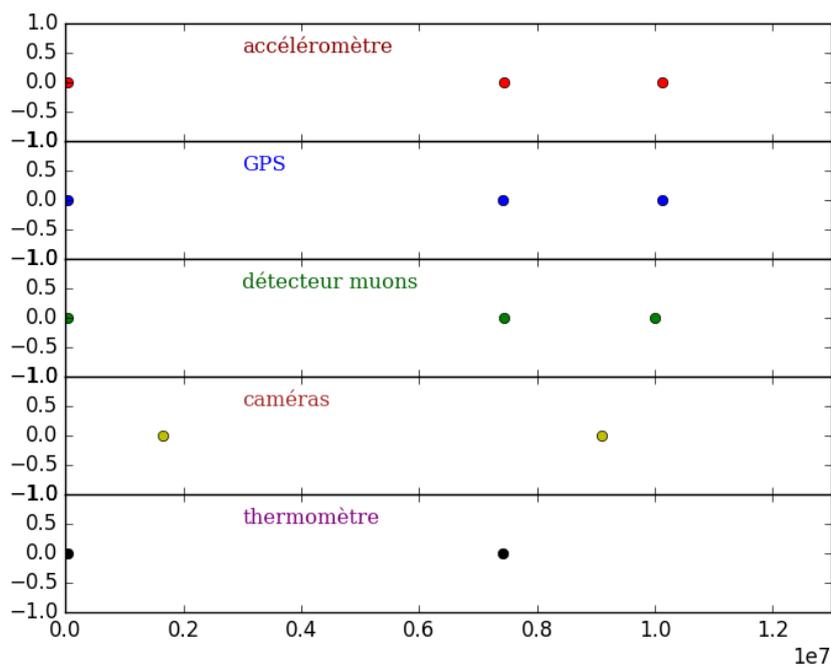


FIGURE 2.40 – Tableau des différents temps (tableau brut)

2.6.2 Création du tableau final

La plupart des temps sont cohérents, sauf les caméras qui ont été allumées bien avant le décollage. En faisant correspondre les points importants que nous avons sur l'accéléromètre (qui était le plus précis en temps) pour annuler les différences sur le décollage, les temps ont pu être calés. Les différences par rapport à l'accéléromètre suivent le tableau.

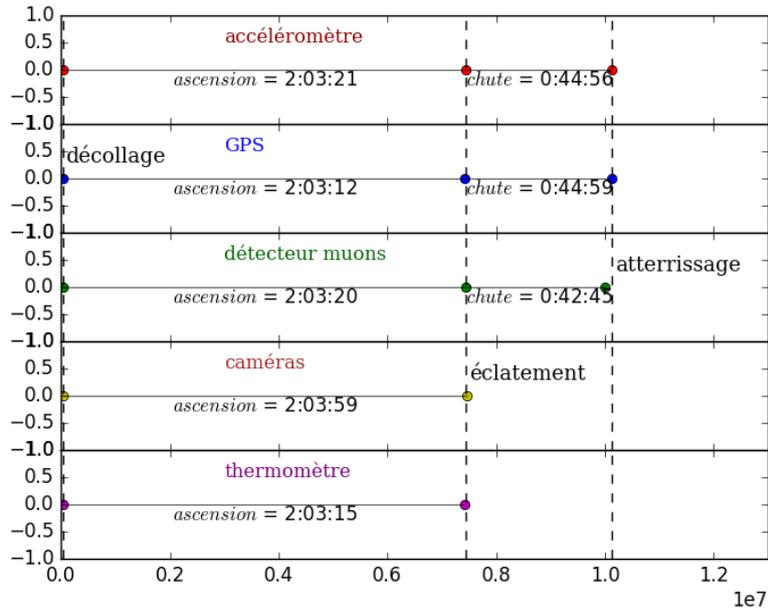


FIGURE 2.41 – Tableau des différents temps (tableau final)

Si l’allumage de l’accéléromètre est considéré comme l’origine des temps, à $t = 0s$, il y a :

- GPS = +3000ms
- Détecteur de muons = +1000ms
- Caméras TOP et BOTTOM = +1620000ms
- Thermomètres = +1000ms

2.6.3 Conclusion du temps

Les temps sont très semblables, ce qui pousse à conclure que les mesures n’ont pas eu d’erreur sur le temps. Il est important de noter que dans le cas des muons, le bug électronique qui a permis de donner un atterrissage extrêmement proche de la valeur que nous avons trouvée en général relève purement de la chance. Si le bug avait été moins significatif, le pic aurait été invisible.

2.7 Vitesse

2.7.1 Général

Une des grandeurs intéressantes à trouver par le calcul est la vitesse. La vitesse se donne à partir de la position (que l'on a avec l'altitude) ou de l'accélération.

2.7.2 À partir de la position

Cette courbe montre la dérivation de la vitesse à partir de la position.

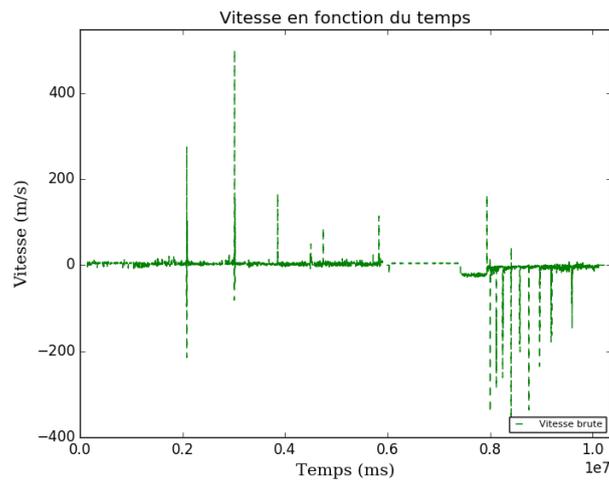


FIGURE 2.42 – Vitesse calculée par dérivation de l'altitude en fonction du temps

Avec un zoom sur la courbe, nous pouvons voir que la vitesse a des pics constants de période 25s sur toute la longueur de la courbe.

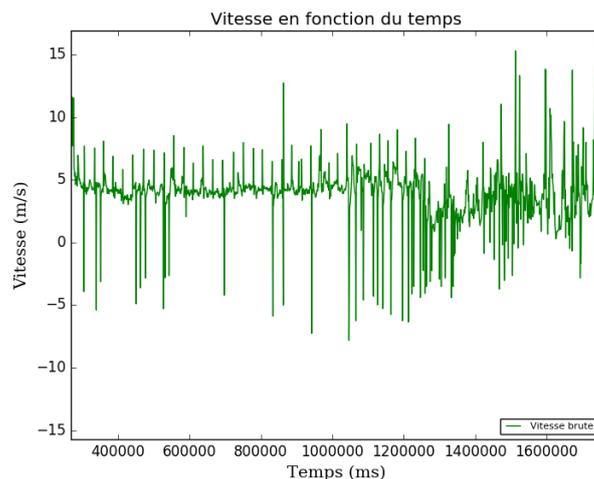


FIGURE 2.43 – Zoom sur la vitesse calculée par dérivation

Un bug électronique se répète toutes les 25s lors de l'enregistrement du temps par le capteur du GPS. Pour lisser la courbe et éviter que cet artefact influe sur les valeurs, une moyenne glissante sur 10 valeurs sur la courbe de la vitesse est introduite. Le nombre de 10 valeurs d'intervalle pour la moyenne fait un bon compromis entre lissage de la courbe et perte d'information.

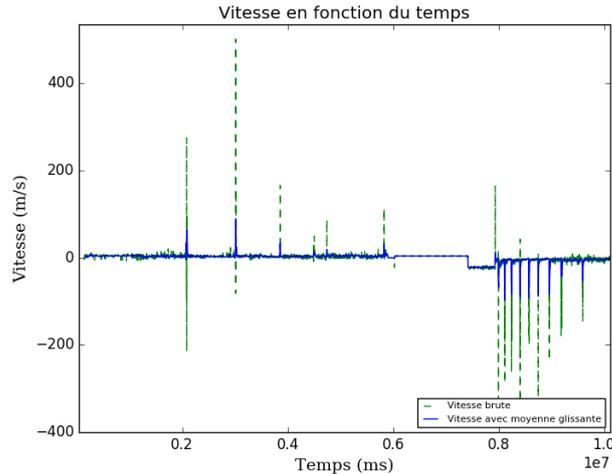


FIGURE 2.44 – Moyenne glissante de la vitesse et vitesse calculées par dérivation en fonction du temps

Sur la courbe bleue sont les valeurs prises en compte pour la suite des résultats. Durant l'ascension, la vitesse est presque constante et vaut $4m/s$. Sur l'intervalle de $0.6 \times 10^7 ms$ à $0.8 \times 10^7 ms$, le fait que les valeurs soient celles de la régression linéaire réduit totalement les variations de la position (les coordonnées des droites linéaires sont fixées), donc la vitesse est constante. Or, après le retour aux valeurs expérimentales, l'écart est important, ce qui signifie que la régression n'est pas parfaite. En effet, la durée de la chute est trois fois moins longue que celle de l'ascension, donc la vitesse de chute devrait être en moyenne de $12m/s$, alors que les valeurs sont d'abord supérieures à $20m/s$, puis égales à $7m/s$ lors du retour aux points expérimentaux. Afin de corriger l'erreur, les coefficients directeurs des droites sont modifiés très légèrement, et la manipulation n'a aucune influence sur la vitesse. *En admettant que le parachute ne s'est ouvert qu'au moment précis où la régression linéaire laisse place aux valeurs expérimentales, il serait logique que ces deux valeurs moyennes ne soient pas de $12m/s$.* En revanche, le fichier caméra montre que le parachute s'est ouvert quasiment directement après l'éclatement, ce qui rend cette hypothèse invalide. La courbe contient quelques valeurs étranges après l'éclatement, mais dont l'origine reste imprécise.

2.7.3 À partir de l'accélération

La vitesse peut aussi se tracer en intégrant l'accélération.

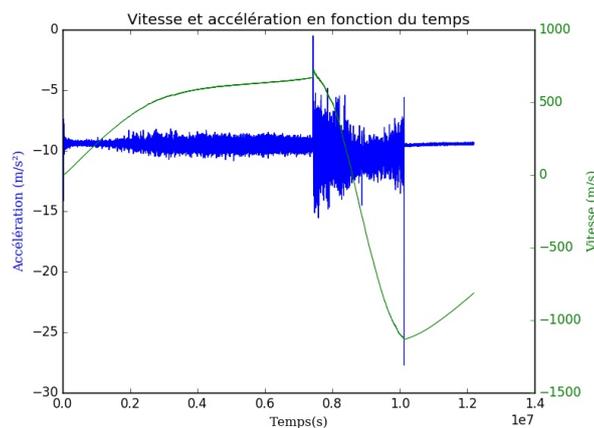


FIGURE 2.45 – Vitesse calculée par intégration de l'accélération en fonction du temps

Cette méthode est infructueuse. La vitesse à l'aller dépasse les $500m/s$. Toutes les solutions qui sont envisagées se révèlent mauvaises. L'explication ne peut donc se trouver qu'au sein même du fichier : qu'une fois de plus, c'est l'imprécision de la mesure qui bloque. En effet, pour obtenir la vitesse en intégrant, il faudrait enregistrer des variations au 10000ème pour être précis au m/s près sur la vitesse (ce qui signifie quand même

une marge d'erreur de 20%, car la valeur pour la montée est d'environ de $5m/s$). Comme la précision ne se fait qu'au 100ème, la vitesse est susceptible de s'écarter de beaucoup par rapport à ce qui est attendu. De plus, comme le fichier contient un nombre de valeurs très important à intégrer, les erreurs s'ajoutent pour donner des résultats totalement absurdes (une vitesse de nacelle tractée par ballon à hélium qui s'approche de deux fois la vitesse du son dans l'air ambiant). En conclusion, cette méthode ne fonctionne pas du tout, à cause de plusieurs facteurs comme le nombre de valeurs très élevé et la faible précision de la mesure qui impacterait les intégration très vite pour donner des valeurs aberrantes.

2.7.4 Conclusion de la vitesse

De ces deux méthodes, la plus convaincante est celle de la dérivation de la position. Elle concrétise assez bien ce qui est imaginé en observant l'altitude, en dépit de quelques incompréhensions quand à la fin des valeurs.

Chapitre 3

Résultats du stage

Tâches et perspectives

En résumé, ce stage a permis de réaliser plusieurs tâches grâce aux données des fichiers et aux programmes créés pour les exploiter. Tout un travail a été effectué sur l'altitude et le positionnement GPS pour obtenir des résultats cohérents sur l'intervalle du brouillage, les données des muons ont été corrigées à maintes reprises, des explications ont été trouvées pour expliquer les problèmes rencontrés sur la pression et la température et enfin l'accélération.

Si un prochain vol est envisagé dans le futur, il faudra prévoir quelques améliorations par rapport à celui du 30 mars 2017 pour que certaines données soient utiles. Tout d'abord, un étalonnage des thermomètres et manomètre sera nécessaire pour obtenir des valeurs cohérentes, puis dans le codage du capteur, le temps ne devra pas boucler. Ensuite, l'accéléromètre embarqué devra être précis au moins au 10000ème, pour permettre des modifications sur les valeurs sans les rendre absurdes. Enfin, le détecteur de muons devra avoir des composants électroniques moins sensibles aux chocs pour réduire le nombre de manipulations qui pourraient fausser les données. Sachant que beaucoup des interrogations qui subsistent quand à certaines étrangetés des courbes concernent le vent, il serait intéressant d'installer des anémomètres à l'extérieur de la nacelle. Cet ajout permettrait de vérifier s'il y a en effet corrélation entre le vent et quelques éléments inexplicables des courbes.

Bilan personnel de Lioni-Moana BOURGUINAT

Dès la fin du premier semestre, j'ai cherché à réaliser un stage facultatif en astrophysique ou encadré par un astrophysicien. J'ai été enthousiasmé d'apprendre que M. Denis DUMORA recherchait des L1 pour traiter les données du ballon et avait accepté ma demande, mais ce n'est qu'à la fin du stage que je réalise la chance que j'ai eue.

Ce stage m'a permis de me confronter à un aspect important de la recherche : le traitement de données reçues suite à une manipulation, tout en utilisant la méthode scientifique. Se poser des questions pour trouver des solutions à des problèmes qui ne semblaient pas en avoir, était prenant et stimulant. Toutes les questions en ont appelé des nouvelles, et c'est à la fois avec regret et satisfaction que ce stage s'est terminé. En effet, tout le travail sur les muons et la physique des particules m'a tout particulièrement intéressé et confirme mon souhait d'orienter mes études vers l'astrophysique. Je suis très motivé pour trouver d'autres stages, cette fois concernant l'astrophysique spécifiquement.

À mon avis, notre binôme a manqué de méthode pour établir un cahier des charges servant à la rédaction du rapport de stage. C'est pour cette raison que je remercie M. Denis DUMORA de m'avoir laissé l'opportunité de présenter mon propre rapport. J'ai profité de cette nouvelle rédaction en L^AT_EX pour apprendre une méthode d'écriture scientifique, qui me servira sans aucun doute pendant la suite de mes études.

Table des figures

1	Éclatement du ballon par la caméra TOP	4
2.1	Altitude en fonction du temps	7
2.2	Latitude en fonction du temps	7
2.3	Longitude en fonction du temps	8
2.4	Latitude en fonction de la longitude	8
2.5	Altitude en fonction du temps avec extrapolation	9
2.6	Capture d'écran du programme de détermination d'altitude par régression linéaire	9
2.7	Trajet du ballon en 3D avec régression linéaire	10
2.8	Capture d'écran de la fonction "moyenne glissante"	10
2.9	Zoom sur la courbe de l'altitude avec les incertitudes	11
2.10	Courbe de l'altitude avec incertitudes	11
2.11	Projection du trajet du ballon sur Google Maps	12
2.12	Projection du décollage du ballon sur Google Maps	12
2.13	Projection de la régression linéaire sur l'altitude du ballon sur Google Maps	12
2.14	Capture d'écran de la fonction altitude, longitude et latitude	13
2.15	Nombre de muons en fonction du temps (courbe brute)	14
2.16	Nombre de muons en fonction du temps (courbe intermédiaire)	14
2.17	Nombre de muons en fonction du temps (courbe intermédiaire 2)	15
2.18	Nombre des muons en fonction du temps (courbe finale)	15
2.19	Nombre de muons et altitude en fonction du temps	16
2.20	Capture d'écran de la fonction générant des altitudes	16
2.21	Nombre de muons en fonction de l'altitude	17
2.22	Schéma d'une gerbe cosmique	18
2.23	Nombre de muons en fonction du temps (courbe du lycée Vaucanson)	18
2.24	Pression en fonction du temps (courbe brute)	20
2.25	Pression en fonction du temps (courbe finale)	20
2.26	Altitudes mesurée et calculée à partir de la pression	21
2.27	Températures en fonction du temps (courbe brute)	22
2.28	Températures en fonction du temps (courbe finale)	22
2.29	Températures et altitudes en fonction du temps	23
2.30	Altitude en fonction de la température extérieure	23
2.31	Altitude en fonction de la température intérieure	23
2.32	Zoom sur la courbe de température extérieure avec incertitudes	24
2.33	Zoom sur la courbe de température intérieure avec incertitudes	24
2.34	Températures en fonction du temps avec incertitudes	25
2.35	Altitude en fonction de la température extérieure avec incertitudes	25
2.36	Courbe d'altitude en fonction de la température bibliographique	26
2.37	Accélération verticale et accélération en fonction du temps	27
2.38	Schéma des relations entre les coordonnées de \vec{g} et ses angles	27
2.39	Arccos des différents angles et accélération en fonction du temps	28
2.40	Tableau des différents temps (tableau brut)	29
2.41	Tableau des différents temps (tableau final)	30
2.42	Vitesse calculée par dérivation de l'altitude en fonction du temps	31
2.43	Zoom sur la vitesse calculée par dérivation	31
2.44	Moyenne glissante de la vitesse et vitesse calculées par dérivation en fonction du temps	32
2.45	Vitesse calculée par intégration de l'accélération en fonction du temps	32

Table des matières

1	Présentation du stage	6
1.1	Présentation du Centre de Ressources en Physiques A1	6
1.2	Présentation du matériel et objectif du stage	6
1.3	Méthode générale	6
2	Travail effectué	7
2.1	GPS	7
2.1.1	Tracé des courbes	7
2.1.2	Incertitudes	10
2.1.3	Projection sur Google Maps	11
2.1.4	Conclusion du GPS	13
2.2	Muons	14
2.2.1	Tracé des courbes	14
2.2.2	Incertitudes	17
2.2.3	Bibliographie	17
2.2.4	Conclusion des muons	19
2.3	Pression	20
2.3.1	Tracé des courbes	20
2.3.2	Incertitudes	21
2.3.3	Bibliographie	21
2.3.4	Conclusion de la pression	21
2.4	Température	22
2.4.1	Tracé des courbes	22
2.4.2	Incertitudes	24
2.4.3	Bibliographie	25
2.4.4	Conclusion de la température	26
2.5	Accélération	27
2.5.1	Tracé des courbes	27
2.5.2	Incertitudes	28
2.5.3	Bibliographie	28
2.5.4	Conclusion de l'accélération	28
2.6	Temps	29
2.6.1	Création du tableau brut	29
2.6.2	Création du tableau final	29
2.6.3	Conclusion du temps	30
2.7	Vitesse	31
2.7.1	Général	31
2.7.2	À partir de la position	31
2.7.3	À partir de l'accélération	32
2.7.4	Conclusion de la vitesse	33
3	Résultats du stage	34