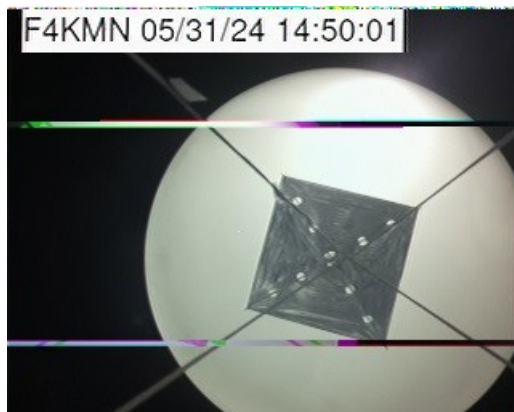
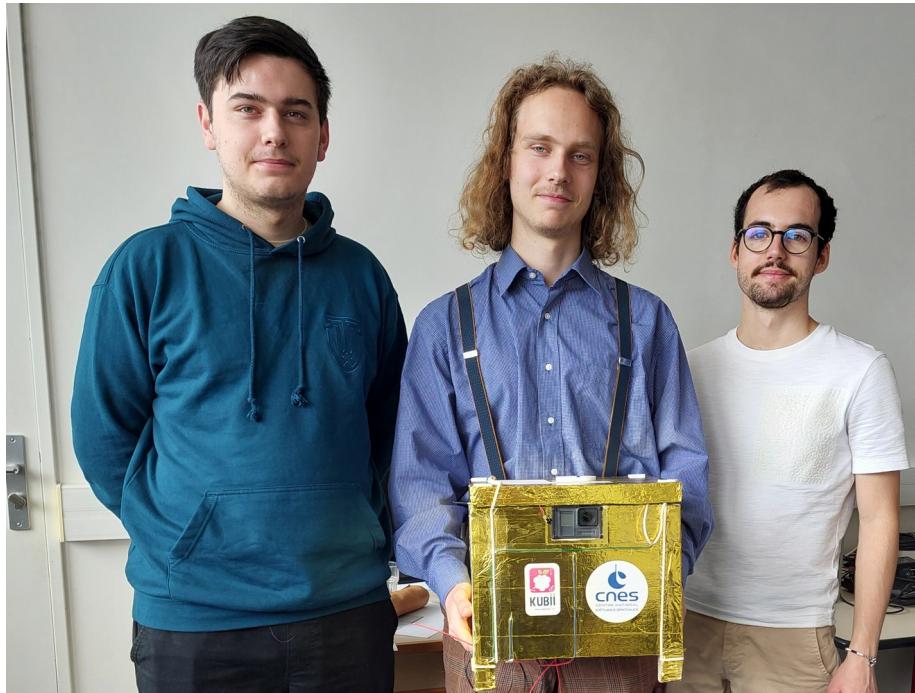




Lycée
TOUCHARD
WASHINGTON



Ballon stratosphérique Lycée Touchard Washington



Étudiants : **ABRAHAM Thomas, BROCHARD Damien, AUTHIER Ruben**

Professeurs référents : **Le CREN Anthony, SIMIER Philippe, BERNARD Didier,
HERISSON Patrice**

Table des matières

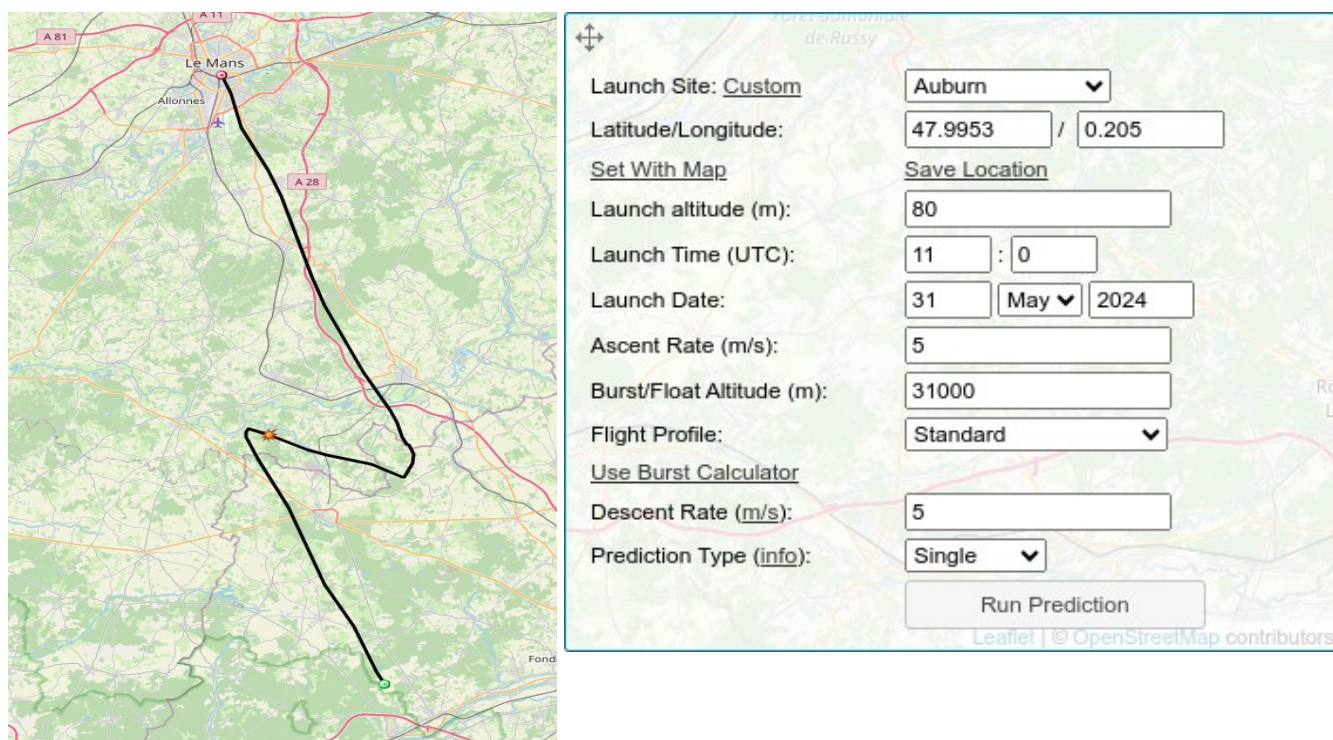
Ballon stratosphérique Lycée Touchard Washington.....	1
Compte Rendu d'expériences Ballon 2024.....	3
1 Présentation générale.....	3
2 Prévion de la trajectoire du ballon-sonde.....	3
3 Pesée - Vitesse de montée.....	4
4 Le suivi de la trajectoire du ballon.....	5
5 Éclatement du ballon.....	6
6 Atterrissage & récupération de la nacelle.....	8
7 Photos du ballon transmises en SSTV.....	10
8 Photos haute définition.....	12
9 Vérification de la loi des gaz parfait.....	13
10 Alimentation de la charge utile.....	15
11 Fréquences et Indicatifs utilisés.....	16
12 La mesure du rayonnement cosmique.....	17
13 Evolution de la température avec l'altitude.....	19
14 Température minimale à l'intérieur de la nacelle.....	20
15 Evolution de la pression avec l'altitude.....	21
16 Trames APRS via LoRa.....	22
17 Transmission montante LoRa.....	23
18 Source des logiciels sur Github.....	24
19 Conclusions générales.....	25

Compte Rendu d'expériences Ballon 2024

1 Présentation générale

Le projet de ballon stratosphérique a été réalisé par trois étudiants dans le cadre de leur projet de deuxième année de BTS Systèmes Numériques, option Informatique, durant l'année scolaire 2023-2024. Les principales motivations de ce projet étaient de vérifier la loi des gaz parfaits et d'expérimenter la transmission radiofréquence en LoRa, à la fois en montée et en descente. Le ballon a été lancé le 31 mai 2024 depuis Le Mans (72), suivi par une voiture, et récupéré quelques temps après son atterrissage. Malgré quelques petits problèmes, les résultats des expériences se sont révélés intéressants et exploitables.

2 Prédiction de la trajectoire du ballon-sonde



Le site predict.sondehub.org est l'outil en ligne utilisé pour la prédiction de la trajectoire. Il permet de prévoir la trajectoire du ballon-sonde stratosphérique en fonction des conditions météorologiques et des données de lancement. Cela inclut la direction et la distance que le ballon parcourra avant d'atteindre sa hauteur maximale et de redescendre.

En prévoyant où le ballon atterrira, cela nous aide à organiser la récupération du ballon et de sa charge utile. Cela est crucial pour notre projet car les données enregistrées par les instruments à bord doivent être récupérées.

3 Pesée - Vitesse de montée

Le ballon s'élève dans l'atmosphère grâce à la poussée d'Archimède.

La masse de la nacelle est de **1610 g**, soit un poids de **15,8 N** respectant ainsi la limite de 1800 g exigée par le cahier des charges du CNES. Le ballon est rempli d'hélium avec un volume initial de $V=5,0 \text{ m}^3$

Au sol :

$$\text{Poussée d'Archimède} = 1.225 \text{ kg/m}^3 \times 5 \text{ m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \approx 60,0 \text{ N}$$

À 20 km d'altitude (densité de l'air environ 0.0889 kg/m^3 volume du ballon 65 m^3) :

$$\text{Poussée d'Archimède} = 0.0889 \text{ kg/m}^3 \times 65 \text{ m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \approx 56,7 \text{ N}$$

La portance reste constante et permet une vitesse ascensionnelle de **5 m/s**.



Vitesse ascensionnelle décollage = **4,26 m/s**

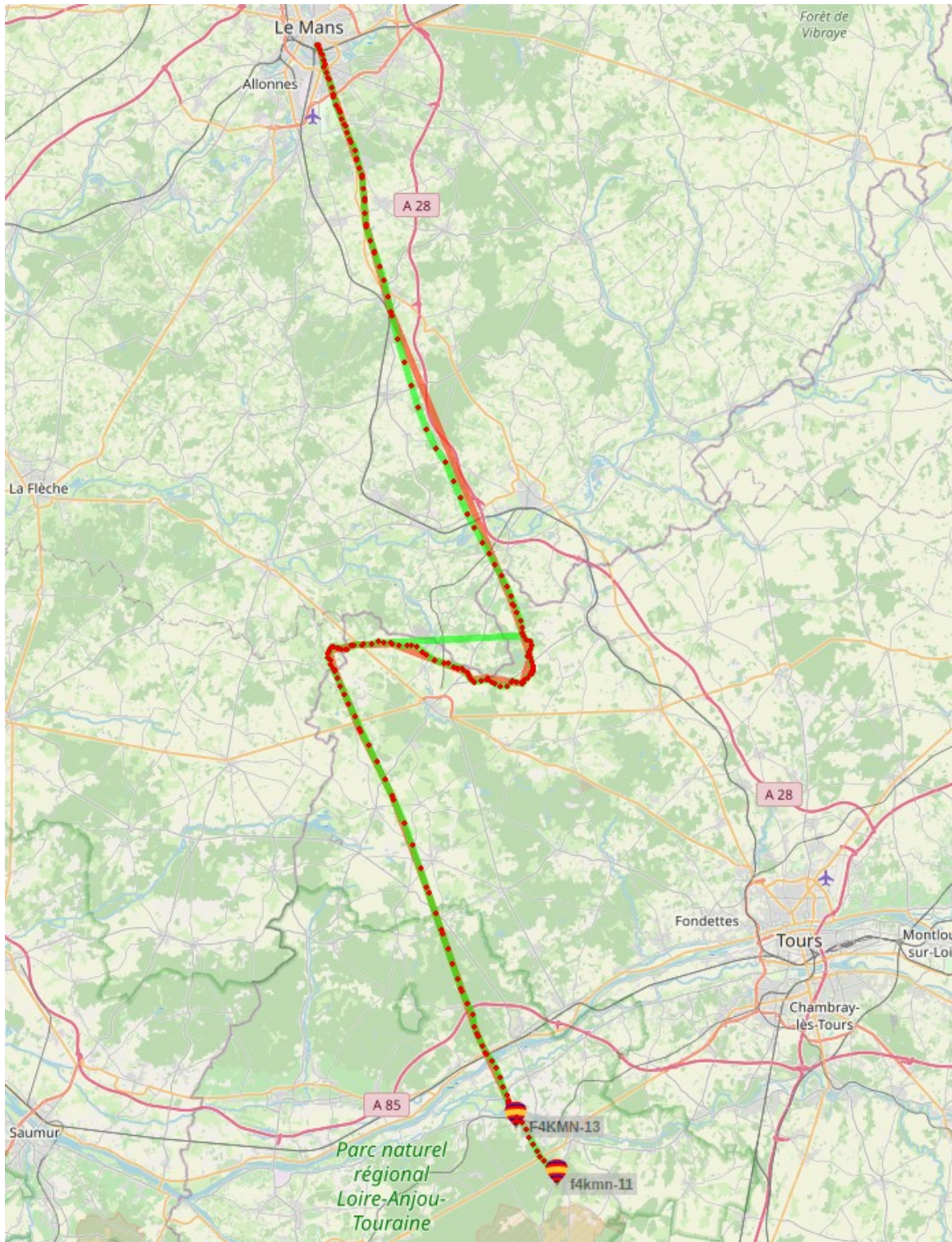
Vitesse ascensionnelle à 4000 m = **4,64 m/s**

Vitesse ascensionnelle à 20000 m = **5,73 m/s**

Vitesse ascensionnelle à 30000 m = **6,77 m/s**

4 Le suivi de la trajectoire du ballon

Le taux de mise à jour pour le suivi est d'une fois par minute sur la fréquence 433 MHz (Lora) et d'une fois toutes les deux minutes pour les fréquences 137,05 MHz (APRS FX25)

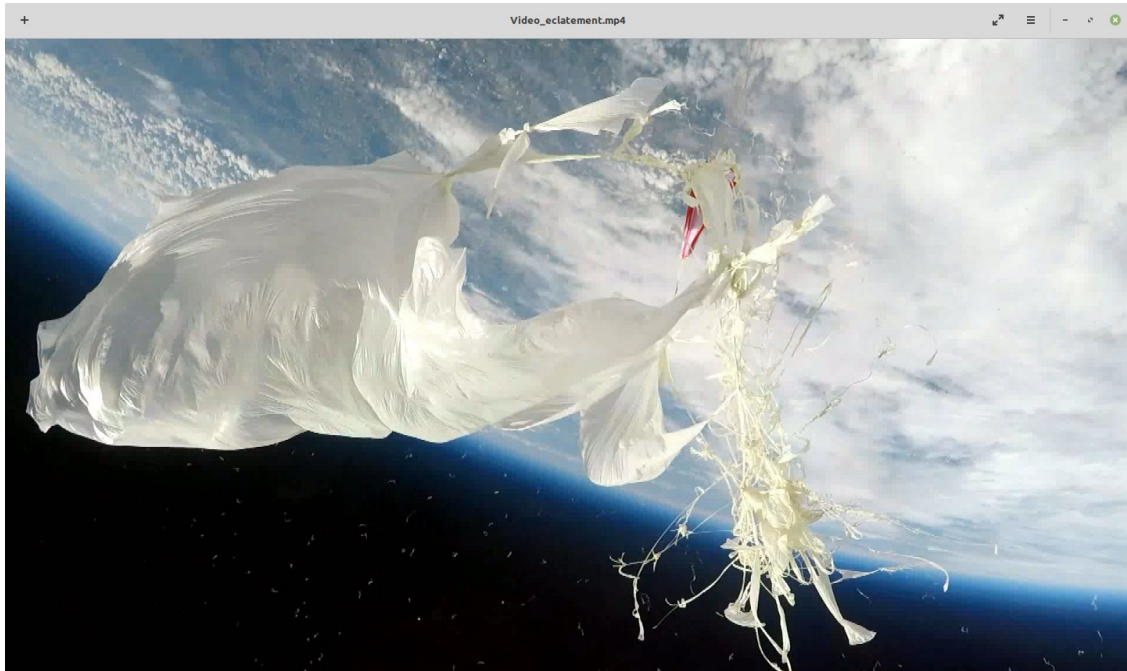


Temps de vol

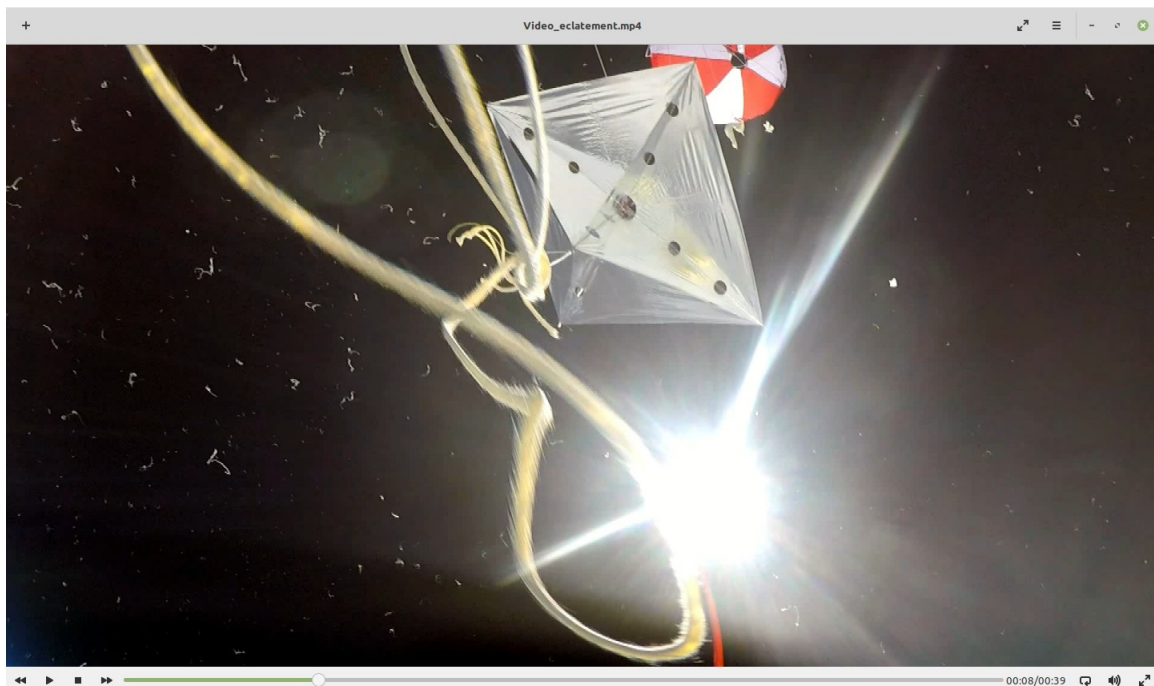
Départ **13h 13' 50''** Arrivée **15h 58' 15''** durée **2h 44' 25''**

5 Éclatement du ballon

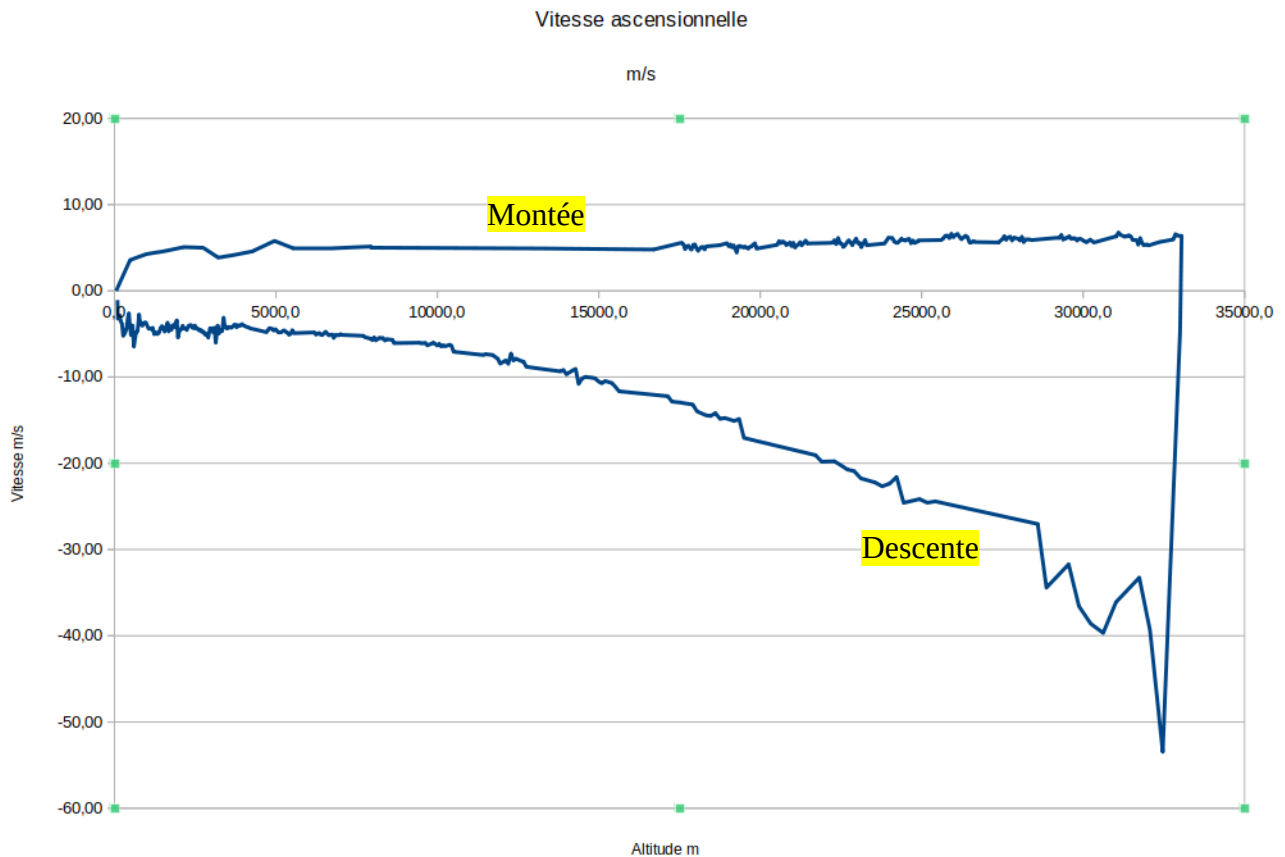
À mesure que le ballon s'élève, la pression de l'air environnant diminue. En conséquence, l'hélium occupe un volume de plus en plus grand, ce qui entraîne la dilatation du ballon jusqu'à ce qu'il éclate. (13:57:55 CET - 33050 m)



Le centre de gravité étant situé dans la partie supérieure de la nacelle (côté opposé à la caméra), lorsque le ballon éclate, la nacelle bascule sur le côté, permettant ainsi à la caméra de filmer les restes de l'enveloppe du ballon. L'altitude à l'éclatement constaté est de 33 050 m. Les années précédentes, la nacelle était plus lourde (1800 g), ce qui nécessitait un volume d'hélium plus important et provoquait l'éclatement du ballon vers 30 000 m. En conclusion, un ballon contenant moins d'hélium éclate à une altitude plus élevée.



A ce moment, la chaîne de vol redescend vers la terre. Le parachute inséré initialement « en sapin » entre l'enveloppe du ballon et le réflecteur radar, joue alors son rôle de frein.

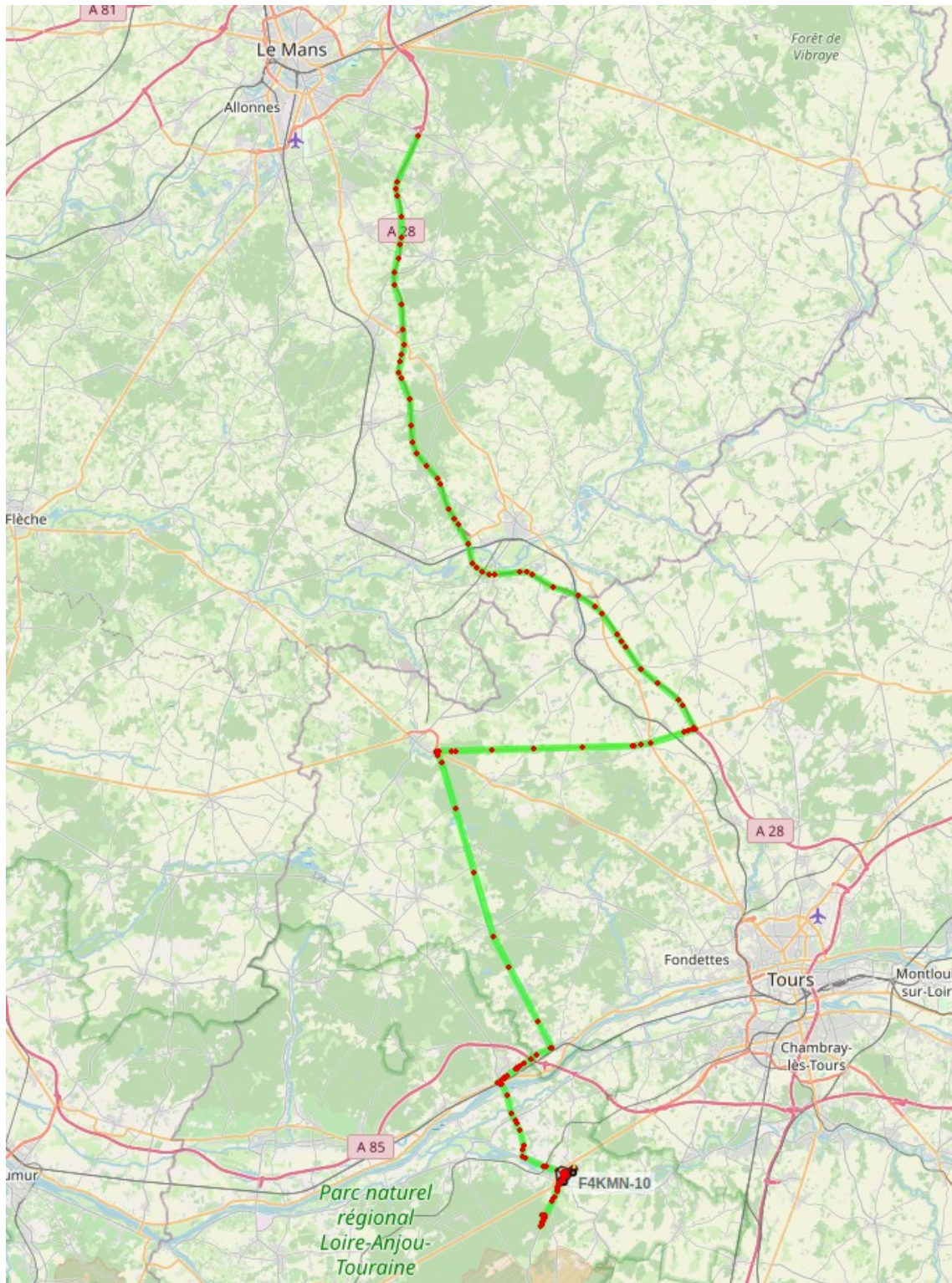


On observe une vitesse de montée quasiment constante, oscillant entre 5 m/s et 6 m/s, ainsi qu'une vitesse de descente sous parachute qui correspond bien à celle de la masse volumique de l'air.

6 Atterrissage & récupération de la nacelle

Indicatif de la voiture suiveuse **F4KMN-10**

le parcours de la voiture suiveuse



Le véhicule suiveur a emprunté l'autoroute et est arrivé près du point de chute prévisionnel environ 30 minutes avant l'atterrissage. Sa présence est cruciale car, lorsque la nacelle est proche du sol, la passerelle située dans le véhicule relaie les trames LoRa vers le serveur aprs.fi. Finalement, il est arrivé sur la zone du point de chute peu après l'atterrissage, ce qui a permis une recherche rapide et réussie. La charge utile, avec son réflecteur et son parachute, se sont accrochés à un arbre de petite taille dans la forêt domaniale de Chinon. Heureusement, la récupération n'a pas posé de problèmes insurmontables.



7 Photos du ballon transmises en SSTV

La SSTV (Slow Scan Television) est une méthode de transmission d'images fixes via des ondes radio, utilisée principalement par les radioamateurs. Contrairement à la télévision traditionnelle qui transmet des images à un rythme de plusieurs dizaines par seconde, la SSTV transmet une seule image. Les images sont converties en signaux audio, envoyées en modulation BLU via la fréquence radio 29,000 Mhz, la puissance en émission est de 0,7W. Puis elles sont reconverties en images à la réception au sol. 33 photos ont été envoyées.

Le format Martin 1 est utilisé parmi les nombreux formats utilisés en SSTV

Voici un résumé des points clés :

- **Résolution** : 320x240 pixels
- **Lignes** : 240
- **Temps par ligne** : 146,432 ms
- **Séquence des couleurs** : RGB
- **Fréquence de synchronisation** : 1200 Hz (ligne et trame)
- **Fréquence noir/blanc** : 1500 Hz pour le noir, 2300 Hz pour le blanc
- **Temps total pour une image** : 114 secondes

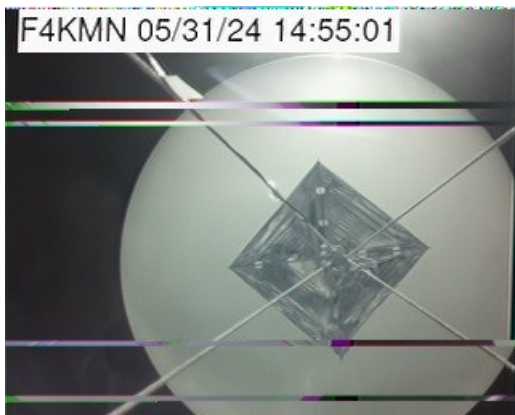
Ces caractéristiques permettent une transmission d'images de qualité raisonnable sur des canaux radio limités en bande passante.

Les informations de l'image, sont transmises ligne par ligne, en utilisant les signaux de synchronisation et les tonalités RVB pour les couleurs.

Signal de synchronisation de ligne (1200 Hz) :

- Durée : 4,862 ms
- Utilisé au début de chaque ligne pour indiquer la synchronisation.
- **Tonalités de couleur pour les pixels** :
 - Rouge, Vert, Bleu (RVB) : Chaque ligne est scannée pour chaque composante de couleur.
 - Chaque niveau de couleur est codée par une fréquence qui varie entre 1500 Hz (niveau 0) et 2300 Hz (niveau 255).
- **Signal de synchronisation de trame (1200 Hz)** :
 - Utilisé pour indiquer la synchronisation de l'image entière, généralement envoyé après chaque trame complète.
- **Durée totale d'une ligne** :
 - 146,432 ms, incluant le signal de synchronisation de ligne et les tonalités de couleur.

Quelques photos reçues pendant le vol :



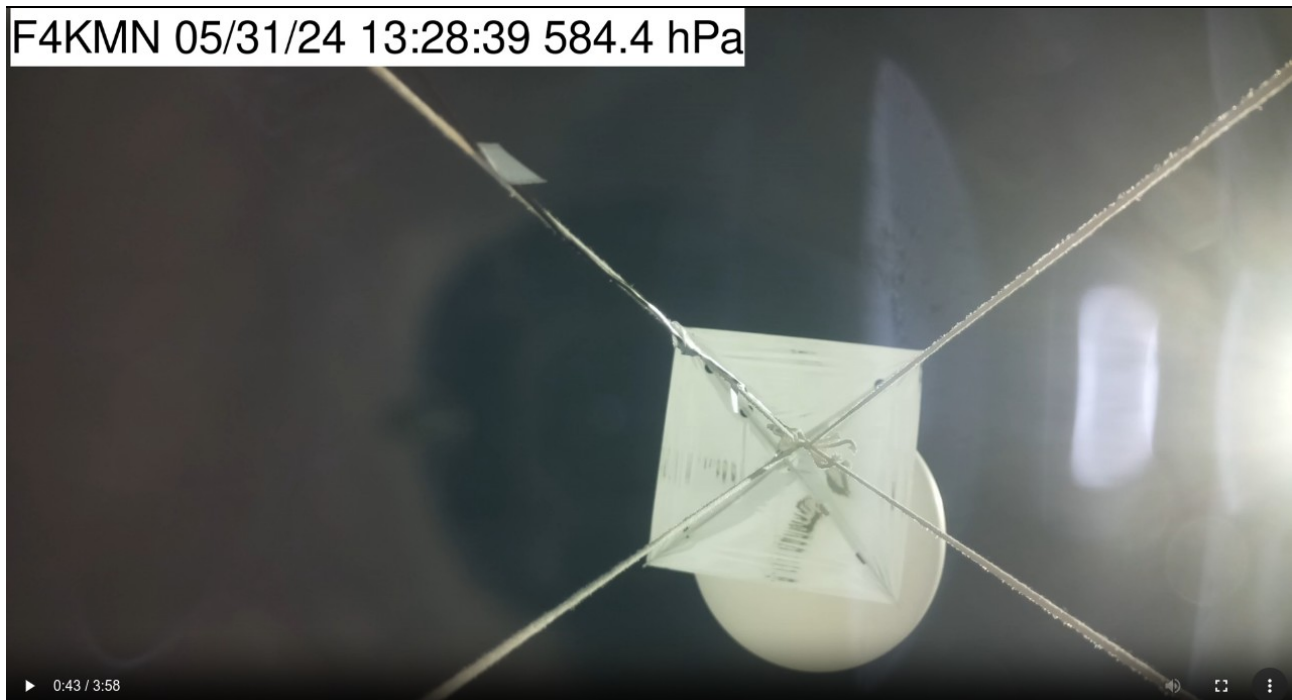
Les photos sont envoyées à une fréquence d'une toutes les cinq minutes.

Les photos sont de qualité satisfaisante et comportent en surimpression l'indicatif du radio-club du lycée ainsi que l'heure de la prise de vue. Cela permet aux radio-amateurs qui les reçoivent de nous les renvoyer par mail. (le mail du radio-club est disponible sur le site QRZ.com)

Nous pouvons ainsi remercier Sébastien BARBIER F4IRT pour son report.

8 Photos haute définition

En plus des photos envoyées en basse résolution, des photos en haute résolution sont capturées chaque minute et enregistrées sur la carte SD du Raspberry Pi.



15 minutes après le décollage **diamètre apparent du ballon = $(50 / 70) * 1,08 = 0,80 \text{ m}$**

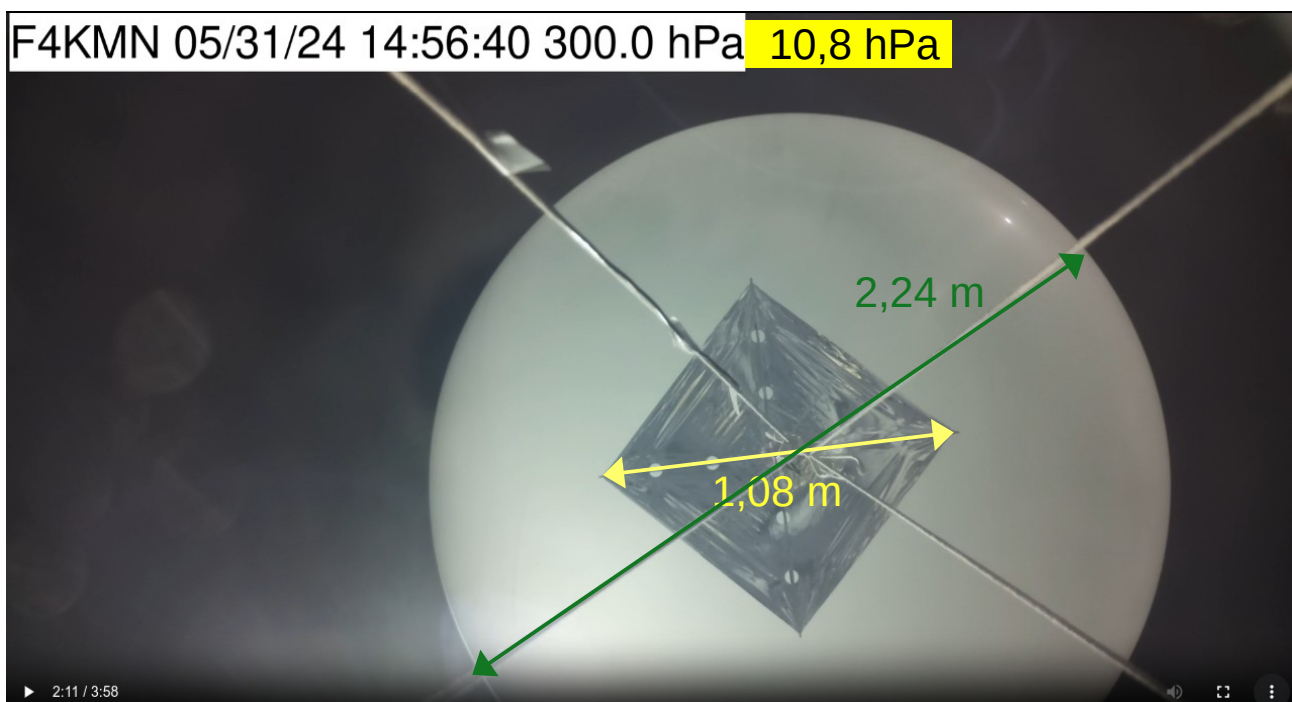
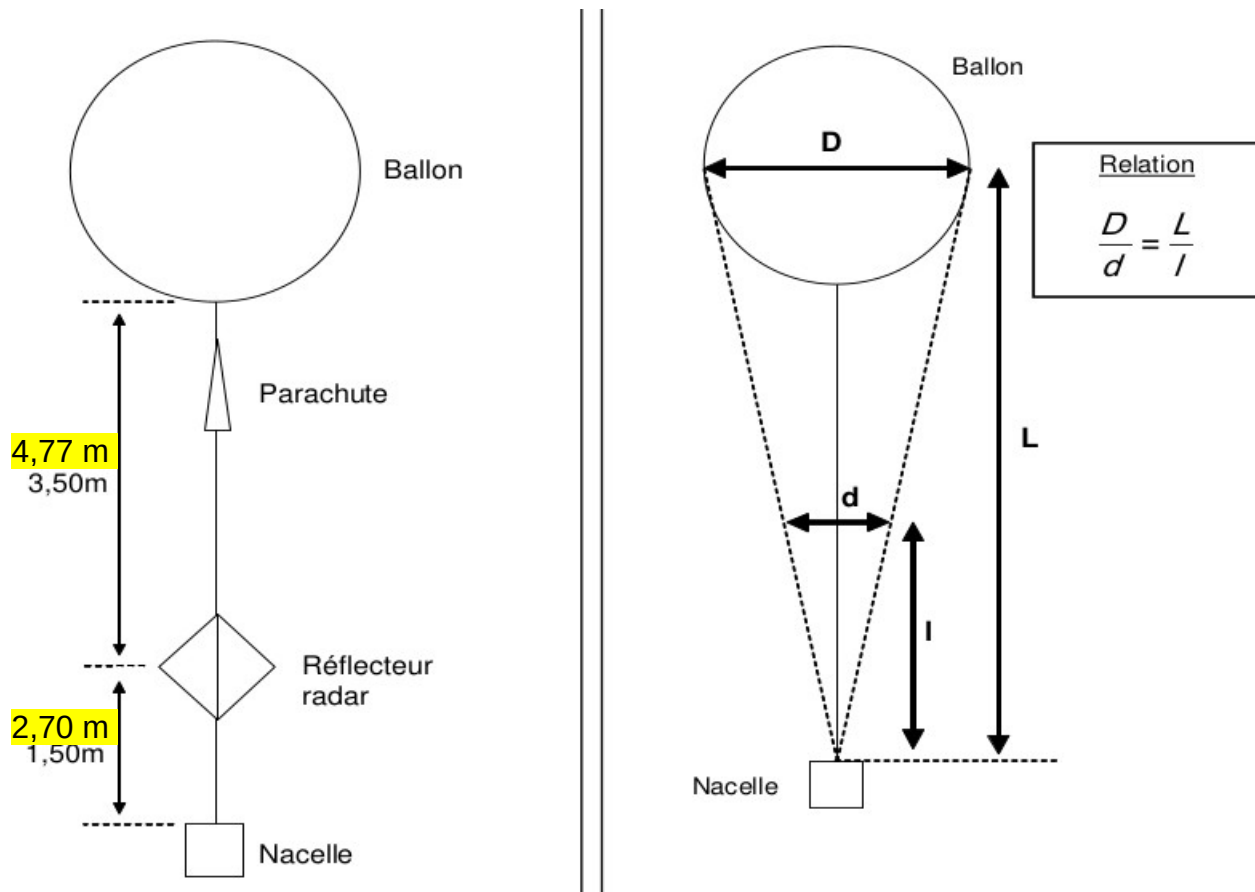


Photo prise juste avant l'éclatement. **diamètre apparent du ballon = $(146 / 70) * 1,08 = 2,24 \text{ m}$**

La valeur de la pression affichée en surimpression est incorrecte. Le problème, d'origine logicielle, sera corrigé dans la prochaine version.

9 Vérification de la loi des gaz parfait



D Diamètre réel du ballon

d Diamètre apparent du ballon

l longueur centre réflecteur / haut de la nacelle 2,7 m

L longueur centre ballon / haut de la nacelle 7,47 + R

Calcul du diamètre réel D pour le diamètre apparent $d = 2,24$ m

$$\frac{D}{2,24} = \frac{7,47 + R}{2,7} \text{ avec } D = 2 \times R$$

$$2 \times R = \frac{7,47 + R}{2,7} \times 2,24$$

$$R = \frac{6,12}{1,18} = 5,18 \text{ m}$$

Calcul du Volume

$$V = \frac{4}{3} \times \pi \times R^3 = 584 \text{ m}^3$$

Calcul de la pression théorique

Pour la quantité d'hélium du ballon, quelque soit l'altitude, on peut écrire :

$$\frac{P \times V}{T} = Cte \quad P : \text{Pression hPa} \quad V : \text{volume m}^3 \quad T : \text{température en Kelvin}$$

La télémetrie donne

Au sol $T = 273 + 21 = 294 \text{ °K}$ $P = 1006 \text{ hPa}$ $V = 6,37 \text{ m}^3$

A l'altitude d'éclatement $T = 273 - 5 = 268 \text{ °K}$ $P \text{ mesurée} = 10,08 \text{ hPa}$ $V = 584 \text{ m}^3$

$$\frac{1006 \times 6,37}{293} = \frac{P_{\text{théorique}} \times 584}{268}$$

$$21,87 = P_{\text{théorique}} \times 2,18$$

$P_{\text{théorique}} = 10,03 \text{ hPa}$

$P_{\text{mesurée}} = 10,08 \text{ hPa}$

Conclusion

Le calcul de la pression théorique est sensiblement égale à la pression mesurée par le capteur embarqué.

Pour résumer, on peut dire que l'hélium se comporte effectivement très proche d'un gaz parfait dans les conditions usuelles de température et de pression du vol, en raison de ses faibles interactions interatomiques et de son petit volume atomique.

10 Alimentation de la charge utile

L'alimentation de la charge utile du ballon est un élément crucial pour le succès du projet. Sa conception est complexe et peut entraîner l'échec total du projet si elle n'est pas bien réalisée. Plusieurs contraintes doivent être prises en compte :

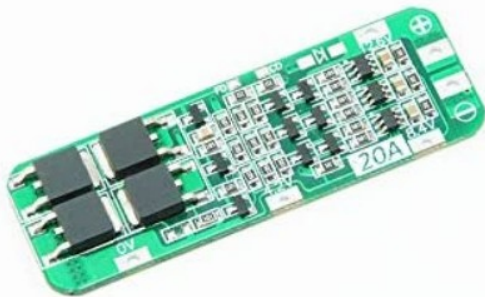
- La masse limitée de la charge utile, qui oblige à limiter le nombre de batteries et à surveiller leur taux de charge.
- Le courant de pointe, car alimenter l'électronique d'instrumentation et un émetteur à partir de la même source est un défi.
- Les conditions de température, car les caractéristiques des batteries sont mal documentées à température ambiante et inconnues à des températures très basses.

Bilan électrique

Les cartes électroniques doivent être alimentées avec une

- Tension d'alimentation continu de **5V** et de **12V** pour l'amplificateur radio
- Consommation moyenne **350 mA**.

Réalisation



Trois accumulateurs **18650** (lithium-ion) d'une capacité de 3000 mAh chacun sont utilisés. Leur tension nominale est de 3,6 V. Montés en série, la tension aux bornes de l'ensemble atteint 12,6 V lorsqu'ils sont complètement chargés et 9,6 V lorsqu'ils sont déchargés.

La surveillance de ces accumulateurs est assurée par une carte électronique de gestion appelée BMS (Battery Management System). Le BMS interrompt la décharge

des cellules avant que cela n'affecte leur durée de vie de manière critique. Il arrête également la charge des cellules avant qu'elles ne soient surchargées. De plus, il optimise un chargement homogène entre les cellules et vérifie leur température.



Un convertisseur DC-DC buck (hacheur série) réduit la tension des batteries à 5 V. Le capteur INA219 est également utilisé pour mesurer le courant et la tension des accumulateurs. Cela permet de connaître en temps réel leur état de charge grâce au calcul du SOC (State of Charge) en pourcentage.

Une carte spécifique a été développée pour connecter tous les éléments.

Avant le lancement, les batteries sont maintenues chargées à l'aide d'une alimentation externe à la nacelle. Juste avant le lancement, cette alimentation externe est déconnectée.

La tension au décollage était de **12,1 V** et, à la fin du vol, de **11,3 V**. La charge restante était de 68 % de la capacité nominale.

L'alimentation a parfaitement rempli sa fonction.

11 Fréquences et Indicatifs utilisés

La nacelle est équipée de quatre émetteurs radiofréquences:

- APRS sur LoRa fréquence **433,775 MHz** indicatif **F4KMN-11** localisation
- APRS sur FX25 fréquence **137,05 MHz** indicatif **F4KMN-13** localisation et télémétrie
- APRS sur LoRa fréquence **433,775 MHz** indicatif **F4KMN-9** télémétrie
- SSTV sur BLU fréquence **29,000 MHz** indicatif **F4KMN** télévision

Pour éviter les interférences et les collisions entre les deux émetteurs opérant sur la même fréquence, les émissions sont décalées dans le temps.

- trame APR FX25 toutes les 2 minutes à la seconde **57**
- trame APRS Lora toutes les 2 minutes à la seconde **20** pour la localisation
- trame APRS Lora toutes les 2 minutes à la seconde **30** pour la télémétrie
- image SSTV toutes les 5 minutes à la seconde **0**

12 La mesure du rayonnement cosmique

Une des expériences embarquées consiste à mesurer la radioactivité en altitude, ce qui présente plusieurs difficultés. Divers capteurs sont possibles, mais les contraintes de masses et de coût limitent énormément les possibilités. En définitive, nous avons fait au plus simple, en choisissant un compteur Geiger du commerce, ce qui permet de mesurer le flux de particules d'une certaine énergie dans l'élément sensible. Le compteur, choisi pour son coût, sa simplicité et sa disponibilité, est un modèle **radiation watch**. (Plage de mesure de 0,05 $\mu\text{Sv/h}$ à 10 mSv/h entre 0,01 cpm et 300 Kcpm)



Le rayonnement est composé de photons gamma et de particules capables de provoquer, directement ou indirectement, la formation d'ions en arrachant des électrons de la matière qu'ils traversent. La détection de ce rayonnement ionisant repose sur un type particulier de diode, appelée diode PIN. PIN signifie Positive Intrinsic Negative, en référence à la structure même de ce composant. Dans une diode PIN, une zone intrinsèque, c'est-à-dire non dopée, se trouve entre les zones P et N.

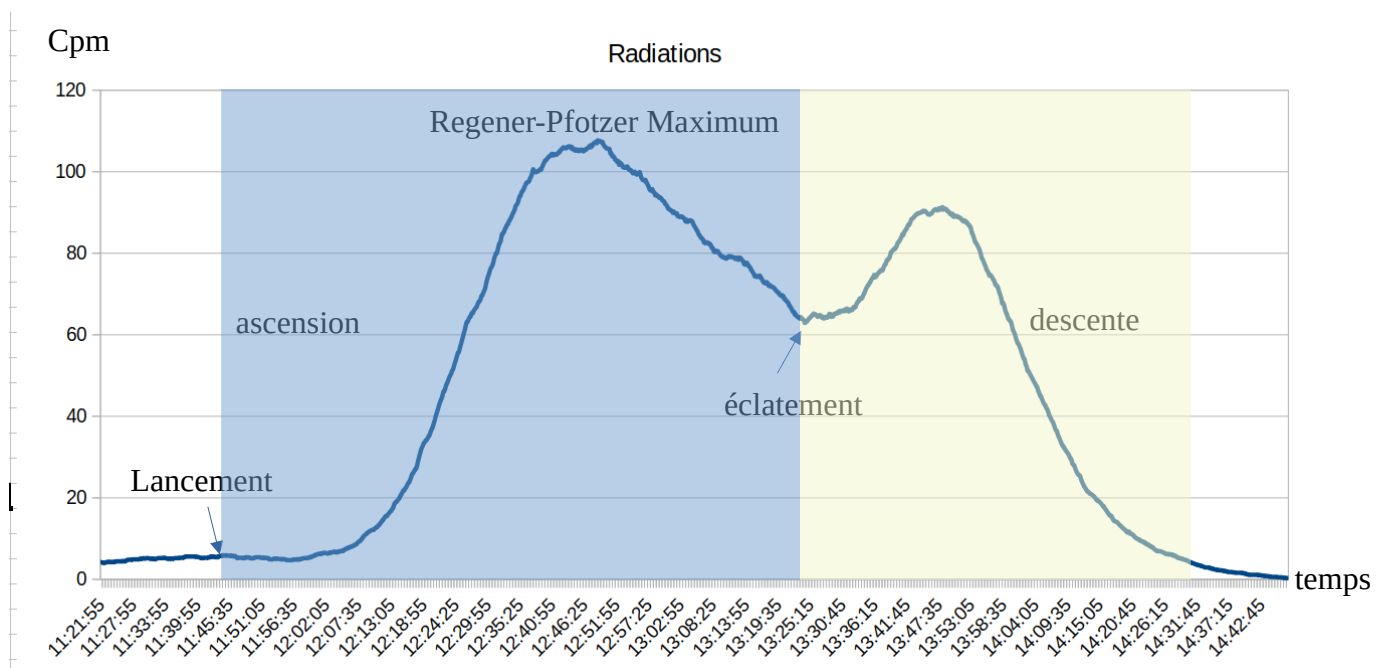
La structure PIN permet de détecter les photons de manière similaire à un tube Geiger-Muller, grâce à un effet de cascade et une brève conductivité. Cela signifie que si un rayon de haute énergie est absorbé, un signal détectable d'électrons est généré. L'absorption photoélectrique prédomine dans la région d'énergie gamma d'intérêt, située entre 5 keV et 100 keV. Les détecteurs basés sur l'absorption directe dans le silicium offrent une alternative peu coûteuse par rapport aux détecteurs à gaz, tels que le tube Geiger-Muller.

Notre expérience a pour objectif de confirmer les données relatives au maximum de Regener-Pfotzer. Au cours de nos recherches, nous n'avons trouvé aucune étude européenne sur ce sujet.

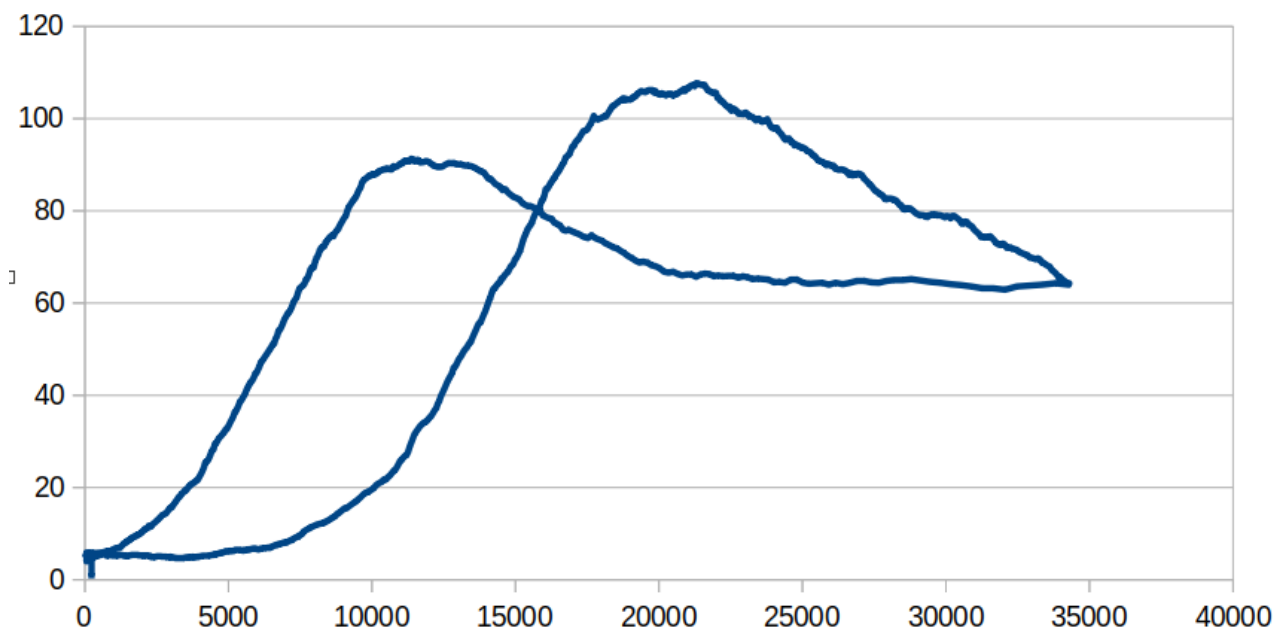
Lors de nos mesures, nous avons observé un maximum à 69 369 pieds (21 143 m), avec une valeur de 107 cpm. Comme prévu, la dose de rayonnement diminue lorsque le capteur atteint des altitudes supérieures à ce maximum, connu sous le nom de maximum de Regener-Pfotzer.

Le maximum de Regener-Pfotzer est un phénomène observé dans l'étude des rayons cosmiques. Il correspond à l'altitude à laquelle l'intensité du rayonnement cosmique atteint son maximum dans l'atmosphère terrestre.

Ce phénomène a été découvert par les physiciens Erich Regener et Georg Pfotzer dans les années 1930 en utilisant des ballons-sondes pour mesurer l'intensité des rayons cosmiques à différentes altitudes.



radiation en fonction de l'altitude

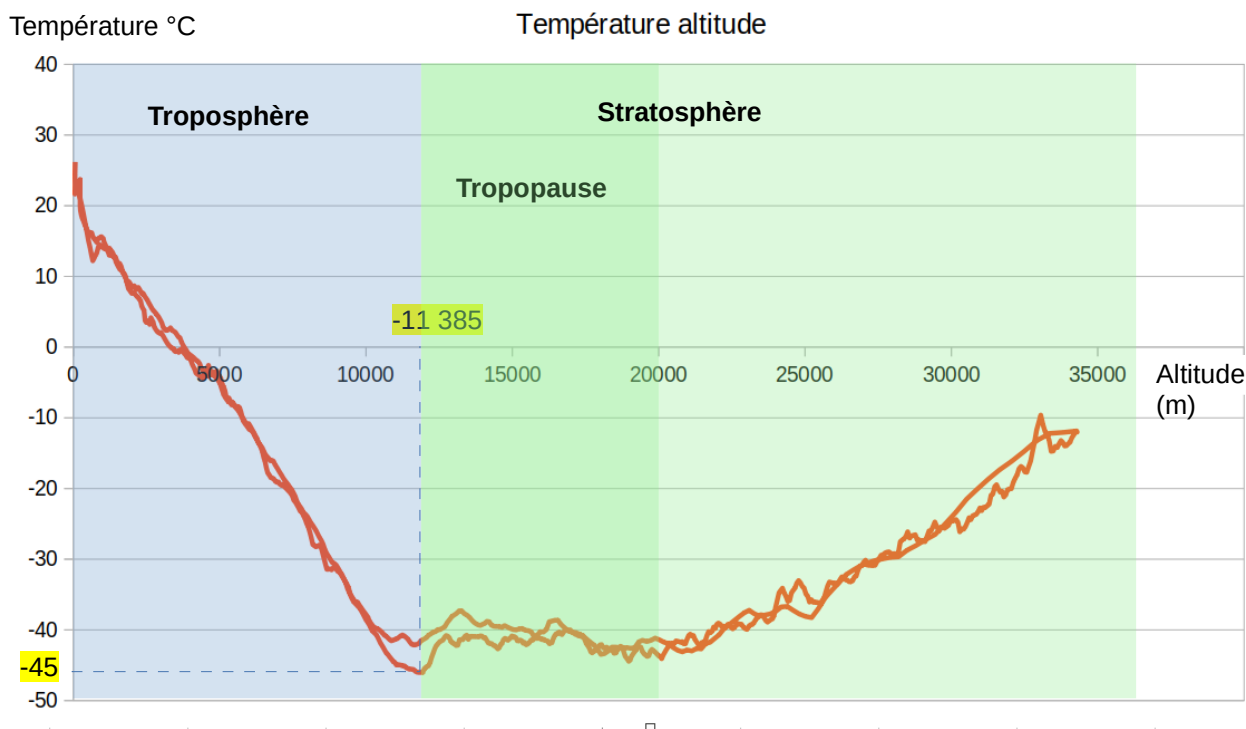


Conclusion : Nous observons bien un maximum pour l'altitude 20000m. La hausse due au rayonnement apparaît plus tardivement lors de la descente, car la vitesse de descente est plus importante que celle de la montée à ces altitudes.

13 Evolution de la température avec l'altitude

La température extérieure est mesurée par un thermocouple de type K (Plage : -100°C à 500°C). La difficulté dans l'utilisation du thermocouple est que la tension à mesurer est très faible, avec des variations d'environ $50\text{ }\mu\text{V}$ par $^{\circ}\text{C}$ avec une compensation de température froide. Pour toutes ces raisons, nous utilisons une puce d'interface **MAX31855** qui fera le gros du travail, nous permettant d'intégrer facilement le capteur sans trop de difficulté.

La température minimale a été atteinte à 37355 pieds = **11 385 m** → **-45°C**



Le gradient thermique dans la troposphère est : **$-5,9^{\circ}\text{C/Km}$**

Le gradient thermique dans la tropopause est : **$+0^{\circ}\text{C/km}$**

Le gradient thermique dans la stratosphère est : **$+2,22^{\circ}\text{C/km}$**

Conclusion les valeurs de température mesurée sont proches des valeurs de l'atmosphère standard dite «ISA» (*International Standard Atmosphere*)

14 Température minimale à l'intérieur de la nacelle

Un capteur mesure la température à l'intérieur de la nacelle.

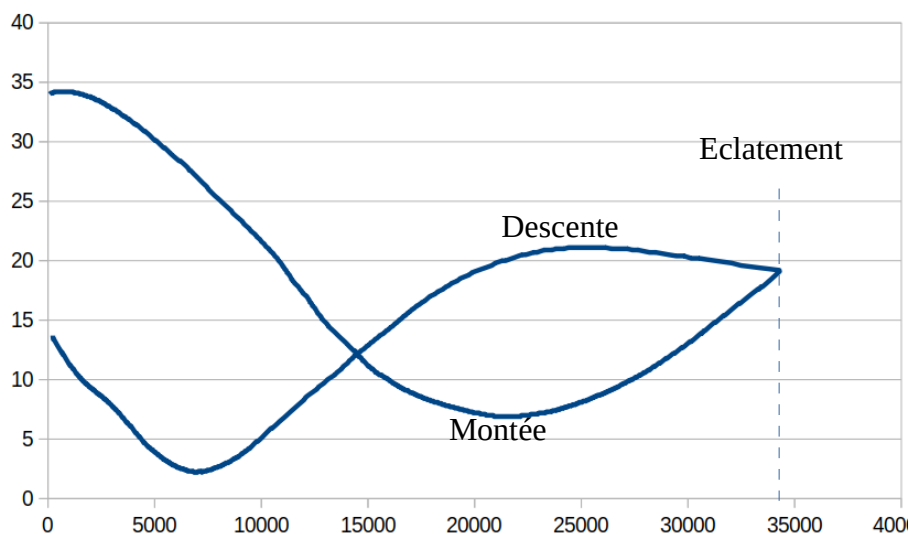


L'objectif est de maintenir une température positive à l'intérieur de la nacelle durant toutes les phases du vol.

Pour ce faire, la nacelle a été entièrement recouverte d'une couverture de couleur or afin de conserver la chaleur interne. Cette couverture comporte deux faces métalliques distinctes : l'une dorée et l'autre argentée. Chaque face a une fonction spécifique : le côté argenté réfléchit 90% du rayonnement infrarouge, tandis que le côté doré absorbe 50% de la chaleur incidente. En orientant la face dorée vers l'extérieur, la nacelle est

ainsi protégée du froid, conservant sa chaleur interne.

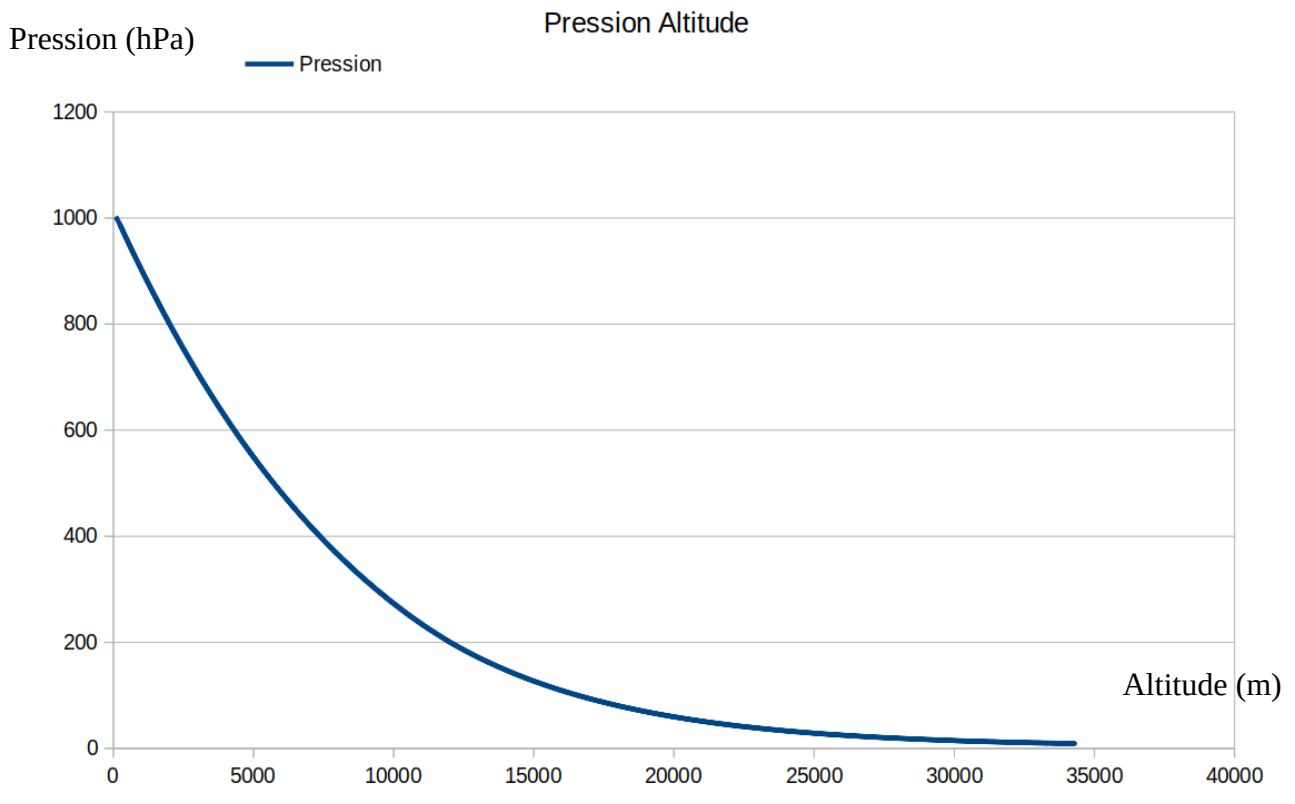
La température minimale, lors du vol, a été de **+2,2 °C** obtenue pendant la descente à 7000m d'altitude.



La nacelle s'est refroidie pendant la montée jusqu'à 22000m, puis elle s'est réchauffée. En descente, au environ de 7000m la température minimale est atteinte. Il y a donc eu un refroidissement continu de la nacelle par conduction thermique.

Les hausses de température observées dans les altitudes basses et hautes sont dues aux transferts de chaleur par rayonnement infra-rouge.

15 Evolution de la pression avec l'altitude



La pression est réduite :

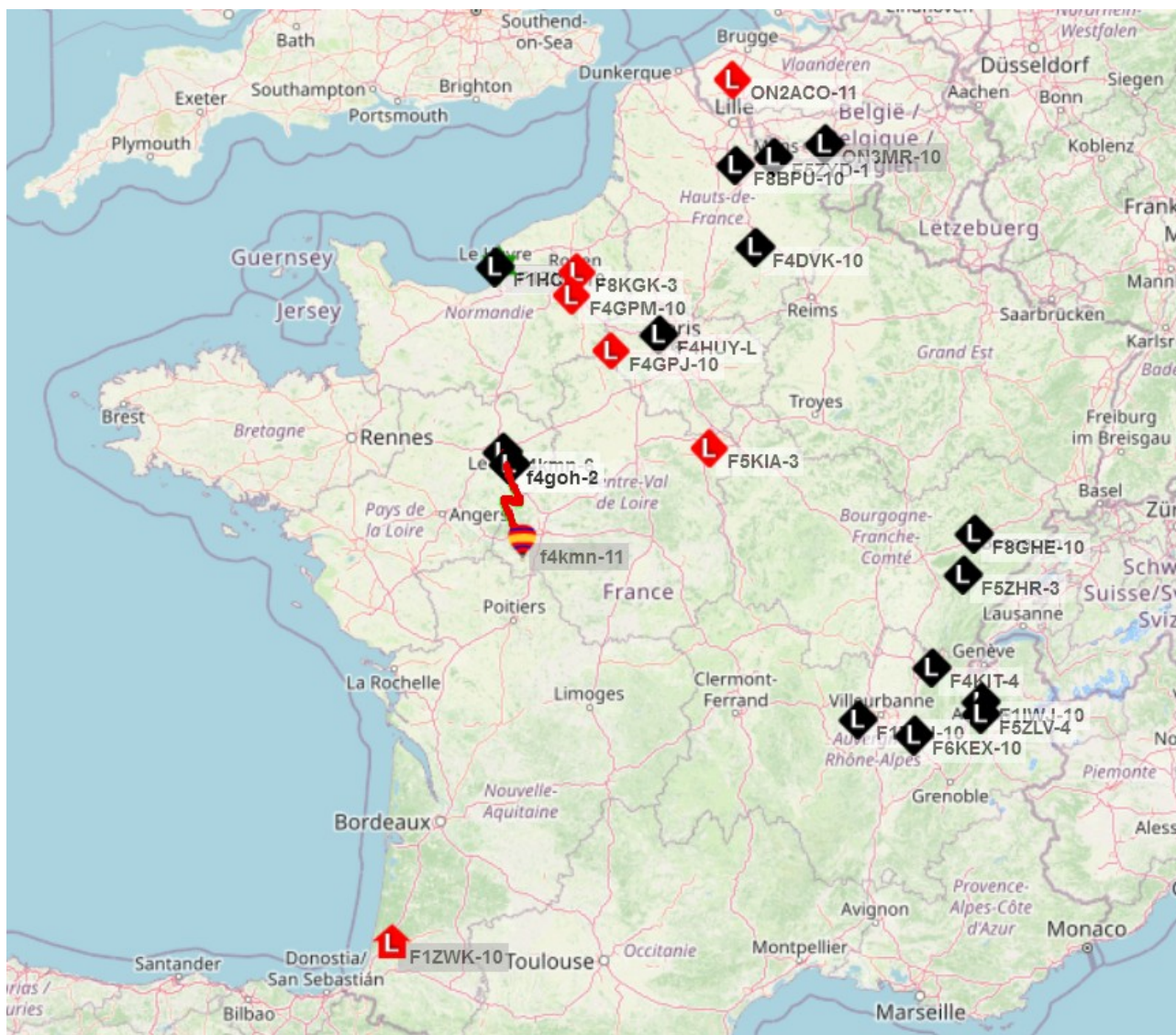
- d'un facteur 2 à l'altitude 5500 m (513 hPa)
- d'un facteur 10 à 16547m (100 hPa).

Ces mesures sont conformes au [tableau de la pression atmosphérique nominale selon l'altitude](#), dans la troposphère.

16 Trames APRS via LoRa

La modulation LoRa (Long Range) est une technologie de modulation radio, qui est utilisée en raison de sa capacité à transmettre des données sur de longues distances avec une faible consommation d'énergie 20mW.

Durant le vol, une trame est émise chaque minute. Les trames ont été captées et relayées par les relais suivants.



Comme on peut le voir sur la carte, les trames émises en modulation LoRa ont été reçues dans un rayon de 700 km.

17 Transmission montante LoRa

Lors du vol du ballon des trames montantes ont été émises à partir du sol au niveau du lycée. Le logiciel chargé de la réception des messages avait pour fonction de les enregistrer dans un fichier log.

L'ensemble des messages émis ont bien été reçus et enregistrés.

18 Source des logiciels sur Github

Les programmes informatiques sont disponibles sur les dépôts Github des professeurs.

Logiciel carte APRS Lora & iGate [Anthony Le Cren](#)

Logiciel carte APRS FX25 [Philippe Simier](#)

Logiciel carte SSTV & télémétrie Lora [Philippe Simier](#)

19 Conclusions générales

Pour conclure, nous pouvons maintenant répondre aux questions que nous nous sommes posées au début de notre projet. La loi des gaz parfaits s'applique-t-elle pour l'hélium ? Est-il possible de transmettre des messages montants en modulation LoRa vers la nacelle ?.

Le flux de rayonnement augmente-t-il réellement en altitude et, si tel est le cas, la différence de niveaux de rayonnement est-elle suffisamment importante pour constituer une menace pour les humains ?

Nous avons pu constater qu'il y a une augmentation constante du rayonnement à mesure que l'altitude augmente en raison de l'effet de protection de l'atmosphère, jusqu'à une hauteur d'environ 20 km où le rayonnement cosmique secondaire est le plus intense en raison de la formation des cascades de particules.

Le ballon a occupé une place importante pour nous tous et durant toute une année. L'organisation de projet, les connaissances théoriques acquises, les difficultés levées et le savoir-faire développé marquent déjà le projet d'une très grande réussite.

Après quelques péripéties lors de la récupération de la nacelle dans la forêt domaniale de Chinon, la nacelle ayant pu être retrouvée et récupérée. Les résultats obtenus sont intéressants et en tout cas confirment le succès technique et scientifique du projet.