

Rapport de projet

- ICARE -



TABLE DES MATIÈRES:

1) Introduction.....	2
Présentation du projet.....	2
Présentation de l'équipe.....	3
2) Glossaire.....	4
3) Etudes théorique.....	5
Étude théorique de l'évolution de la température et de la pression dans l'atmosphère.....	5
Étude théorique de l'évolution de la radioactivité dans l'atmosphère.....	11
4) Nacelle et gestion thermique.....	14
Présentation du système électronique global.....	14
Réalisation de la nacelle.....	15
Première conception.....	16
Seconde et troisième conception.....	16
Quatrième conception.....	19
5) Les expériences.....	22
Les missions d'Icare.....	22
Les capteurs utilisés.....	22
Étalonnage des capteurs.....	24
Exploitation des mesures.....	27
Les caméras.....	32
6) Télémessure.....	34
Composants	34
Système de télémessure global.....	34
Télémessure 4G.....	35
Télémessure LoRa.....	36
Détails du vol.....	36
7) Chronologie.....	38
8) Bilan financier.....	40
9) Remerciements.....	42

1) Introduction

Présentation du projet

Le projet Icare est le premier projet de ballon sonde de l'association **ELISA SPACE**. Il a été lancé en Octobre 2022 par **Florian LEVRAY**.

La mission du ballon est l'étude de la radioactivité dans la haute stratosphère. Nous mesurons également la pression, la température et la magnétosphère terrestre afin de possiblement établir un lien entre le champ magnétique terrestre et le rayonnement reçu en altitude. Le ballon embarque également une caméra afin d'avoir des images du vol, des nuages et de l'attitude de la nacelle pendant les différentes phases de vol.

Le ballon a décollé le jeudi 11 Juillet 2024 au Camp de Ger près de Tarbes et a été récupéré quelques heures plus tard au nord-ouest de Toulouse chez un particulier..

Présentation de l'équipe

En tout **8** personnes ont contribué au projet sur ces deux ans :

Syrine MAZYAD (1^{ère} année)

Anaïs MONARD (1^{ère} année)

Nathan Danquigny (2^{ème} année)

Louis GODÉ (2^{ème} année)

André ELOPHE (2^{ème} année)

Arnaud ALTOMONTE (2^{ème} année)

Alexis Van Dijk (3^{ème} année)

Florian Levray (5^{ème} année)

La première équipe (année 2022-2023) était composée de **Florian LEVRAY**, **Alexis VAN DIJK**, **Louis GODÉ** et **Arnaud ALTOMONTE**.

La deuxième équipe (année 2023-2024) était composée de **Anaïs MONARD**, **Syrine MAZYAD**, **André ELOPHE**, **Nathan Danquigny**, **Louis GODÉ** et **Arnaud ALTOMONTE**. Nous pouvons voir une photographie de cette équipe dans la figure 1.



Figure 1 : Photographie de l'équipe d'Icare de l'année 2023-2024

2) Glossaire

PCB : Printed Circuit Board

LoRa : Long Range, il s'agit d'une technologie de télécommunication longue portée

4G : Norme réseau la plus utilisée en ce moment, elle porte également le nom de LTE (Long Term Evolution)

VBat : Tension aux bornes de la batterie

GNSS : Global Navigation Satellite System

Csv : Comma Separated Values, il s'agit d'un type de fichier qui est ouvrable avec Excel.

String : Type de variable utilisé dans la programmation qui définit une chaîne de caractère, un caractère peut être une lettre ou un chiffre.

NMEA : National Marine Electronics Association

SPI : Serial Peripheral Interface, il s'agit d'un type de communication entre un Micro-contrôleur et un autre composant.

CPM : Clics Par Minutes

CPS : Clics Par Seconde

convertisseur **BUCK** : convertisseur de tension à haut rendement

NiMH : Nickel Métal Hydrure

LiPo : Lithium Polymère

BMS : Battery Management Systems

LED : Light Emitting Diode

3) Etudes théorique

Étude théorique de l'évolution de la température et de la pression dans l'atmosphère

Au niveau du sol, la température est en moyenne de 288 K et la pression de $1,013 \cdot 10^5$ Pa. Étudions désormais l'altitude de la base des différentes couches atmosphériques ainsi que leur gradient thermique vertical (K/km).

La troposphère se situe entre 0 et 10 km d'altitude, la stratosphère entre 10 et 30 km, la mésosphère entre 30 et 50 km, la thermosphère entre 50 et 400 km et l'exosphère au-delà de 400 km d'altitude. Nous pouvons voir une représentation de ces différentes couches, figure 2.

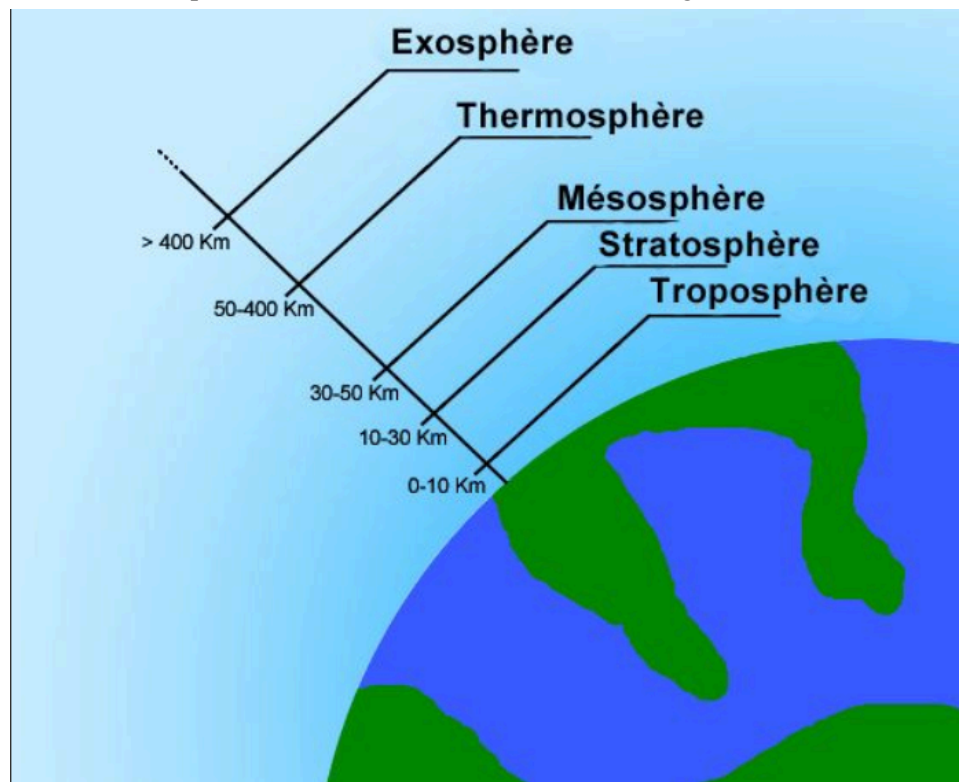


Figure 2 : Schéma des différentes couches de l'atmosphère

Le gradient thermique vertical représente la variation de la température de l'air dans le sens vertical. Cependant, elle peut varier en fonction de la situation météorologique ainsi que de la région.

Il y a une diminution de $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ par 100 m de dénivelé.

Nous pouvons analyser l'altitude de la base et le gradient thermique vertical de chaque couche, tableau 1.

Couche atmosphérique	Altitude de la base (km)	Gradient thermique vertical (K/km)
Troposphère	0	-6,5
Tropopause	11	0
Stratosphère	20	1
Stratopause	3247	2,8
Mesosphère	51	0
Mesosphère	71	-2,8
Mesopause	85	NA

Tableau 1 : Tableau des différentes couches atmosphériques, leur altitude et gradient thermique vertical

Le diagramme associé à ce tableau est représenté figure 3.

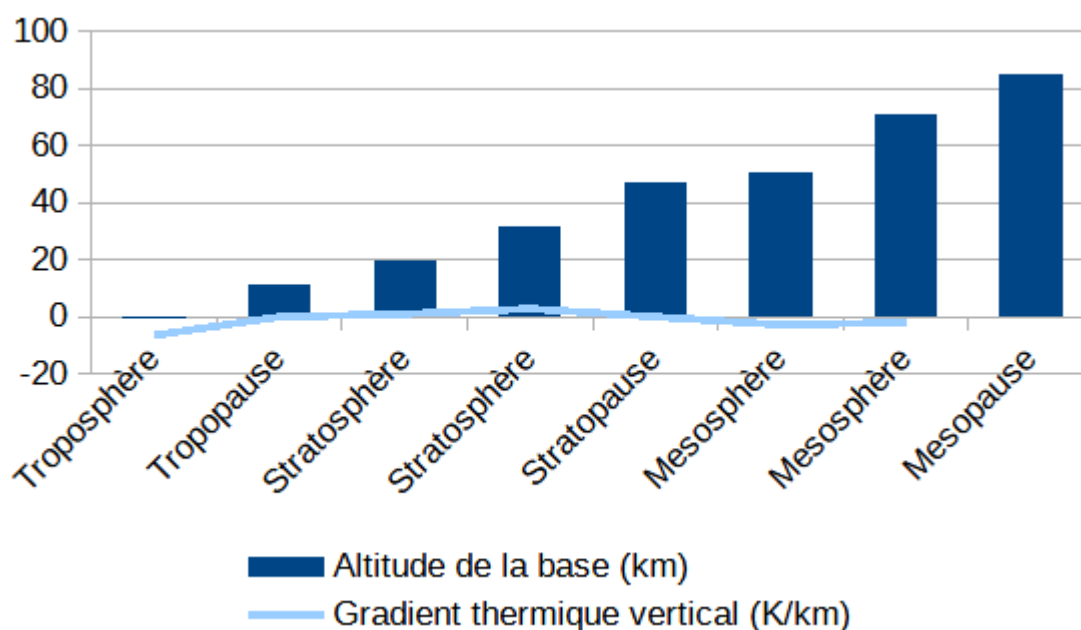


Figure 3 : Diagramme des différentes couches atmosphériques, leur altitude et gradient thermique vertical.

Au niveau de la troposphère, la température varie entre 20 et -55°C, la stratosphère entre -55°C et 0°C et la mésosphère entre 0°C et -80°C.

(En fonction des sources, des sites, etc... les données des altitudes peuvent varier).

Nous pouvons également analyser la température en fonction de l'altitude de chaque couche atmosphérique à l'aide du tableau 2 et de son diagramme associé à la figure 4.

Couche atmosphérique	Température	Altitude
Troposphère	20°C à -55°C	8-15 km
Tropopause	-55°C	15 km
Stratosphère	-55°C à 0°C	15-45 km
Stratopause	0°C	45 km
Mesosphère	0°C à -80°C	45-82 km
Mesopause	-80°C	82 km

Tableau 2 : Tableau de la température en fonction de l'altitude de chaque couche atmosphérique.

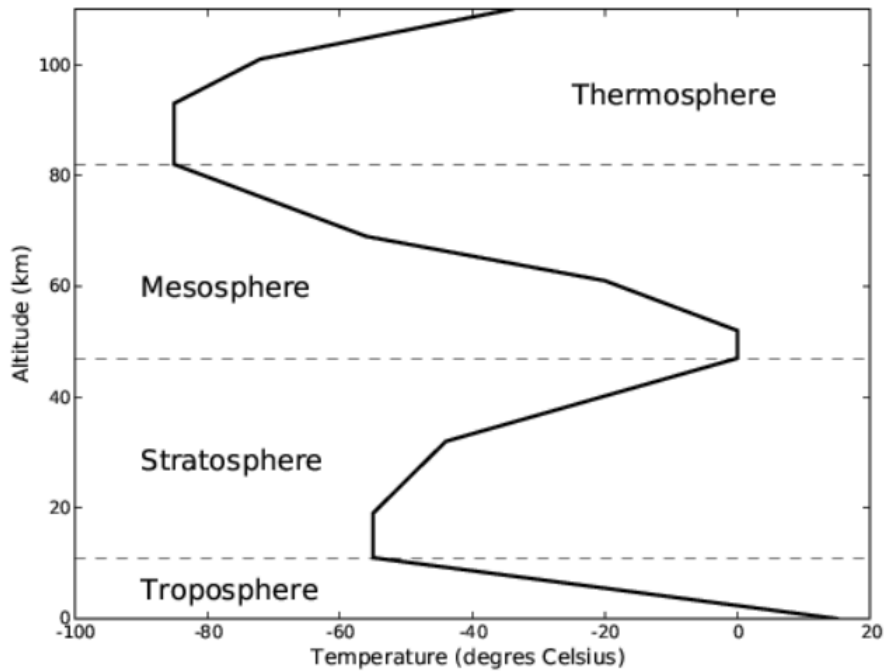


Figure 4 : Diagramme de la température en fonction de l'altitude de chaque couche atmosphérique.

Calcul de la pression au niveau de chaque couches atmosphériques:

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{7g}{2C_p T_0} z\right)$$

- p est la pression, en Pascal,
- p_0 est la pression au sol,
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ est l'accélération de la pesanteur,
- z est la hauteur par rapport au sol, en mètres,
- $C_p = 1006 \text{ J/kg} / \text{K}$ est la capacité calorifique de l'air à pression constante,
- T_0 est la température au sol, en Kelvin.

Pression atmosphérique en fonction de l'altitude

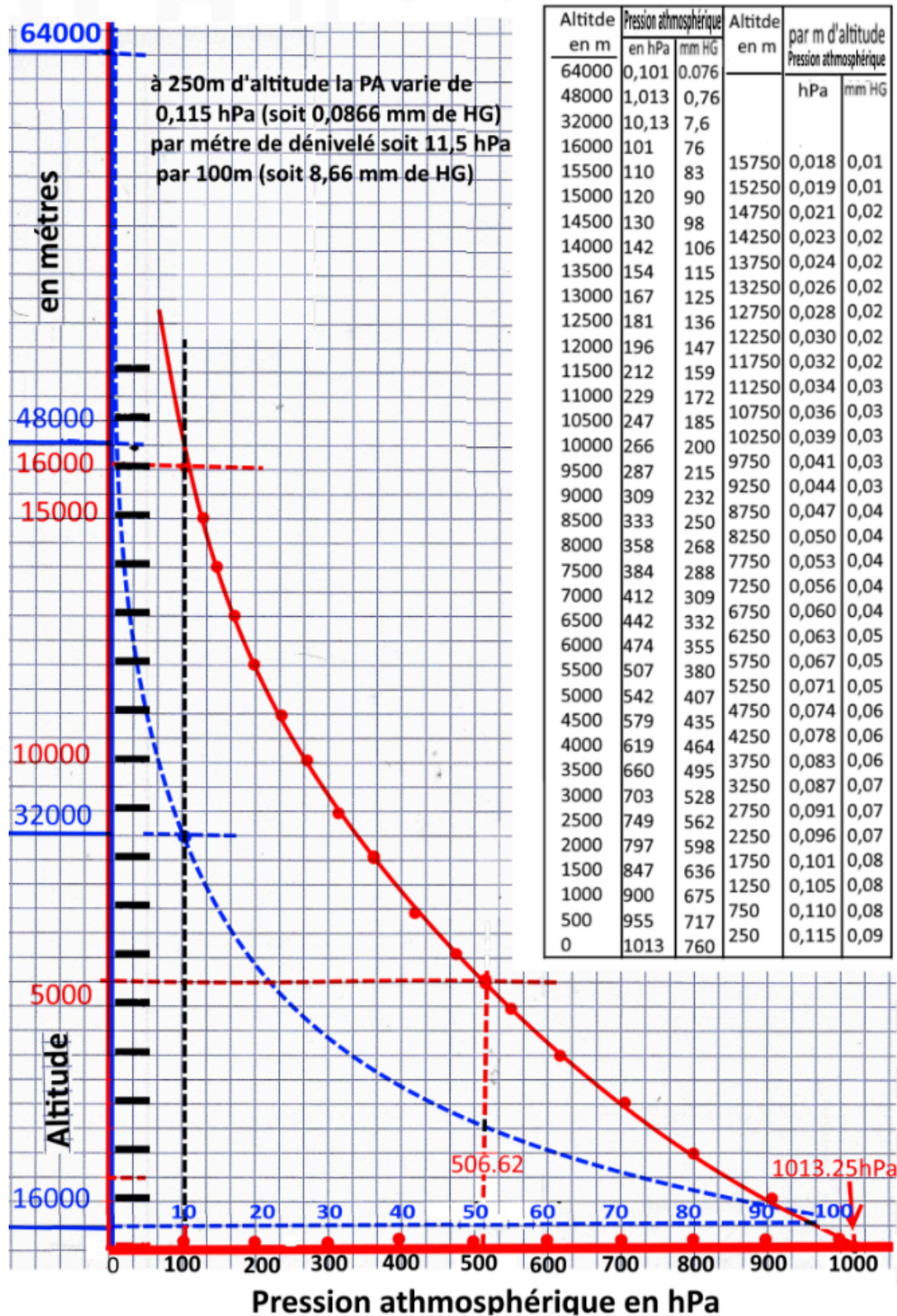


figure 5 : Graphique de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude

Le ballon sonde doit normalement aller à une altitude d'environ 28-30 km. Selon la figure 5, il devra résister à une température minimale de -55°C . La pression minimale qu'il devra atteindre est d'environ 11 hPa.

Sources:

- Wikipédia
- [pcsi3physique.github.io](https://github.com/pcsi3physique/pcsi3physique.github.io)
- fondation-lamap.org
- planet-terre.ens-lyon.fr

Étude théorique de l'évolution de la radioactivité dans l'atmosphère.

Mesurer la radioactivité dans l'atmosphère peut se résumer à mesurer un débit de dose D , exprimé en $\mu\text{Sv/h}$. Le débit de dose est utilisé en radioprotection pour mesurer des valeurs qui peuvent changer plus rapidement comme lors des rayonnements cosmiques, fuites radioactives, etc.

Nous pouvons ainsi répertorier différents ordres de grandeur pour les débits de doses, voir figure 6 :

zone bleue	de 0,5 à 7,5 μSv reçus en 1 h	zone surveillée	Plus de 80 μSv par mois, soit 1 mSv sur 12 mois glissants : ordre de grandeur du rayonnement naturel : limite réglementaire de l'exposition admissible du public aux rayonnements artificiels.	
zone verte	de 7,5 à 25 μSv reçus en 1 h	zone contrôlée	Ordre de grandeur des expositions aux rayonnements dans les environnements naturels fortement radioactifs.	
zone jaune	de 0,025 à 2 mSv reçus en 1 h	zone contrôlée (spécialement réglementée)	Capacité de réparation de l'ADN des cellules supérieure aux dislocations induites. Vieillessement cellulaire éventuellement accéléré par les radiations (?)	
zone orange	de 2 à 100 mSv reçus en 1 h	zone contrôlée (spécialement réglementée)	Taux de cassure double brin de l'ADN ($\sim 1/\text{cGy}$) de l'ordre du taux de réparation ($\sim$ heure). Apparition éventuelle de phénomènes spécifiquement radio-induits aux expositions prolongées.	
zone rouge	plus de 100 mSv reçus en 1 h	zone interdite	Cassures double brin de l'ADN supérieures au taux de réparation. Dislocations excédant les capacités de réparation cellulaires. Effets cumulatifs dépendant de la dose totale.	

Figure 6 : Réglementation pour la France défini par un arrêté du 15 mai 2006

Pour mesurer un débit de dose, il est nécessaire d'utiliser le bon matériel. De ce fait nous utilisons pour Icare un capteur Geiger, voir la Figure 7 ci-dessous :



Figure 7 : Capteur Geiger

Le capteur Geiger mesure un débit de dose en CPM (clics par minutes), chaque désintégration correspond à un petit cliquetis émis par le buzzer du compteur Geiger. Dans la datasheet nous avons une conversion qui permet d'avoir ce débit de dose dans une unité plus conventionnelle, le $\mu\text{Sv/h}$. Cette conversion correspond à $151 \text{ CPM} = 1 \mu\text{Sv/h}$. Pour avoir des mesures chaque seconde, il est intéressant de faire une nouvelle relation avec CPS (clics par seconde) : $151 \text{ CPM} \approx 2,51666667 \text{ CPS} = 1 \mu\text{Sv/h}$.

En théorie, l'évolution de la radioactivité dans l'atmosphère n'est pas linéaire. En effet, le maximum de radioactivité ne se trouve pas forcément à la plus haute altitude. Dans la Figure 8 ci-dessous on peut voir ce que l'on devrait observer comme débit de dose en fonction de l'altitude.

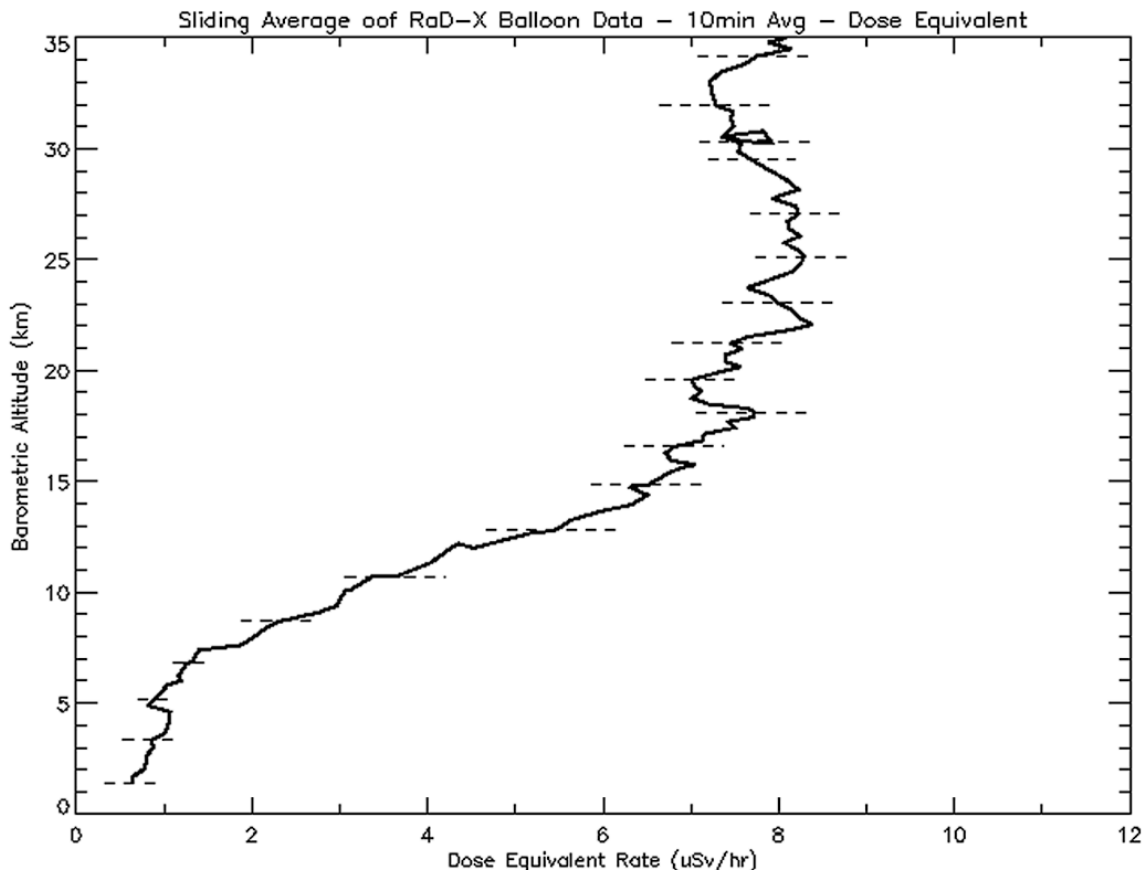


Figure 8 : Evolution du débit de dose en fonction de l'altitude du ballon stratosphérique de la NASA Radiation Dosimetry Experiment (RaD-X)

On observe que la radioactivité atteint une valeur maximale 8-9 $\mu\text{Sv/h}$ pour une altitude comprise entre 15 et 22 km. Cette couche, qui varie selon différents facteurs, est plus communément appelé le Regener-Pfotzer Maximum. Ce phénomène se produit lorsque les rayons cosmiques primaires, en entrant dans l'atmosphère terrestre, interagissent avec les particules de l'air, générant ainsi une cascade de particules secondaires. L'intensité de ces rayons cosmiques secondaires augmente jusqu'à un certain point dans l'atmosphère, où les interactions sont les plus nombreuses, avant de diminuer à des altitudes plus basses en raison de l'absorption accrue par l'atmosphère plus dense.

Parmi les facteurs qui peuvent influencer sur l'altitude du Regener-Pfotzer Maximum, il y a les éruptions solaires, qui lorsqu'elles se produisent agissent d'avantages sur la magnétosphère. Cette dernière agissant comme un bouclier, va repousser l'altitude de quelques kilomètres du maximum de radioactivité. Il sera intéressant d'observer pour Icare les résultats obtenus, de plus d'être son expérience principale, cette année 2024, est très intense en activité solaire.

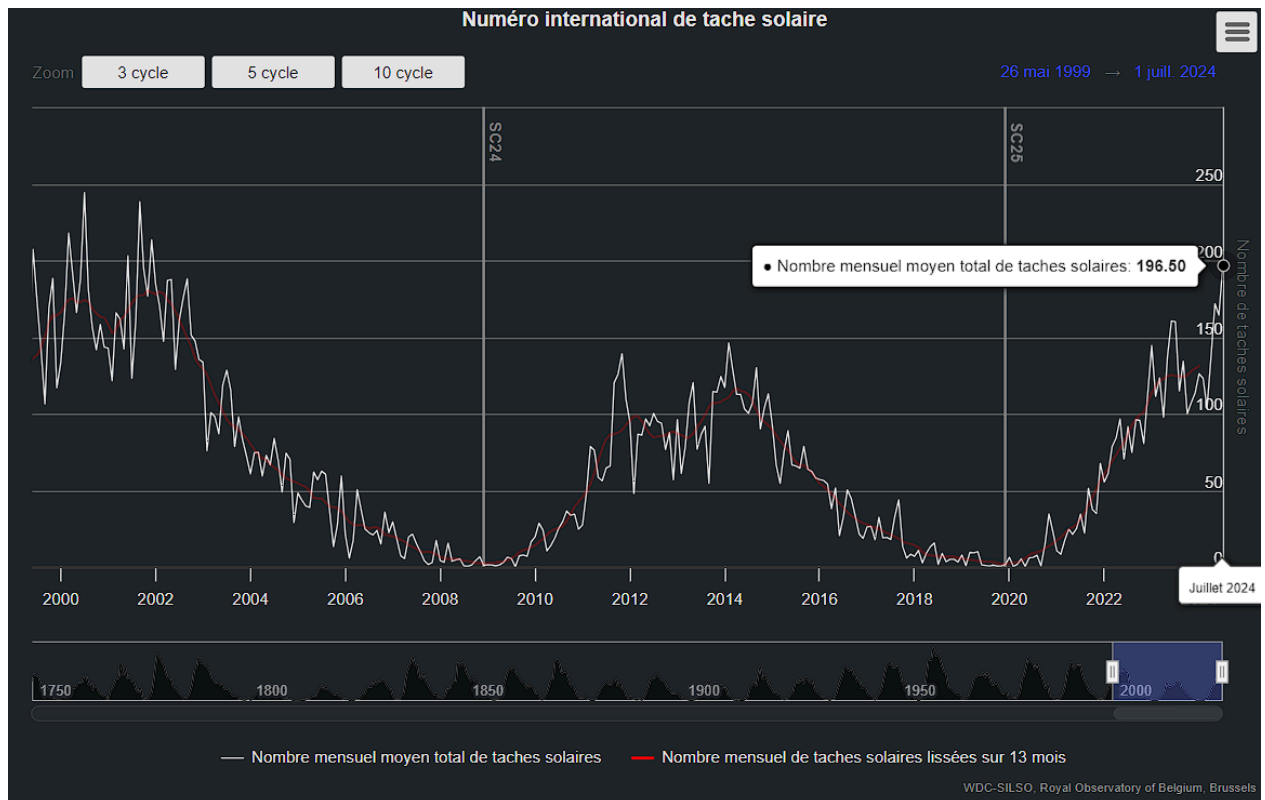


Figure 9 : Observation de l'observatoire royale de Belgique avec le nombre de tâche solaire par mois

Comme vu ci-dessus dans la Figure 9, une augmentation du nombre de tâches solaires implique une plus grande activité solaire. Et en juillet 2024, au moment du lancement d'Icare, le nombre de tâches était le plus élevé depuis décembre 2001. Ce qui laisse supposer que le Regener-Pfotzer Maximum sera particulièrement élevé dans les mesures de notre ballon stratosphérique.

Les sources utilisées pour cette étude théorique :

- Wikipédia
- Mertens, C. J., et al. (2016), Cosmic radiation dose measurements from the RaD-X flight campaign, Space Weather, 14, 874–898, doi:10.1002/2016SW001407
- <https://spaceweatherarchive.com/>
- <https://www.spaceweatherlive.com/>

4) Nacelle et gestion thermique

Présentation du système électronique global

L'électronique est composée d'un **compteur geiger** qui est fixé dans une boîte de protection imprimée en 3D, d'un **PCB** pour la **télémesure**, d'un **PCB** pour les **expériences intérieur**, d'un **PCB** pour l'**alimentation**, des **batteries**, d'un **PCB** pour les **expériences extérieurs** et d'une **caméra**.

Le **PCB** des **expériences intérieurs** est branché au **PCB** de l'**alimentation**, au **compteur geiger** et au **PCB** des **expériences extérieurs**. Le **PCB** de la **télémesure** est également branché au **PCB** de l'**alimentation** et le **PCB** de l'**alimentation** est branché à des **batteries**.

Le **PCB** de l'**alimentation** est composé de 2 convertisseurs de tension **BUCK** pouvant supporter **2 A** à **25 VCC** pour le circuit des **expériences** et **3 A** à **40 VCC** pour le **PCB** de la **télémesure**. Les deux convertisseurs sortent **5VCC** pour alimenter les composants. L'électronique a eu 2 versions, elles sont représentées dans les figures 10 et 11.

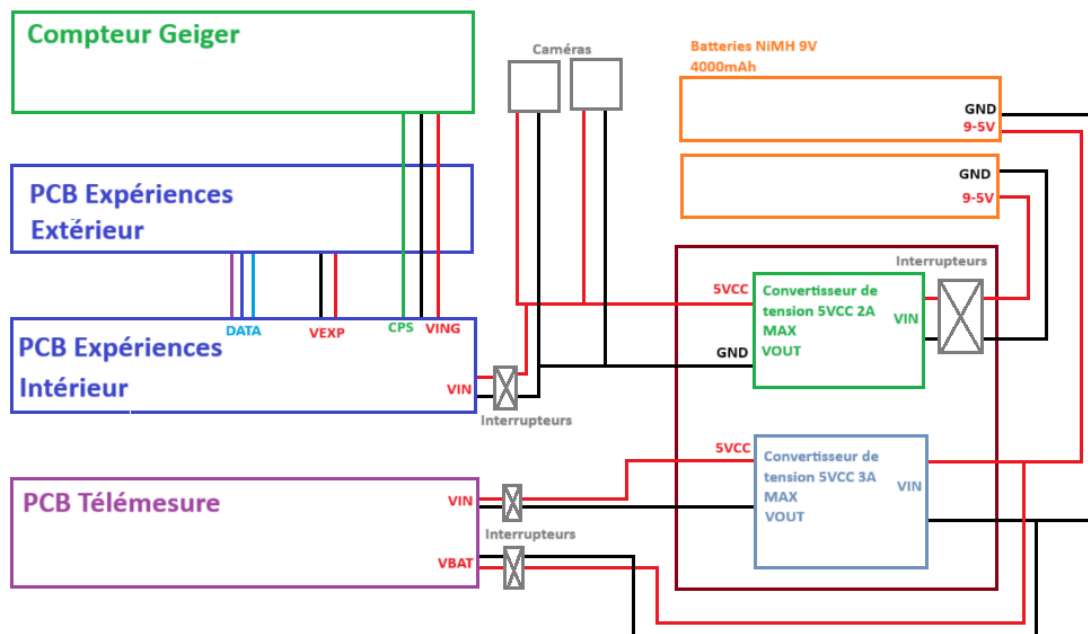


Figure 10 : Schéma électrique de la première version du système électronique d'Icare. (Avant RCE3)

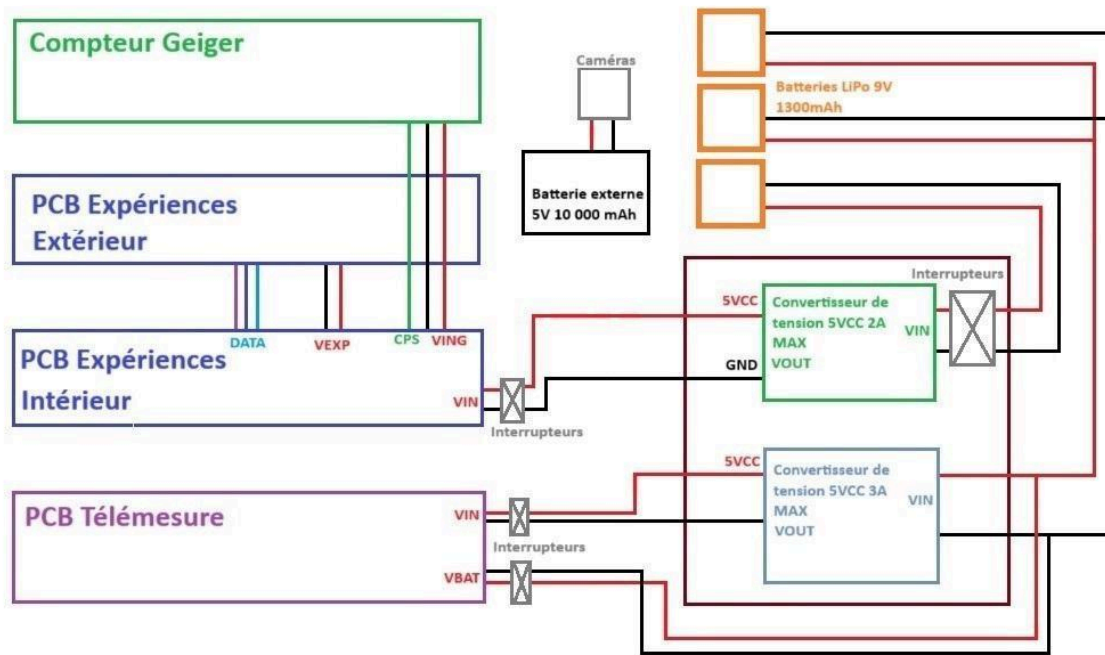


Figure 11 : Schéma électrique de la seconde version du système électronique d'Icare. (Après RCE3)

Réalisation de la nacelle

Afin de protéger contre les chocs, l'humidité et les basses températures le système électrique et les batteries, nous avons rapidement opté pour une boîte en **polystyrène extrudée** étant donné que ce matériau possède une très faible conductivité thermique. La nacelle a eu 4 versions différentes.

La nacelle fût réalisée à partir d'une planche de polystyrène extrudée de 80mm d'épaisseur que nous avons découpée avec une **scie à métaux** et un **cutter**. Les différentes pièces ont été collées grâce à une **colle Sans Clou Ni Vis** et du **ruban adhésif** a permis d'améliorer l'étanchéité entre les joints de fixations.

Première conception

La première conception de la nacelle était un cube en polystyrène enrobée par une couverture de survie avec un couvercle ouvrable sur le dessus et une zone extérieurs pour les capteurs faisant également office de support pour ouvrir le couvercle. Comme la couverture de survie fait le même effet qu'une cage de Faraday, les antennes de la télémessure sont à l'extérieur de la nacelle. Cette conception ne tient compte que de la nacelle sans prendre en compte le positionnement des composants internes. La première conception de la nacelle est représentée dans la figure 12.

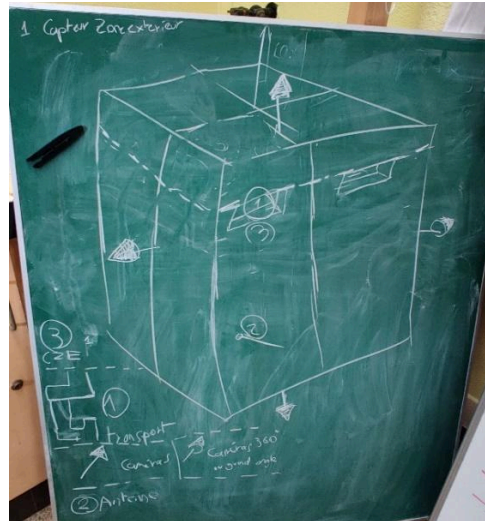


Figure 12 : Première conception de la nacelle d'Icare

Seconde et troisième conception

La Seconde conception de la nacelle s'inspire de la première, il s'agit d'une boîte en polystyrène avec une porte latérale et d'une cloison horizontale, qui permet d'isoler la zone interne de la nacelle avec la zone externe qui se trouve dans la partie basse. On enlève également la couverture de survie sur toute la nacelle et on pense à la peindre en noir. Cette idée permet de garder les antennes à l'intérieur de la nacelle, limitant les ouvertures avec l'extérieur et le risque de les casser à l'atterrissage tout en permettant à la nacelle de se réchauffer avec le rayonnement solaire. Comme nous savions que nous allions lancer près de Tarbes en plein mois de juillet, nous pensions pouvoir utiliser cette méthode pour chauffer la nacelle sans utiliser de résistance chauffante, qui consomme de l'énergie.

Les composants ont également trouvé leur place, le haut de la nacelle allait être composé de 2 zones : Les **expériences** et la **télémessure**. Le **compteur geiger** allait se trouver sur la partie haute des expériences, juste sous le couvercle, tandis que le **PCB des expériences intérieur** se trouverait juste sous le geiger. Le **PCB de la télémessure** se positionne à côté des expériences et les **batteries** se trouvent sur la cloison interne. Le **PCB de l'alimentation** se trouverait alors entre les **batteries** et les **expériences & télémessure**. Le **PCB des expériences extérieur** se trouverait sous la cloison, dans la **zone extérieur**.

Les supports des composants sont des petites cages imprimées en 3D qui peuvent être vissées avec des vis **M3**. Les cages sont également munies de rails percés permettant de glisser les **PCB** et de les visser afin de garantir une bonne fixation. A l'origine, il était question de visser les cages entre elles afin de créer un bloc rigide qui ferait le volume de la zone interne de la nacelle et qui serait totalement bloqué par la fermeture de la porte. Avec cette conception, la nacelle mesure **300x300x360 mm (11.5L zone intérieur & 5L zone extérieur)**.

Cette méthode de fixation des supports a été retenue car elle permet de pouvoir maintenir solidement les composants et réduire le risque de choc lors de ballonnement trop intense. De plus elle permet de sortir les composants, les manipuler indépendamment et les refixer jusqu'au dernier moment lors de la chronologie.

La seconde conception de la nacelle est visible dans les figures 13 et 14.

Cette conception comporte pas mal de problèmes, notamment la taille de la nacelle et des supports qui pèsent lourd et ne permettent donc pas une conformité avec le Cahier des Charges établi par Planète Sciences.

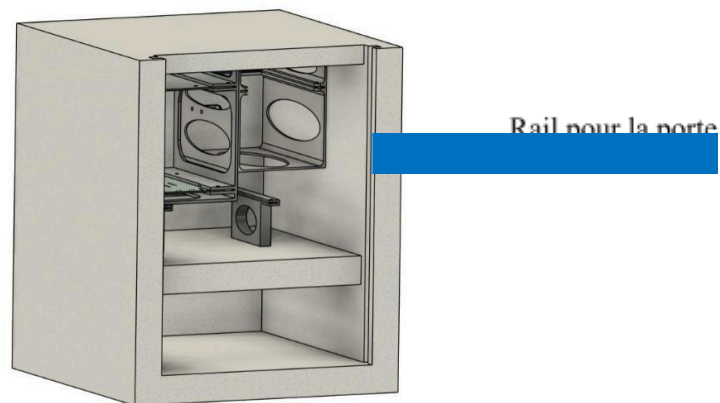


Figure 13 : Vue d'ensemble de la Seconde conception de la nacelle

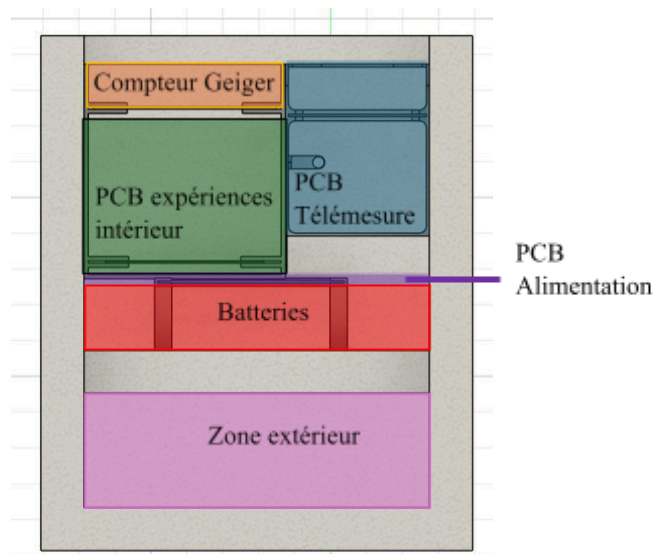


Figure 14 : Vue de face de la Seconde conception de la nacelle

La troisième conception permet de rétrécir la nacelle et d'amincir les supports, ils sont décomposés en pièces simples et faciles à imprimer. Les composants gardent leurs places qui sera définitive et l'ensemble est grandement allégé. Il est prévu de faire des ouvertures dans la **zone extérieure** mais ne seront décidés que lors de la réalisation de la nacelle. Cette conception permet de rétrécir la taille de la nacelle à **280x250x260mm. (6L zone intérieur & 1.5L zone extérieure)**

La troisième conception de la nacelle est visible dans les figures 15, 16 et 17.

Après la RCE3 et de discussions avec notre suiveur Damien POIX, il a été affirmé que les supports n'étaient pas assez rigides et ne supportent pas les contraintes mécaniques dues au décollage, aux turbulences et à l'atterrissage. En revanche, les supports sont montés dans la nacelle avec très peu de jeu et cela permet de les maintenir sans utiliser de colle ou de ruban adhésif, il est tout de même nécessaire d'être délicat lorsqu'on les mets ou les sort de la nacelle afin d'éviter d'endommager le polystyrène. De plus, le design de la porte passe d'une trappe coulissante à une trappe pivotante, maintenue par du ruban adhésif, plus simple à réaliser et plus robuste qu'une trappe coulissante.

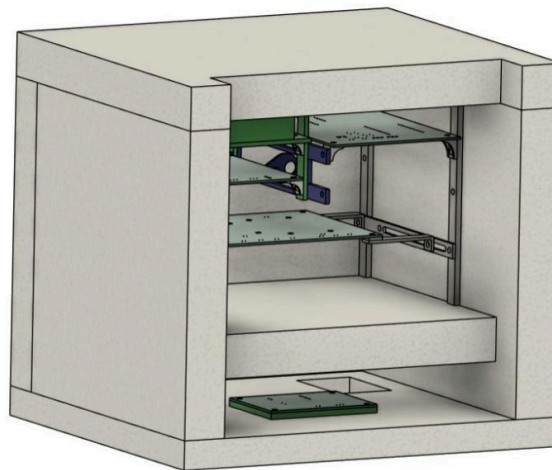


Figure 15 : Vue d'ensemble de la troisième conception de la nacelle

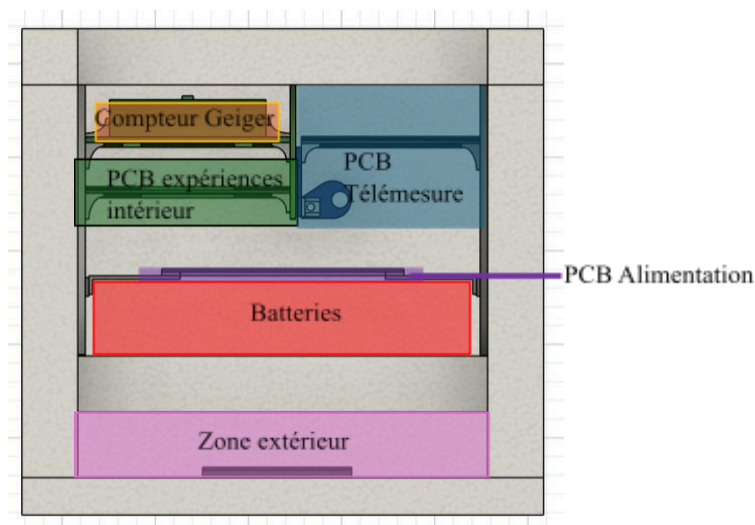


Figure 16 : Vue de face de la troisième conception de la nacelle

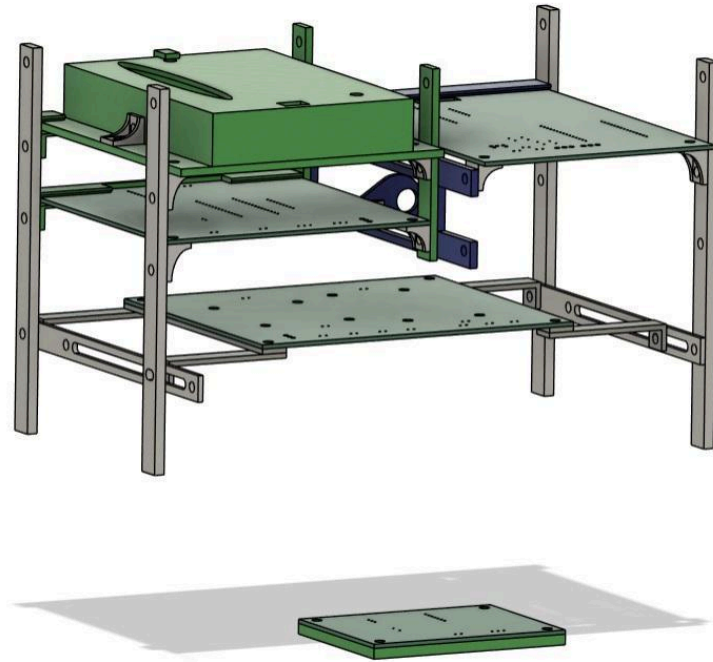


Figure 17 : Vue 3D des supports des composants de la troisième conception sans la nacelle

Quatrième conception

La quatrième conception de la nacelle est quasiment similaire à la troisième avec des améliorations qui ont été proposées lors de la **RCE3**. Les supports ont été rigidifiés et solidifiés, les batteries **NiMH 9V de 4000 mAh** ont été remplacées par des **LiPo 9V de 1300 mAh** et leur support a été conçu. La porte de la nacelle devient une trappe pivotante maintenue par du ruban adhésif, plus simple à mettre en œuvre qu'une trappe coulissante. De plus, la nacelle a été peinte en noir comme il a été imaginé dans la seconde conception.

Après sa réalisation, la nacelle fût testée en plein soleil et à l'ombre dans un congélateur. En plein soleil à **30°C** de température ambiante, il a fallu une vingtaine de minutes pour passer de **25°C** à une température de **30°C** en zone intérieure. Lors du test en congélateur à **-18°C**, il a fallu un peu moins d'une heure pour que la température intérieure de la nacelle passe de **30°C** à **14°C** alors que la zone extérieur était bien à **-18°C**. Nous avons prévu que le rayonnement solaire serait plus intense près de Tarbes et que la conductivité thermique de l'air serait également beaucoup plus faible en haute altitude, favorisant le réchauffement de la zone intérieure. Nous avons donc décidé de poursuivre avec cette méthode.

Le PCB de la télémessure devait pouvoir, à l'origine, calculer la tension aux bornes des batteries afin de couper la transmission lorsque le niveau de ces dernières devenait trop faible. Or, après le changement pour des LiPo équipées de BMS, ce système devenait inutile car la tension des batteries serait quasiment constamment à 9V. Le système de lecture de la tension était composé d'un pont diviseur de tension avec 2 résistances qui chauffent un petit peu. Nous avons donc décidé de l'activer lors du décollage afin de réduire le risque d'atteindre une température trop basse pour les batteries. Il reste important de noter que le chauffage principal de la nacelle résidait dans le rayonnement solaire et son absorption par la peinture noire.

Lors du décollage, la température maximale atteinte en zone intérieur fût de **37°C** peu de temps après le décollage. Lors du vol, la température minimale atteinte en zone intérieur fût de **+16°C** peu de temps après que la température extérieure mesurée soit au plus bas à **-36°C**.

La quatrième conception de la nacelle est visible dans les figures 18, 19 et 20.

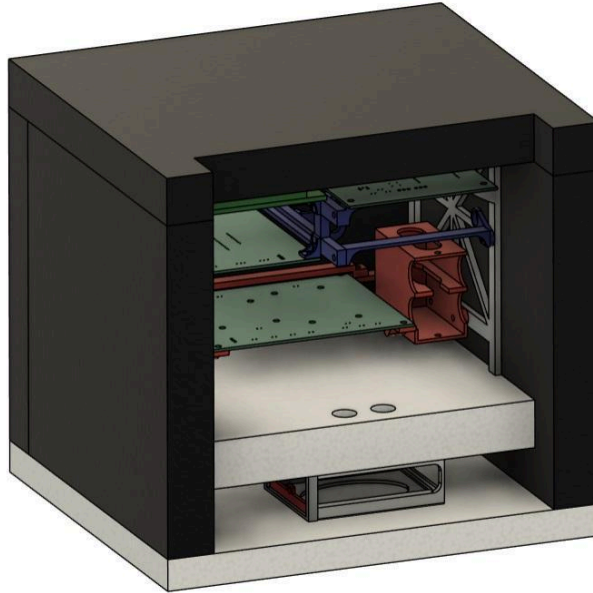


Figure 18 : Vue d'ensemble de la quatrième conception de la nacelle

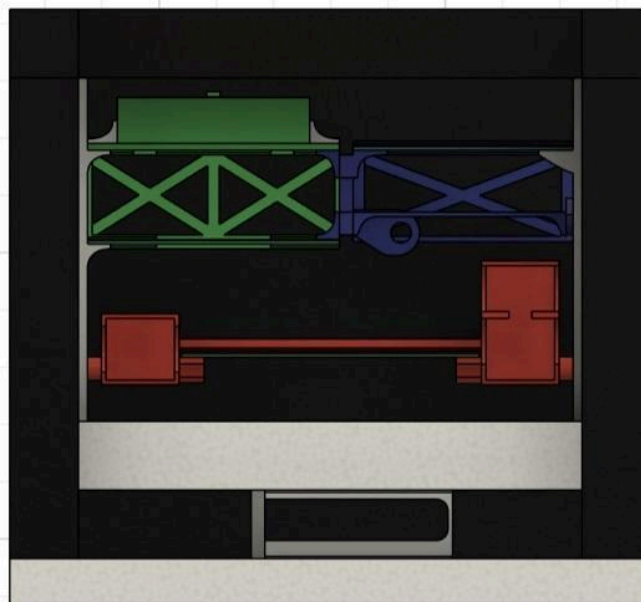


Figure 19 : Vue de face de la quatrième conception de la nacelle

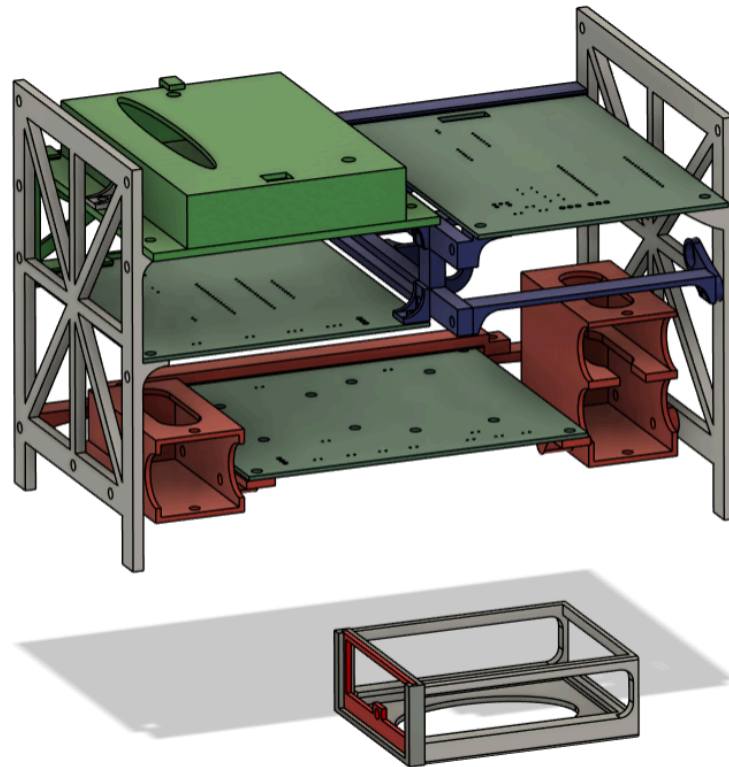


Figure 20 : Vue 3D des supports de la quatrième conception des composants sans la nacelle

Cette conception des supports en tiroirs nous a bien aidé le jour du décollage. Lors de la chronologie en Base Vie, nous avons eu un problème avec le compteur geiger qui semblait avoir un court circuit. Grâce à notre architecture des supports nous avons pu rapidement le sortir de la nacelle, le manipuler et régler le problème sans endommager la nacelle en polystyrène ou le reste des composants. Nous avons pu alors le rebrancher et le re-fixer rapidement afin de pouvoir arriver à temps sur la zone du décollage

5) Les expériences

Les missions d'Icare

Icare est le premier ballon stratosphérique d'Elisa Space, de ce fait, il a à son bord beaucoup d'expériences très ambitieuses pour effectuer une étude la plus complète possible de l'atmosphère. Nous avons élaboré deux catégories d'expériences, principales et secondaires - les expériences principales sont l'étude de l'évolution du champ magnétique de la Terre et le débit de dose de radioactivité présent dans la stratosphère. Quant aux secondaires, ce sont les expériences dites classiques de météorologie comme la température et la pression, avec si possible, filmer le vol du ballon. Pour effectuer une bonne coordination des expériences, nous avons procédé à la séparation du ballon en deux parties, une partie intérieure et une partie extérieure. La partie extérieure est prévue pour suivre le plus fidèlement possible les données météorologiques du ballon, pour mesurer des températures allant jusqu'à - 55 °C selon l'étude théorique. Quant à la partie intérieure, est isolée pour protéger les expériences principales, l'arduino, la télécommunication et l'alimentation du ballon, ces derniers étant beaucoup plus sensibles aux variations de températures extrêmes rencontrées dans les limites de la troposphère et stratosphère.

Ainsi, on peut résumer dans le Tableau 3 ci-dessus les différentes expériences d'Icare et leur zone d'attribution :

	TEMPÉRATURE	PRESSION	RADIOACTIVIT É	CHAMP MAGNÉTIQUE
EXTÉRIEUR	<i>oui</i>	<i>oui</i>	<i>non</i>	<i>non</i>
INTÉRIEUR	<i>oui</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>	<i>oui</i>

Tableau 3 : Expériences du ballon selon les zones extérieures et intérieures

Les capteurs utilisés

Les contraintes principales d'un ballon sont celles des dimensions et de la masse. Pour cela, le micro-contrôleur utilisé et choisi fut une carte arduino Nano pour traiter et enregistrer les données des différents capteurs. Ainsi, le traitement des données est dans l'ordre suivant :

Acquisition (capteurs) → Transmission (arduino nano) → Enregistrement (carte µSD) → Indication (LED)

Ce processus dure une à deux secondes pour chaque mesure, cela est dû à la taille du programme final et au fait d'utiliser une carte arduino. Il est possible que l'utilisation de fonctions et d'un micro-contrôleur plus puissant comme un **ESP32** ou un **Raspberry-PI** aurait accéléré l'exécution du programme.

Comme vu précédemment, le ballon contient deux parties, une extérieur et une intérieur. De ce fait, les capteurs choisies ont une résistance à des températures et des pressions que le ballon a rencontrées lors de son vol. Sur la Figure 21 et le Tableau 4 ci-dessous, on peut voir ces différents compartiments avec les capteurs choisies pour chaque zone.

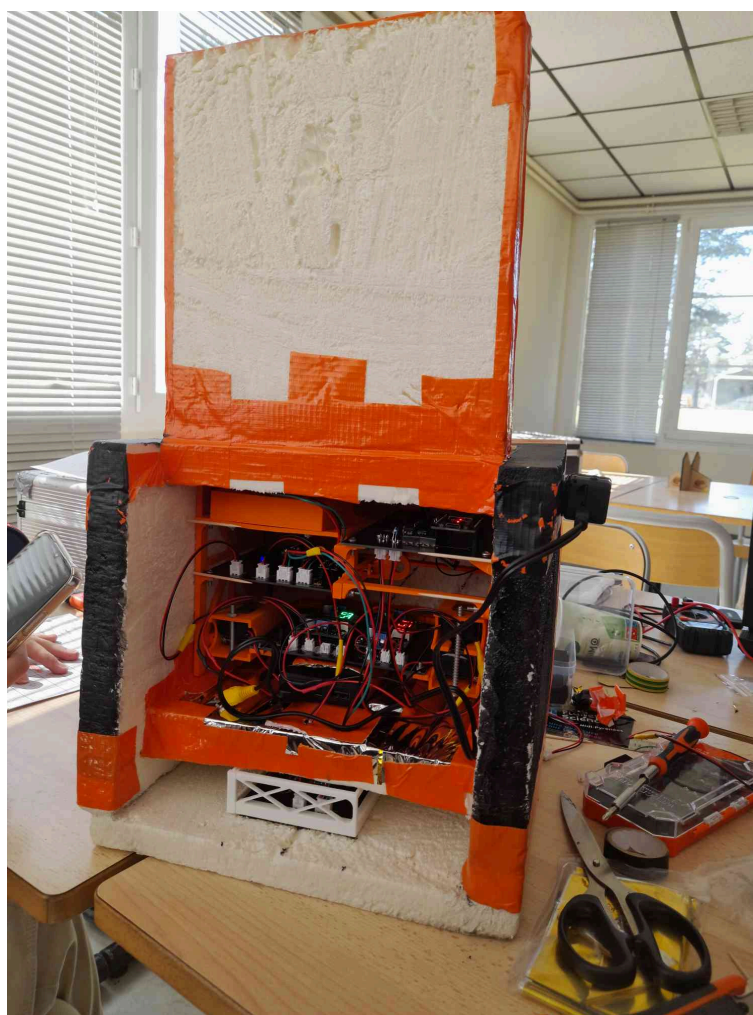


Figure 21 : Photographie de l'intérieur de la nacelle

CAPTEUR	FONCTION	ZONE	ALIMENTATION	PLAGE DE MESURES
<i>BMM150 SEN 0419</i>	<i>CHAMP MAGNÉTIQUE</i>	<i>INTÉRIEURE</i>	<i>3.3 V par l'Arduino Nano</i>	<i>jusqu'à $B = 3100 \mu T$</i>
<i>BMP280</i>	<i>PRESSION + TEMPÉRATURE INTÉRIEURES</i>	<i>INTÉRIEURE</i>	<i>3.3 V par l'Arduino Nano</i>	<i>de $P = 1100 \text{ hPa}$ jusqu'à $P = 300 \text{ hPa}$ et de $T = -40^\circ \text{C}$ à $T = +85^\circ \text{C}$</i>
<i>DS18B20</i>	<i>TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE</i>	<i>EXTÉRIEURE</i>	<i>5V par les batteries</i>	<i>de $T = -55^\circ \text{C}$ à $T = +125^\circ \text{C}$</i>
<i>MPRLS</i>	<i>PRESSION EXTÉRIEURE</i>	<i>EXTÉRIEURE</i>	<i>5V par les batteries</i>	<i>de $P = 0 \text{ hPa}$ à $P = 1724 \text{ hPa}$</i>
<i>CAPTEUR GEIGER</i>	<i>RADIOACTIVITÉ</i>	<i>INTÉRIEURE</i>	<i>5V par les batteries</i>	<i>pour les rayons gamma jusqu'à $D = 1200 \mu \text{Sv/h}$</i>

Tableau 4 : Les capteurs utilisés dans Icare

Ce qui donne comme branchements sur Fritzing qui servira de base pour la conception des PCB extérieurs et intérieurs, voir ci-dessous la Figure 22.

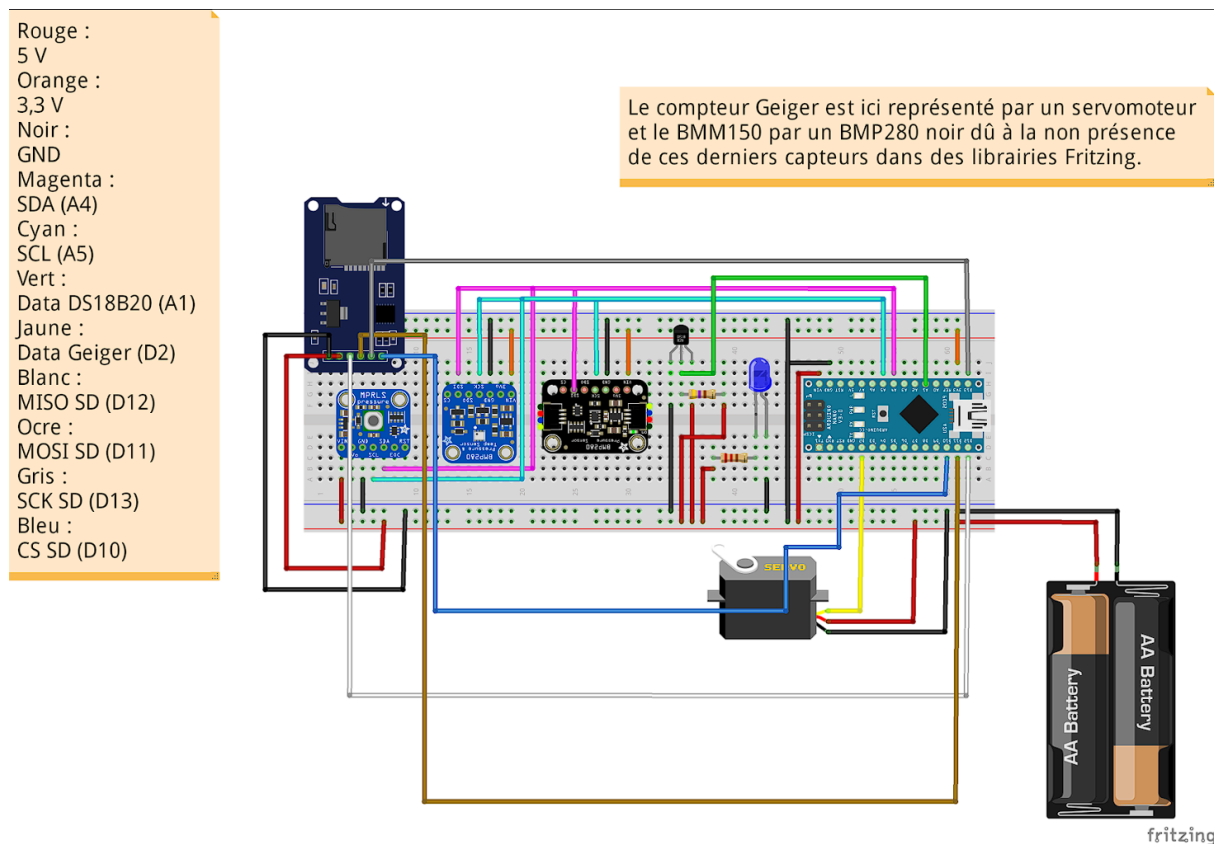


Figure 22 : Branchements des expériences intérieures et extérieures avec la carte µSD, l'Arduino Nano et les batteries

Étalonnage des capteurs

Juste avant de pouvoir effectuer ou traiter des résultats de mesures il est important de prendre en compte que les capteurs ne sont pas initialement étalonnés.

En effet, l'étalonnage des capteurs est important pour assurer la précision et la fiabilité des mesures. Sans cela, les capteurs peuvent fournir des données erronées, compromettant ainsi la cohérence des résultats.

Pour ce faire, nous avons utilisé les spécifications constructeurs présentes dans les datasheet des différents capteurs pour relever différents facteurs influents, voir Tableau 5..

Également, pour confirmer la cohérence des résultats d'étalonnage, nous avons effectué des comparaisons de valeurs avec des références de mesures, tels que l'aérodrome de Tarbes pour la température et la pression, voir Figure 23, 24 et 25.

A noter que pour le MPRLS aucune information pertinente n'a été trouvée dans sa datasheet, d'où son absence dans le Tableau 3 ci-dessous.

CAPTEUR	FONCTION	PRÉCISION	BRUIT
<i>BMP280</i>	<i>PRESSION</i>	$\pm 1,0 \text{ hPa}$ puis $\pm 1,7 \text{ hPa}$ <i>si</i> $< -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$+1,3 \text{ Pa}$
<i>BMP280</i>	<i>TEMPÉRATURE</i>	$\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ puis $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <i>si</i> $< 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-
<i>BMM150 SEN 0419</i>	<i>CHAMP MAGNÉTIQUE</i>	$\pm 1 \text{ } \mu\text{T}$	$+0,6 \text{ } \mu\text{T}$
<i>DS18B20</i>	<i>TEMPÉRATURE</i>	$\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ puis $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <i>si</i> $< -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-
<i>CAPTEUR GEIGER</i>	<i>RADIOACTIVITÉ</i>	$\pm 1 \text{ CPS}$ <i>ou</i> $\pm 0,4 \text{ } \mu\text{Sv/h}$	$+0,41667 \text{ CPS}$ <i>ou</i> $+0,16556 \text{ } \mu\text{Sv/h}$

Tableau 5 : Spécifications constructeurs des différents capteurs

Comme dit précédemment, les capteurs de températures et de pressions ont été étalonnés grâce à l'aérodrome de Tarbes. En effet, le domaine de l'aéronautique requiert une précision importante pour ces valeurs, c'est ce qui nous a poussé à le choisir comme valeur de référence, en plus de la proximité avec l'emplacement du lancement du ballon.

Processus du calcul de la valeur de correction de la pression :

- Relevé la pression QNH de l'aéroport Tarbes-Lourdes-Pyrénées : P_{QNH}
- Relevé l'altitude de l'aéroport Tarbes-Lourdes-Pyrénées : z
- Calculé la pression QFE de l'aéroport Tarbes-Lourdes-Pyrénées : $P_{\text{QFE}} = P_{\text{QNH}} - (z/8)$
Partant du postulat que la pression atmosphérique diminue (dans la troposphère) de 1 hPa pour chaque 8 m.
- Comparé les valeurs avec celles des capteurs : $\Delta P_i = P_{\text{QFE}} - P_i$ et $\Delta P_e = P_{\text{QFE}} - P_e$

Processus du calcul de la valeur de correction de la température :

- Relevé la température de l'aéroport Tarbes-Lourdes-Pyrénées : T_{ref}
- Comparé les valeurs avec celles des capteurs : $\Delta T_i = T_{\text{ref}} - T_i$ et $\Delta T_e = T_{\text{ref}} - T_e$

ETALONNAGE DU BMP 280

PRESSION			TEMPERATURE		
P _{QNH} (hPa)	z (m)	P _{QFE} (hPa)	T _{ref} (°C)	T _i (°C)	ΔT _i (°C)
1015	379	967,625	28	28,74	-0,74
P _i (hPa)	ΔP _i (hPa)	967,625	28	28,74	-0,74
968,88	-1,255			28,74	-0,74
968,89	-1,265			28,75	-0,75
968,91	-1,285			28,75	-0,75
968,92	-1,295			28,76	-0,76
968,92	-1,295			28,76	-0,76
968,93	-1,305			28,77	-0,77
968,93	-1,305			28,78	-0,78
968,94	-1,315			28,78	-0,78
968,93	-1,305			28,79	-0,79
Ecart Moyen (hPa)				Ecart Moyen (°C)	
-1,29			-0,76		

Figure 23 : Etalonnage du BMP 280

ETALONNAGE DU MPRLS		
PRESSION		
P_{QNH} (hPa)	z (m)	P_{QFE} (hPa)
1015	379	967,625
P_e (hPa)	ΔP_e (hPa)	
969,12	-1,495	
969,16	-1,535	
969,23	-1,605	
969,2	-1,575	
969,17	-1,545	
969,2	-1,575	
969,15	-1,525	
969,14	-1,515	
969,17	-1,545	
Ecart Moyen (hPa)		-1,55

Figure 24 : Etalonnage du MPRLS

ETALONNAGE DU DS18B20		
TEMPERATURE		
$T_{ref} (°C)$	$T_i (°C)$	$\Delta T_i (°C)$
28	30,25	-2,25
	30,19	-2,19
	30,19	-2,19
	30,17	-2,17
	30,14	-2,14
	30,14	-2,14
	30,1	-2,1
	30,1	-2,1
	30,08	-2,08
	30,06	-2,06
	30,06	-2,06
		Ecart Moyen (°C)
		-2,13

Figure 25 : Etalonnage du DS18B20

Une fois l'étalonnage effectué, nous pouvons implémenter les corrections dans le programme Arduino. Ainsi, la l'exploitation des mesures est considérablement plus cohérente.

Exploitation des mesures

Pour faciliter l'exploitation des mesures, elle a été effectuée en deux parties :

- Phase ascendante du ballon
- Phase descendante du ballon

Les données traitées sont :

- Débit de dose de radioactivité en CPS, voir Figure 26 et 27
- Débit de dose de radioactivité en $\mu\text{Sv/h}$, voir Figure 26 et 27
- Température intérieure en $°C$, voir Figure 30 et 31
- Température extérieure en $°C$, voir Figure 30 et 31
- Pression intérieure en kPa, voir Figure 32 et 33
- Pression extérieure en kPa, voir Figure 32 et 33
- Champ magnétique en μT , voir Figure 28 et 29

Toutes ses valeurs sont exploitées en fonction de l'altitude du ballon. De plus, le logiciel utilisé pour cela est Matlab, en raison du grand nombre de données.

On observe que la radioactivité a bel et bien atteint son maximum au niveau du Regener-Pfotzer Maximum, avec une moyenne de $5,17 \mu\text{Sv/h}$ entre 18 et 21 km pour une valeur maximale de $10,33 \mu\text{Sv/h}$ à 18 974 mètres. Cette valeur correspond à près de 5 fois la norme pour les employés du nucléaire en France, qui est de 20 mSv/an soit $2,28 \mu\text{Sv/h}$. Cependant, cette quantité reste relativement basse, elle peut être dû à l'activité du Soleil qui interagit avec la magnétosphère qui est plus efficace en durant ces cycles.

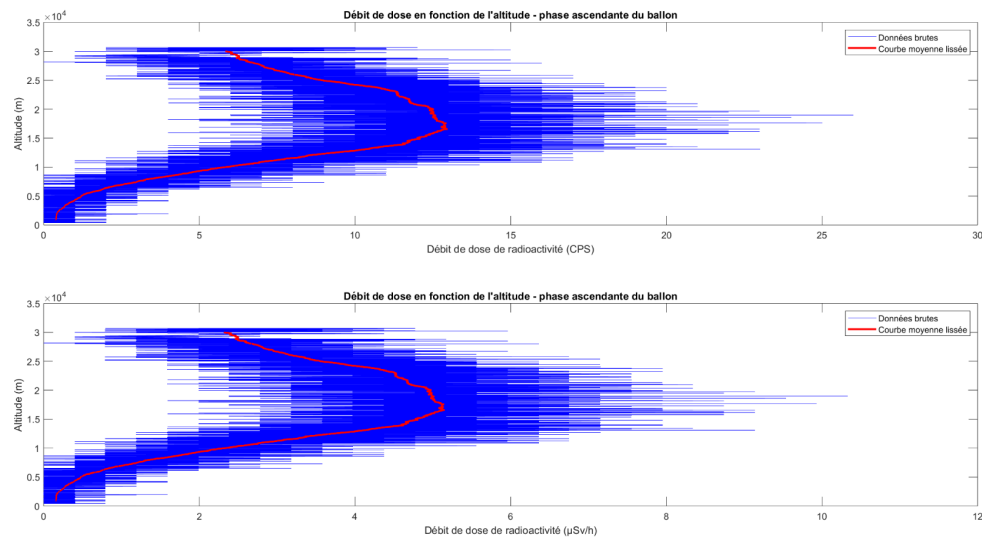


Figure 26 : Phase ascendante du ballon - débit de dose en fonction de l'altitude

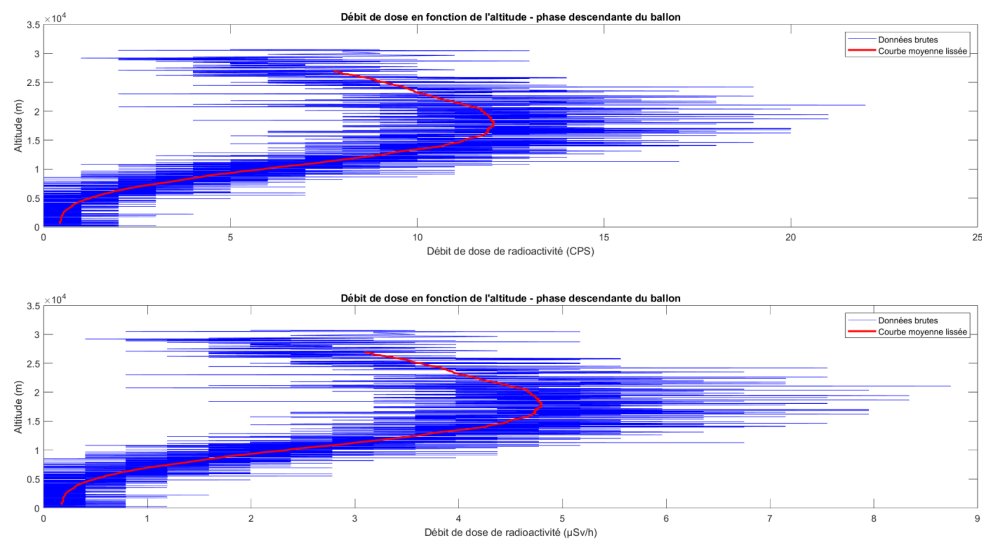


Figure 27 : Phase descendante du ballon - débit de dose en fonction de l'altitude

Les courbes révèlent bel et bien l'attente de l'étude théorique, avec un Regener-Pfotzer Maximum plus élevé que la normale et un débit de dose beaucoup plus élevé qu'à la surface.

Concernant le champ magnétique, nous observons qu'il ne varie pas trop avec une moyenne constante entre 35 et 55 μT . Ces valeurs correspondent à la moyenne observée sur Terre, pour des variations plus importantes il aurait fallu dépasser l'atmosphère terrestre. Cependant, on peut observer une légère augmentation du champ magnétique entre la surface et 30 km, de l'ordre de 5 μT .

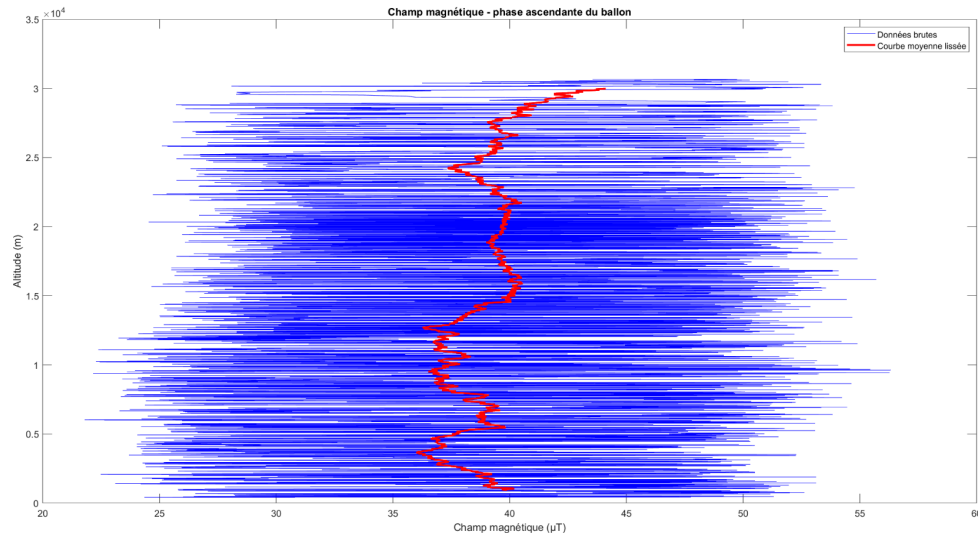


Figure 28 : Phase ascendante du ballon - champ magnétique en fonction de l'altitude

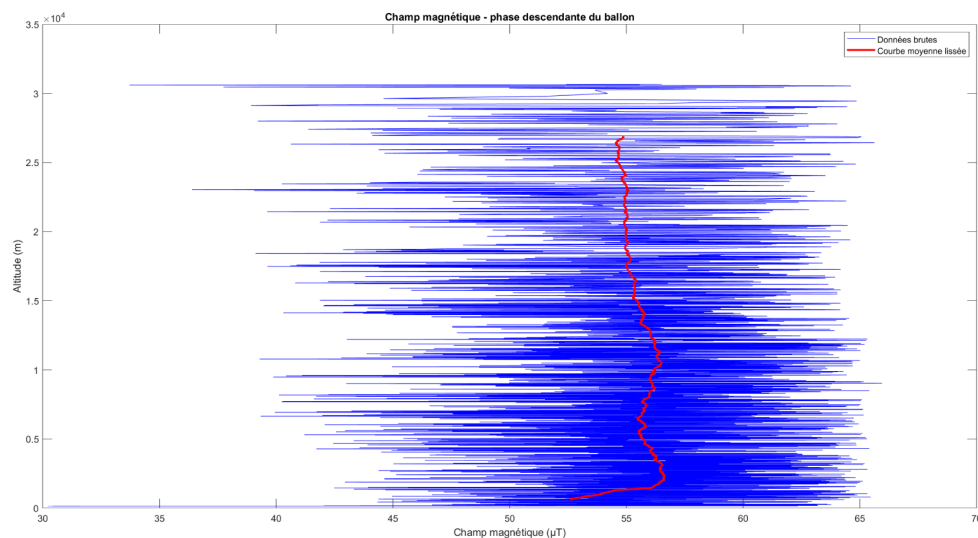


Figure 29 : Phase descendante du ballon - champ magnétique en fonction de l'altitude

Quant aux paramètres météorologiques, il est intéressant de relever que la pression et la température, quelles que soient intérieures ou extérieures, ont fourni des évolutions correspondant parfaitement à l'étude théorique.

A la seule différence, que les valeurs de températures sont beaucoup plus élevées que prévu. Dans la zone extérieure on atteint au minimum une température de **-35,63 °C** pour une altitude **10 897 mètres** contre une température prévue de **-55 °C**. Et pour la zone intérieure la température n'est jamais descendue en dessous des **+16,64 °C**.

Ces températures sont relativement hautes pour la stratosphère, pourtant ce ne sont pas des erreurs de mesures. En effet, il faut prendre en compte que la nacelle était recouvert de peinture noire, avec en plus une couverture de survie entre les deux zones. Sans négliger que le ballon a été lancé en plein jour avec un ensoleillement particulièrement intense.

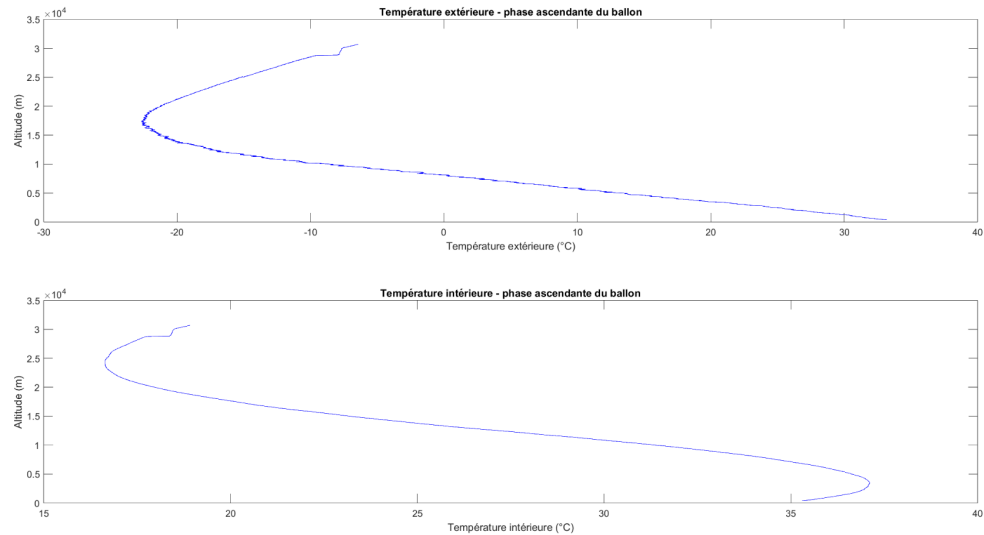


Figure 30 : Phase ascendante du ballon - température en fonction de l'altitude

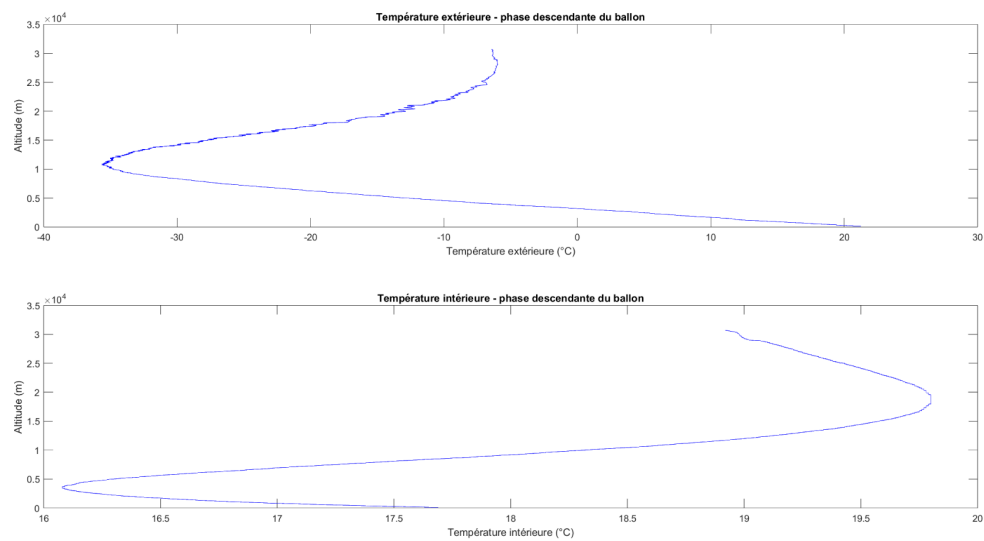


Figure 31 : Phase descendante du ballon - température en fonction de l'altitude

Pour finir, la pression quant à elle est restée la même pour les deux capteurs lors des deux phases du ballon. Avec juste une légère hausse de pression pour la phase descendante dû au changement d'élévation entre le **camp du Ger (405 mètres)** et la **banlieue nord-ouest de Toulouse (155 mètres)** où a été retrouvé le ballon.

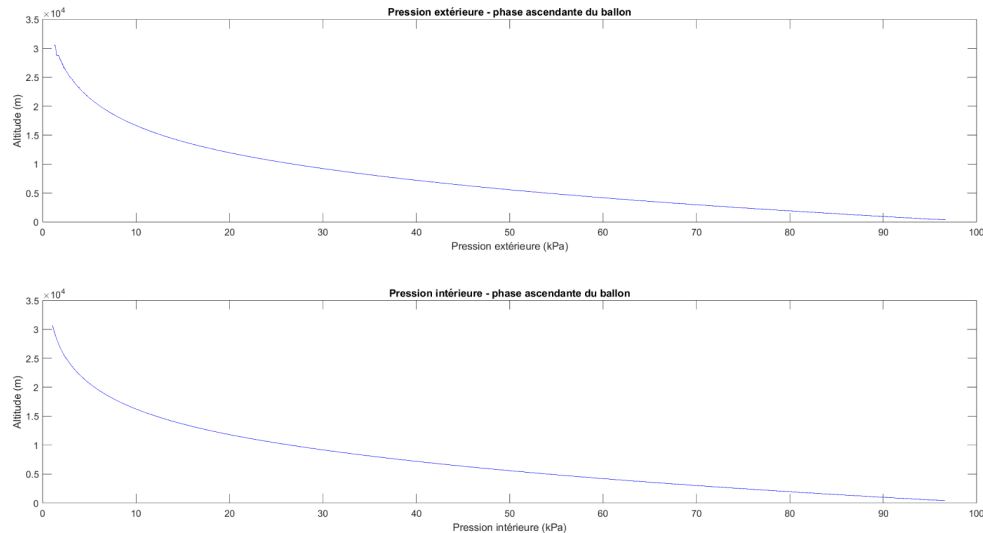


Figure 32 : Phase ascendante du ballon - pression en fonction de l'altitude

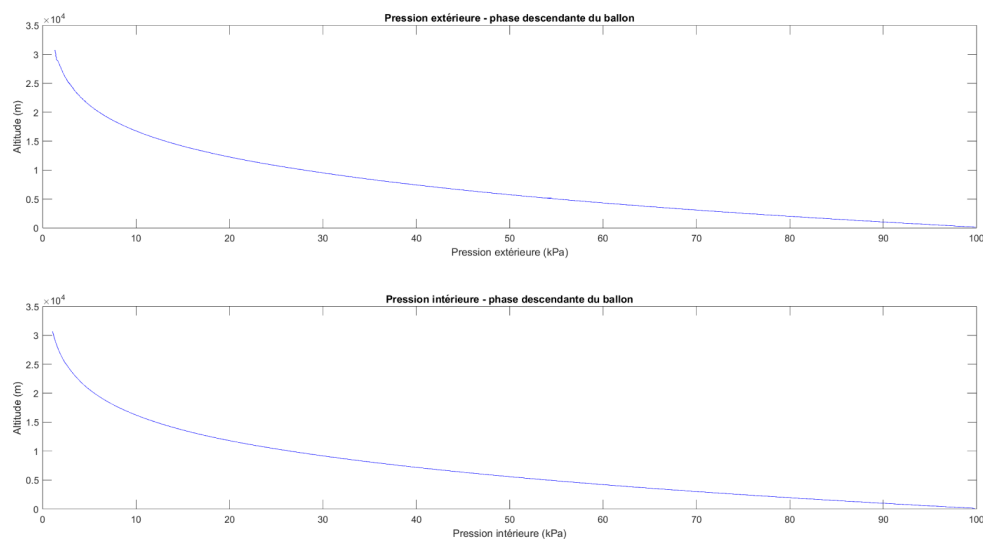


Figure 33 : Phase descendante du ballon - pression en fonction de l'altitude

On peut conclure que les expériences d'Icare ont été un franc succès. Il a été possible sans aucun problème d'effectuer toutes les mesures du ballon. Il est intéressant de voir comment la théorie et la réalité sont très proches. Surtout que la radioactivité dans l'atmosphère est malheureusement un domaine très peu étudié.

Cependant, il serait intéressant de refaire d'autres mesures pour comparer les valeurs sous différentes conditions (par exemple sans tempête solaire).

Également, le ballon étant très bien isolé thermiquement, nous n'avons pas pu aller au bout du souhait de simuler réellement les conditions extérieures, pour une prochaine fois moins isoler la partie concernée.

Les caméras

La première caméra sélectionnée est la caméra nue Hawkeye 3D/Gyroflow V4 4K Split.

Nous avons choisi ces caméras car nous avions une volonté d'obtenir des images de qualité correcte, ici en filmant en 4K 50fps. Elles ont été choisies lors de l'année 2022-2023, avant que nous arrivions dans ce projet. Un autre point important, leur petite taille nous a été bénéfique lors de la modélisation de la nacelle, car cela nous a permis de respecter les contraintes imposées de poids, etc...

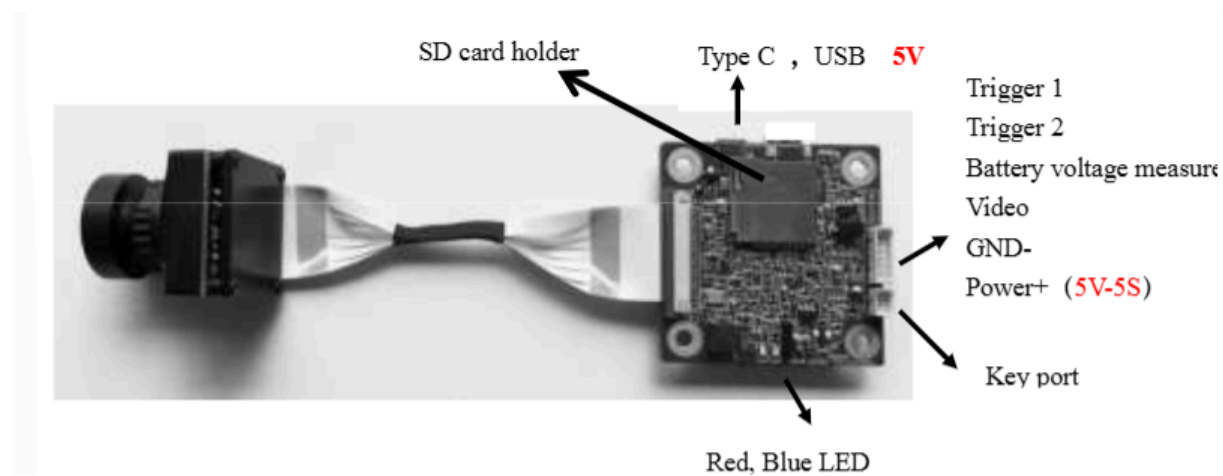


figure 34 : Description de la caméra Hawkeye 3D/Gyroflow V4 4K Split

Nous avons formaté notre carte SD afin de pouvoir effectuer des enregistrements vidéos.

- Nous avons programmé la caméra afin qu'elle puisse filmer en 4k 50fps.
- Nous ne pouvions pas encore modifier les paramètres des caméras.
- Nous avons également réussi à prendre des photos mais nous devons revoir le fonctionnement.

Après certaines recherches, nous avons trouvé comment alimenter la caméra et également comment la programmer.

En ce qui concerne l'alimentation:

Au départ nous devions utiliser les batteries NiMH de 9V cependant, ces dernières étaient trop lourdes et on avait aucune information sur elles, ni quand elles étaient chargées.

Pour l'alimentation, les caméras devaient recevoir entre 5 et 27V. Nous avons donc décidé d'utiliser des batteries externes qui fournissent 5V. Cependant, lors du C'Space nous nous sommes rendu compte que dessous des caméras fondait. En effet, elles devaient recevoir une certaine puissance. Cependant, étant donné que nous leur avons fourni seulement 5V, elles ont consommé plus d'ampères, ce qui a causé ce souci.

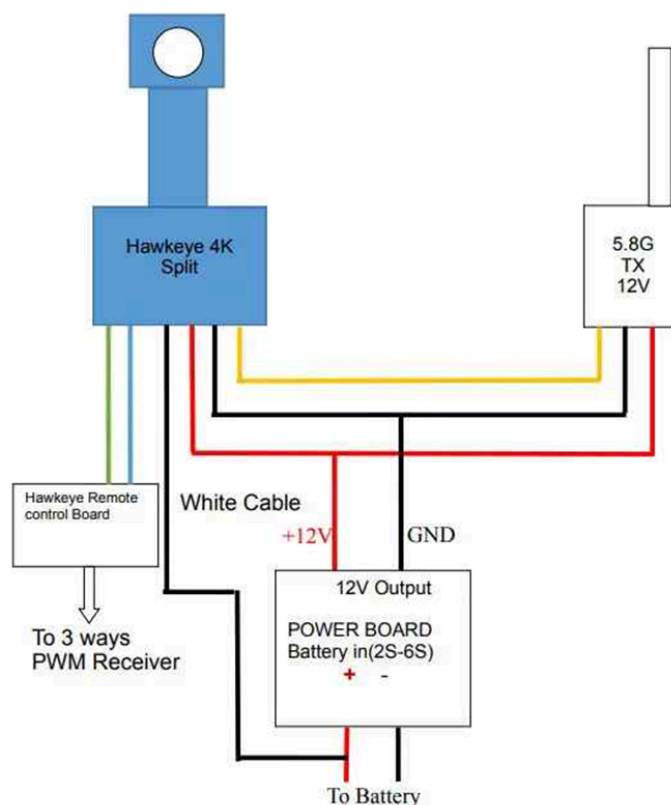


figure 35 : Schéma explicatif des branchements de la caméra

En ce qui concerne la programmation:

Il nous fallait un écran de la même marque que la caméra, ici Hawkeye ainsi qu'un câble USB-C/ Jack, afin d'assurer la compatibilité avec la caméra. Tous les composants étant réunis et les procédures branchements effectuées et respectées, cela ne fonctionne pas, l'écran n'affiche rien. Les raisons de ce problème nous sont encore inconnues, malgré de maintes tentatives de résolutions, mais nous pensons que cela est sûrement dû à un problème/ soucis au niveau de l'alimentation. Nous n'avons donc pas réussi à programmer nos caméras Hawkeye afin qu'elles filment en continu. Cependant, les caméras filmaient correctement des enregistrements de 5 minutes, cela nous a donné espoir de les faire fonctionner alors nous avons décidé de les garder.

Pour le placement des caméras dans la nacelle:

Au départ, nous voulions placer une caméra sur les côtés de la nacelle et une sur le dessous. Avec le problème de dernière minute que nous avons rencontré, nous avons simplement collé la nouvelle caméra (caméra SQ16) sur le côté avec du ruban adhésif et de la colle forte liquide.

6) Télémessure

Composants

- LoRa RFM95 (Module LoRa)
- SIM7600G-H (Module GSM)
- ESP32 WROOM32 (Micro-Contrôleur)
- Carte SD 16GO.
- Antenne GNSS en céramique
- Antenne 4G souple

Système de télémessure global

La nacelle est équipée d'un système de télémessure afin de pouvoir transmettre la position de la nacelle à l'équipe de suivi afin de pouvoir la récupérer dès son atterrissage.

A l'origine, la télémessure d'Icare devait permettre de transmettre les coordonnées GNSS de la nacelle à une station sol grâce à un module **LoRa** et également de les uploader sur un site internet grâce à la 4G. La télémessure LoRa devait permettre un suivi de la nacelle sur une portée d'environ **10 km** avec un débit maximal d'une cinquantaine de **kbit/s**. La **4G** permet, quant-à-elle un suivi sur tout le territoire tant que la nacelle est à portée d'un réseau **4G** avec un débit pouvant aller jusqu'à **10 Mbit/s**. Nous pouvons voir le circuit imprimé de la télémessure dans les figures 36 et 37.

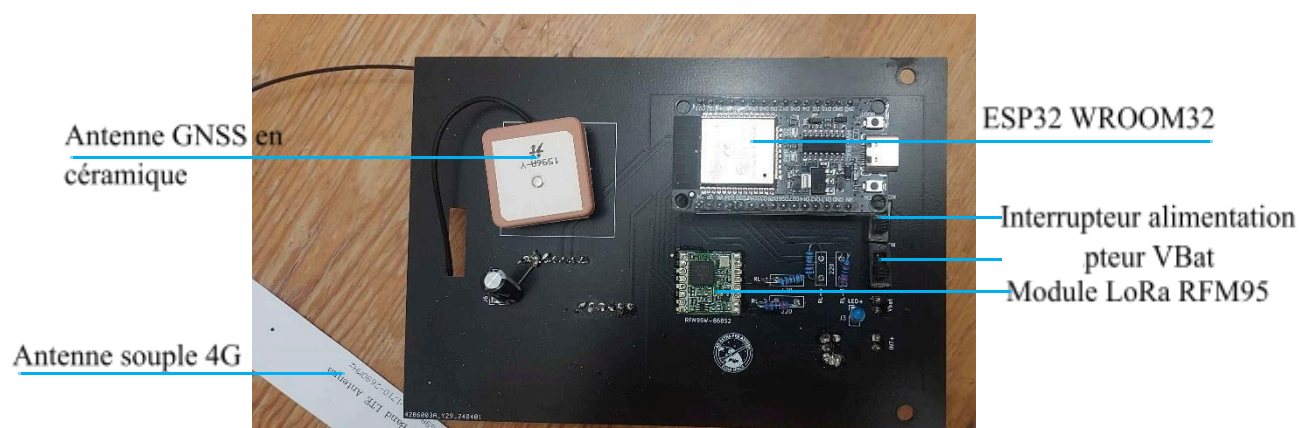


Figure 36 : Photographie du PCB de la télémessure (vue de dessus)



Figure 37 : Photographie du PCB de la télémessure (vue de dessous)

Télémessure 4G

La télécommunication **4G** est assurée par le module **GSM SIM7600G-H breakout** contrôlé par une **ESP32**. Une antenne souple **4G** et une antenne **GNSS** en céramique sont branchées au module GSM. Le placement de ces antennes est crucial. L'antenne GNSS ne doit pas être gênée par d'autres composants électroniques pour pouvoir acquérir le signal des satellites et l'antenne 4G doit pouvoir émettre à l'horizontale afin d'avoir le plus de bande passante une fois que la nacelle a atterri.

Le module GSM arrive à se géolocaliser grâce aux constellations satellites GNSS : **GPS** (Etats-Unis), **BEIDOU** (Chine) et **GLONASS** (Russie). Une fois la géolocalisation acquise, l'ESP 32 enregistre les données GNSS (Latitude, Longitude, Altitude) sous format **csv** sur une carte SD de **16GO** puis les transmet par protocole **http** sur un site internet nommé **Thingspeak**. Cette configuration nous permettait à la fois de suivre la nacelle en temps réel dès lors qu'elle était à portée d'un réseau **4G** et de pouvoir retracer sa route avec les données enregistrées sur la carte SD.

Le module GSM génère une trame NMEA qui contient sa latitude, sa longitude, son altitude, l'heure UTC, la date, ainsi que la vitesse. Comme nous voulions économiser au maximum la puissance de l'ESP 32 et de facto l'autonomie des batteries, nous avons préféré ne conserver que les données les plus importantes : **la latitude, la longitude et l'altitude**. Pour ce faire, nous avons d'abord créé les variables Lat, Lon et Alt (respectivement Latitude, Longitude et Altitude) sous format **String** puis nous exploitons la trame NMEA qui se présente comme suit :

+CGPSINFO : 1234.567890,N,01234.567890,E,130824,131601.0,227.9,0.0,

Les valeurs sont utilisées comme exemple de représentation, il est important de noter que la taille de la trame NMEA est constante. Les valeurs sont expliquées de gauche à droite dans le tableau 6.

+CGPSINFO :	Syntaxe de réponse du module SIM7600G-H
1234.567890	Degrés Latitude (ici : <i>12°34.567890'</i>) Plage : 00°00.000000' – 89°59.999999'
N	N pour degrés Latitude Nord. Si nous étions sous l'équateur, il serait inscrit un S pour Sud.
01234.567890	Degrés Longitude (ici : <i>012°34.567890'</i>) Plage : 000°00.000000' – 179°59.999999'
E	E pour degrés Longitude Est. Si nous étions à l'ouest du méridien de Greenwich, il serait inscrit un W pour West.
130824	Date de la création de la trame NMEA JJ/MM/AA (ici nous sommes le 13/08/2024)
131601.0	Heure UTC de la création de la trame NMEA HH/MM/SS.S (ici il est 13h16'01.0" UTC)
227.9	Altitude en mètres
0.0	Vitesse sol en nœuds

tableau 6 : Explications de la structure de la trame NMEA reçue par le module GSM

Nous avons extrait, par l'utilisation de tableaux statiques, les caractères formant la latitude, la longitude et l'altitude puis nous les avons intégrés dans leurs variables string respectives. Le fait que la taille de la trame NMEA soit constante permet cette méthode car les caractères se situent toujours « au même endroit » sur la trame. Nous pouvons alors aller chercher les données au même endroit pour les intégrer dans leurs variables String, qui est transmissible par 4G et LoRa.

Lorsque la position n'est pas acquise, la trame NMEA est vide (en réalité une suite d'une dizaine de virgules) et donc les variables à transmettre sont également vides, c'est pourquoi le module GSM ne transmet pas les données. C'est également pourquoi les dernières valeurs affichées sur Thingspeak sont les dernières valeurs valides transmises par le module GSM.

Nous pouvons voir une capture d'écran de la dernière trame reçue lors du décollage du ballon dans la figure 38, environ 7 minutes après le lâcher.

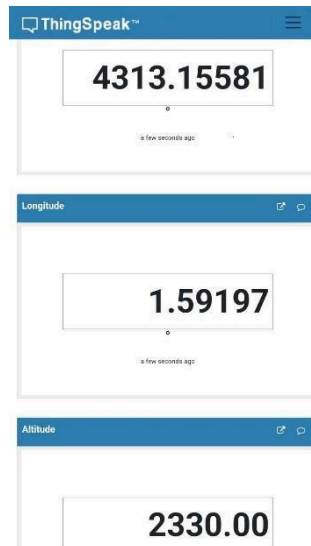


Figure 38 : Dernière trame NMEA reçue lors du décollage du ballon

Télémesure LoRa

La télécommunication LoRa devait permettre le suivi de la nacelle pour une portée théorique d'une dizaine de kilomètres. Le module LoRa RFM95 était branchée à l'ESP32 par liaison **SPI** et émettait avec une antenne omnidirectionnelle de **3 dBi**. Cependant, l'ESP 32 ne pouvait pas gérer à la fois la télécommunication 4G et LoRa. Le programme s'arrêtait après un cycle (envoi et enregistrement des données par LoRa et 4G) et parfois il s'arrêtait tout simplement lors de l'initialisation du module GSM. Nous avons donc, 2 jours avant le lancement, pris la décision d'abandonner le LoRa pour se concentrer sur la 4G qui maximise les chances de retrouver la nacelle.

Détails du vol

Le vol, du lâcher à l'atterrissage, a duré environ **2h50**. Le décollage a eu lieu à **15h** et la dernière trame NMEA reçue au décollage remonte à **15h07** qui est visible dans la figure 38. S'ensuit alors un silence radio de **2h30**. Nous pensions récupérer la télécommunication vers **17h** pour une altitude d'environ **2000 m** mais contre toute attente, c'est à **17h34** que nous recevons une trame NMEA affichant une altitude de **5402 m**, elle est visible dans la figure 39. Il a fallu par la suite attendre **17h46** pour recevoir une nouvelle trame à **995 m** d'altitude puis nous avons pu suivre en direct la descente de la nacelle jusqu'à **130 m** d'altitude où elle était posée, l'heure d'atterrissage estimée est de **17h50**.

La trajectoire de la nacelle est représentée dans la figure 40. Une échelle de couleur représente l'altitude de la nacelle et le point rouge l'altitude d'éclatement du ballon. Les données sont enregistrées toutes les **15 secondes** environ. Chaque point de couleur représente la position du ballon, plus ils sont espacés, plus le ballon se déplace vite horizontalement.

Dès le décollage le ballon est poussé par un vent **d'ouest sud-ouest** jusque vers **Fonsorbes** où il arrive à une altitude de **18000m**, le ballon se fait ensuite déporter par un vent **d'est**. Nous pouvons

assez facilement remarquer qu'après l'éclatement du ballon, la nacelle descend rapidement (toujours poussée par les vents) jusqu'à une altitude d'environ **10000m** à laquelle le parachute se déploie. Nous pouvons le déduire par l'espacement entre les points de mesures qui témoignent d'une grande vitesse verticale pour une faible vitesse horizontale après l'éclatement, puis d'une vitesse horizontale élevée pour une faible vitesse verticale. La nacelle a alors atterri au **nord-ouest** de **Toulouse** chez un particulier. Comme la personne était absente, c'est un de ses voisins qui nous a aidés à récupérer la nacelle.

L'emballage en papier cadeau autour de la nacelle était beaucoup défectueux, il nous a été très facile de la libérer de la chaîne de vol.

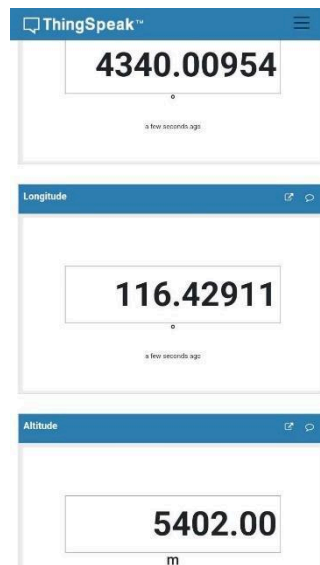


Figure 39 : Première trame NMEA reçue après ré acquisition du signal

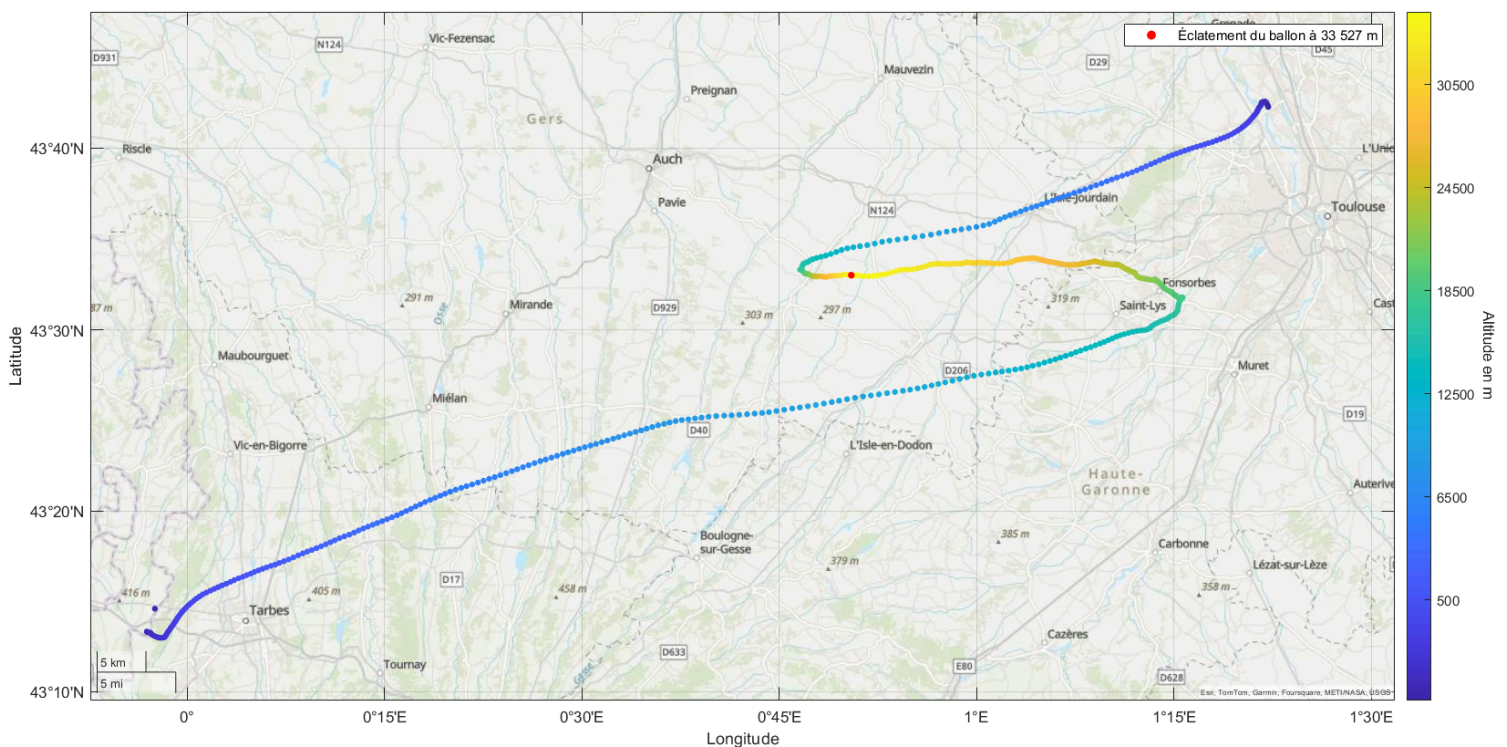


Figure 40 : Tracé de la trajectoire de la nacelle sur une carte topographique avec MATLAB

7) Chronologie

La chronologie s'effectue avant le décollage. Elle permet d'être certains que l'appareil est prêt au décollage, que les expériences sont bien allumés, etc...

Elle est divisée en 3 parties, 3 zones: la zone vie, la zone tente de club et la zone lâché.

ZONES	OPÉRATEURS	T (durée de la tâche)	CHECK
ZONE VIE			
charger les batteries	Louis		☒
vider les cartes SD	Anaïs		☒
attacher la télémessure	Arnaud	3'45	☒
brancher les batteries aux expériences, GEIGER, caméras et télémessures	Arnaud		☒
vérifier que tout s'allume	Arnaud	1'34	☒
vérifier les expériences intérieures, extérieures et GEIGER ainsi que la cohérence des valeurs	André	4'24	☒
vérifier la télémessure et la cohérence des valeurs	Arnaud	3'39	☒
mettre le rack et vérifier les couvertures de survie, remettre les cartes SD	Arnaud	5'	☒
vérifier que tout est bien branché et fixé	Anaïs	20s	☒
mettre les cures dents	Arnaud	1'	☒
ZONE TENTE DE CLUB			
vérifier tout l'allumage et les batteries	Arnaud	34s	☒

ZONE LÂCHÉ			
allumer toutes les expériences	Arnaud	16s	☒
vérifier/ allumer la télémessure: - initialisation - 7 signaux lumineux - vérifier les valeurs	Arnaud	2'14	☒
installer et allumer la caméra (signal lumineux)	Arnaud	30s	☒
fermer la nacelle et mettre la feuille	Arnaud	2'	☒
Vérifier les valeurs de la télémessure	Arnaud	2'	☒

figure 41 : Chronologie de lancement du ballon sonde

8) Bilan financier

Le projet Icare a coûté en totalité **700€** pour un budget maximal de **800€**. Ci-dessous (figure 42), un tableau d'allocation du budget de différents domaines. Les cases jaunes représentent le reste du budget après l'achat des composants.

Budget pour les caméras :	155,00 €	2,11 €
Budget pour les composants :	400,00 €	4,47 €
Budget pour les PCB :	66,00 €	0,76 €
Budget pour mécanique	90,00 €	3,08 €

Figure 42 : Tableau d'allocation du budget de différents domaines

Les montants attribués ont beaucoup changé selon l'avancée du projet et permettent de visualiser la répartition des dépenses. Dans la figure 43 nous pouvons voir un tableau des dépenses détaillé. Celles en vert avec fond noir représentent des dépenses « inutiles » car les composants n'ont finalement pas été utilisés ou étaient défectueux.

Composants	Nombres	Coût unitaire	Cout total
Câbles d'alimentation Cam	1	9,39 €	9,39 €
Batteries externe Cam	1	14,99 €	14,99 €
Cartes SD	1	21,99 €	21,99 €
Caméras HawkEyes	2	53,26 €	106,52 €
			152,89 €
Compteur Geiger	1	29,27 €	29,27 €
Magnétomètre	2	8,30 €	16,60 €
Baromètre	1	18,15 €	18,15 €
Thermomètres Aliexpress	1	3,90 €	3,90 €
Nouveau thermomètre	1	6,80 €	6,80 €
Batteries LiPo	2	23,99 €	47,98 €
Batteries NiMH	2	18,50 €	37,00 €
Antenne LoRa	1	2,76 €	2,76 €
Module LoRa 868 MHz	4	4,93 €	19,70 €
Adaptateurs RF SMA	1	1,96 €	1,96 €
Nouveau Magnétomètre	1	11,20 €	11,20 €
Nouveau Baromètre	1	25,60 €	25,60 €
Câble DJI	1	20,77 €	20,77 €
Convertisseur de tension 2A	1	18,95 €	18,95 €
Convertisseur de tension 3A	1	12,47 €	12,47 €
Ecran Cam	1	54,38 €	54,38 €
Module GSM	1	44,77 €	44,77 €
Câbles JST	1	1,21 €	1,21 €
Resistances	1	2,00 €	2,00 €
Vis	1	9,06 €	9,06 €
Adaptateur Jack	1	11,00 €	11,00 €
			395,53 €
PCB	1	54,38 €	54,38 €
PCB Télécommunications	1	10,86 €	10,86 €
			65,24 €
PLA	1	20,34 €	20,34 €
Ruban Adhésif	1	28,49 €	28,49 €
Colle Nacelle	1	9,99 €	9,99 €
Colle PATTEX	1	14,90 €	14,90 €
Étiquettes Geiger	1	13,20 €	13,20 €
			86,92 €
		Total dépenses	700,58 €
		Restant	107,42 €

Figure 43 : Tableau détaillé des dépenses du projet Icare

Dans la figure 44 nous pouvons voir un bilan des dépenses. Le budget total du projet est de 808€, la marge de budget correspond à la différence entre le budget total attribué et le budget réellement utilisé. Le reste correspond à la somme des restes des différents domaines (en jaune) visible dans la figure 42.

Nous pouvons également y voir les dépenses « inutiles » qui correspondent aux dépenses n'ayant pas été utilisées pendant la mission due à du matériel défectueux, un composant ne convenant pas, un capteur endommagé, etc...

Il reste important de noter que beaucoup d'erreurs ont engendré des coûts supplémentaires, surtout dans le domaine des caméras. En revanche, ces erreurs nous ont permis d'apprendre, que ce soit les batteries NiMH changées en LiPo, les caméras ou encore de nombreux capteurs qui ont été cassés lors de brasages ou mauvaises manipulations.

Marge de budget :	97,00 €
Budget total	808,00 €
Reste	10,42 €

Dépenses effectives	425,30 €
Dépenses "inutiles"	275,28 €

Figure 44 : Bilan des dépenses du projet Icare

9) Remerciements

Ce projet nous a permis d'en apprendre énormément sur la gestion de projet et d'avoir un petit aperçu de l'immense partie administrative qui permet à un projet d'être mené à terme. Il nous a également apporté énormément de connaissances techniques et mécaniques que nous pourrions développer durant notre formation. Ce projet, malgré de nombreuses difficultés, s'est très bien passée et la mission fut une réussite, cela nous a motivé de continuer et d'en apprendre toujours plus.

Nous remercions grandement les suiveurs de **Planète Sciences** pour leur accompagnement et leur pédagogie tout au long du projet, notamment notre suiveur ballon **Damien POIX** ainsi que les **bénévoles de Planète Sciences** pour la préparation du décollage et le bon déroulement de celui-ci.

Nous aimerions également remercier **Hugo ALLAIRE** qui nous a bien aidé durant ces deux ans de travail et **Florian LEVRAY** qui a fondé le projet en Octobre 2022 et qui nous a beaucoup aidé et conseillé durant sa réalisation.

Nous souhaitons également remercier **Marc Dal Molin**, le propriétaire de la maison où a atterri la nacelle et son voisin **Arthur** qui nous ont aidés à récupérer la nacelle peu de temps après son atterrissage, grâce à qui nous avons pu mettre rapidement en sécurité les données de vol.

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude envers les **partenaires** de l'association qui ont permis de rendre cette aventure possible. Leur soutien technique et financier nous a été d'une aide précieuse pour la réalisation de ce projet ambitieux. Nous espérons que cette collaboration fructueuse se poursuivra dans le futur afin de nous permettre de continuer à repousser nos limites.

AD ASTRA PER ASPERA

