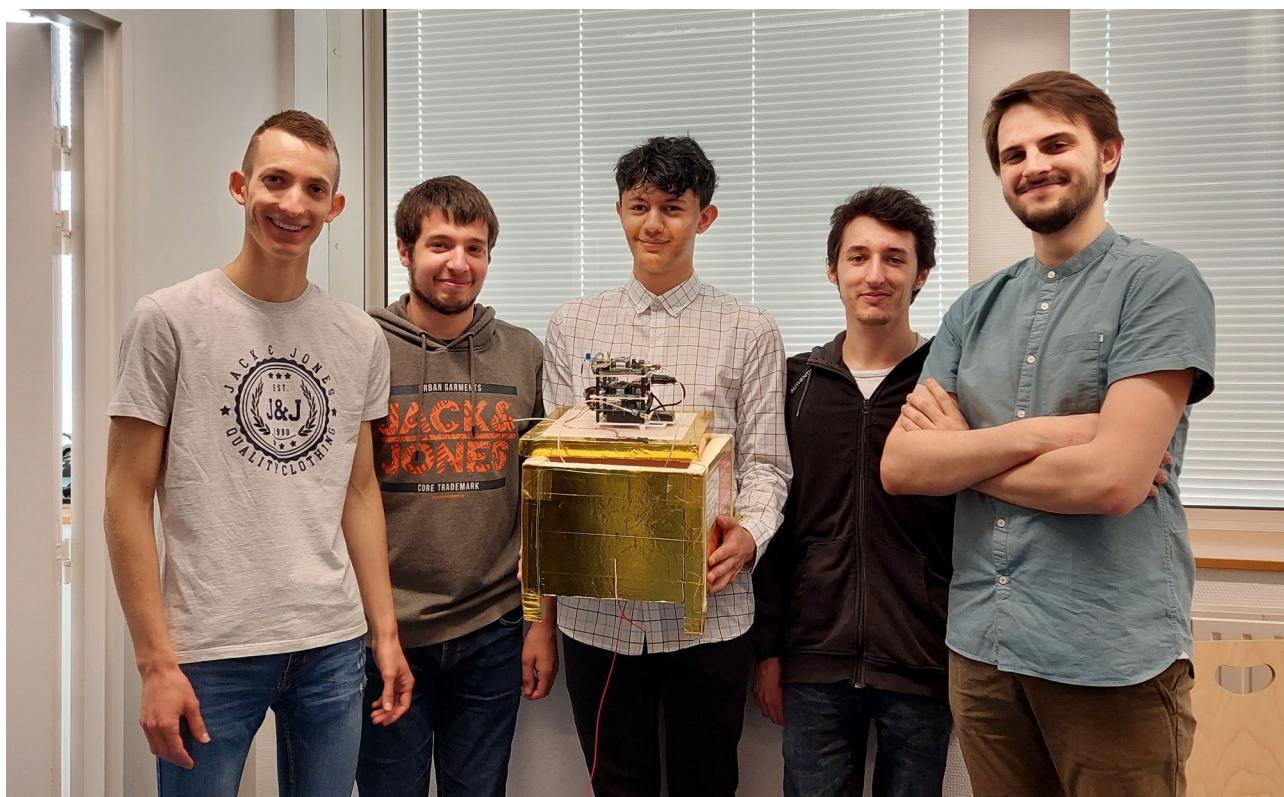


Ballon stratosphérique Lycée Touchard Washington



Desaunay Valentin, Neveu Benjamin, Suard Mickael, Maillard Clement, Porcheron Enzo

Professeurs référents : Bernard Didier, Le Cren Anthony, Simier Philippe

Table des matières

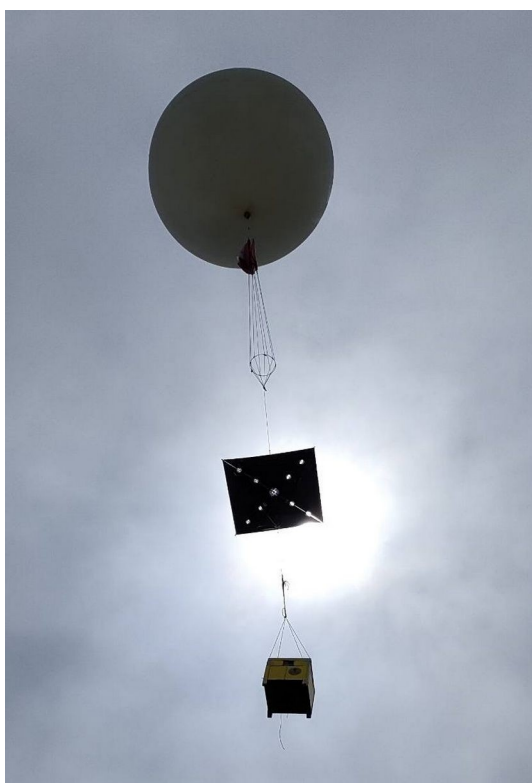
Ballon stratosphérique Lycée Touchard Washington.....	1
Bilan des mesures Ballon 2022.....	3
1 Présentation générale.....	3
2 Pesée - Vitesse de montée.....	3
3 Altitude d'éclatement.....	4
4 Alimentations.....	6
5 Fréquences et Indicatifs des émetteurs.....	7
6 Le suivi de la trajectoire.....	8
7 La mesure des radiations.....	11
8 Evolution de la température avec l'altitude.....	13
9 Température minimale à l'intérieur de la nacelle.....	14
10 Evolution de la pression avec l'altitude.....	15
11 Trames APRS via LoRA.....	16
12 Atterrissage.....	17
13 Source des logiciels sur Github.....	18
14 Conclusions générales.....	19

Bilan des mesures Ballon 2022

1 Présentation générale

Le projet de ballon stratosphérique, fut réalisé par 5 étudiants dans le cadre du projet de deuxième année du **BTS Système numérique option informatique**, durant l'année scolaire 2021-2022. Les idées motivant sa réalisation étaient la mesure de la radioactivité en altitude et l'utilisation d'un capteur GNSS pour suivre la position du ballon, et donc le récupérer. Le ballon a été lancée le 3 juin 2022 depuis Le Mans (72), suivi par une voiture et retrouvé quelques minutes après son atterrissage. Malgré quelques petits problèmes, les résultats des expériences ont pu être exploités avec intérêt.

2 Pesée - Vitesse de montée



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

Masse de la nacelle : **1455 g**.

Nous sommes en dessous des 1800 g exigé par le cahier des charge. Le gonflage du ballon a été adapté (5,1 m³ d'hélium) afin d'avoir la portance qui permette une vitesse ascensionnelle de 5 m/s.

Vitesse ascensionnelle décollage = **4,74 m/s**

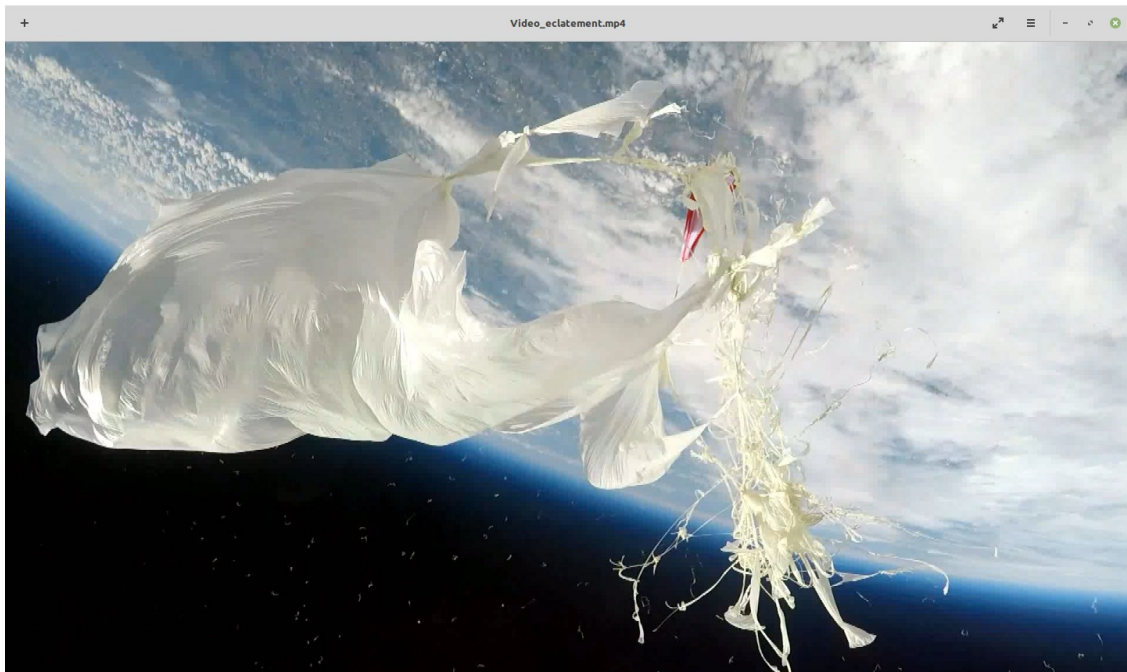
Vitesse ascensionnelle à 4000 m = **5,21 m/s**

Vitesse ascensionnelle à 20000 m = **5,41 m/s**

Vitesse ascensionnelle à 30000 m = **6,57 m/s**

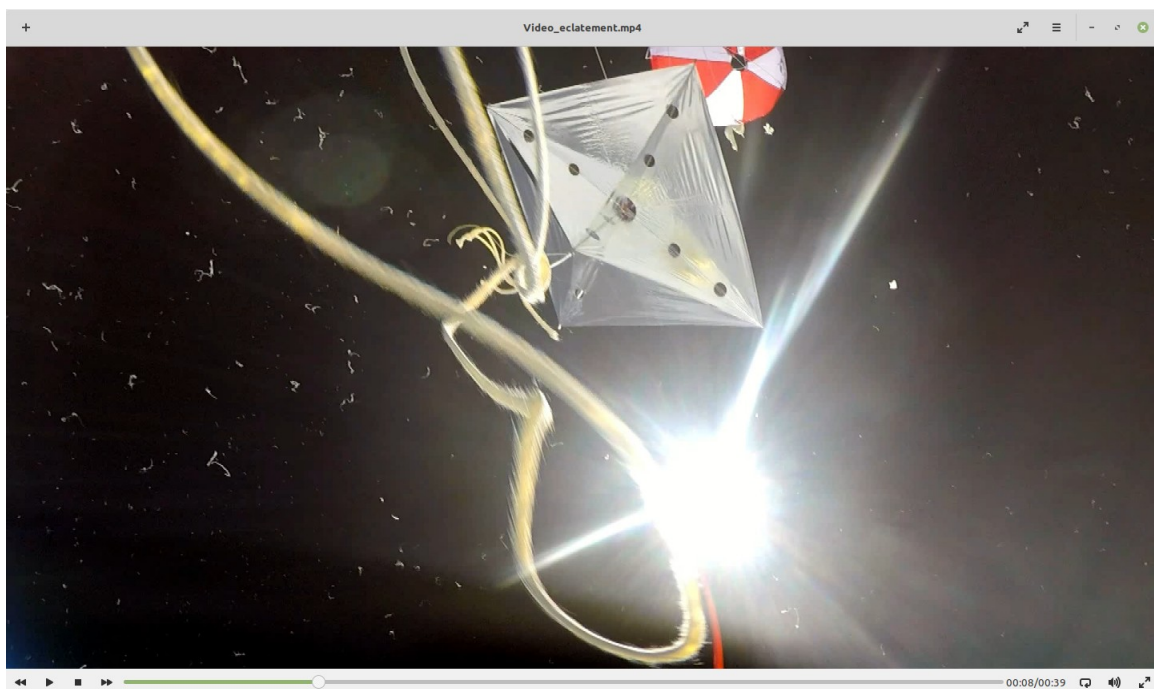
3 Altitude d'éclatement

Plus il monte, plus la pression de l'air autour de lui, diminue. L'hélium occupe alors de plus en plus de volume : le ballon se dilate et finit par éclater.

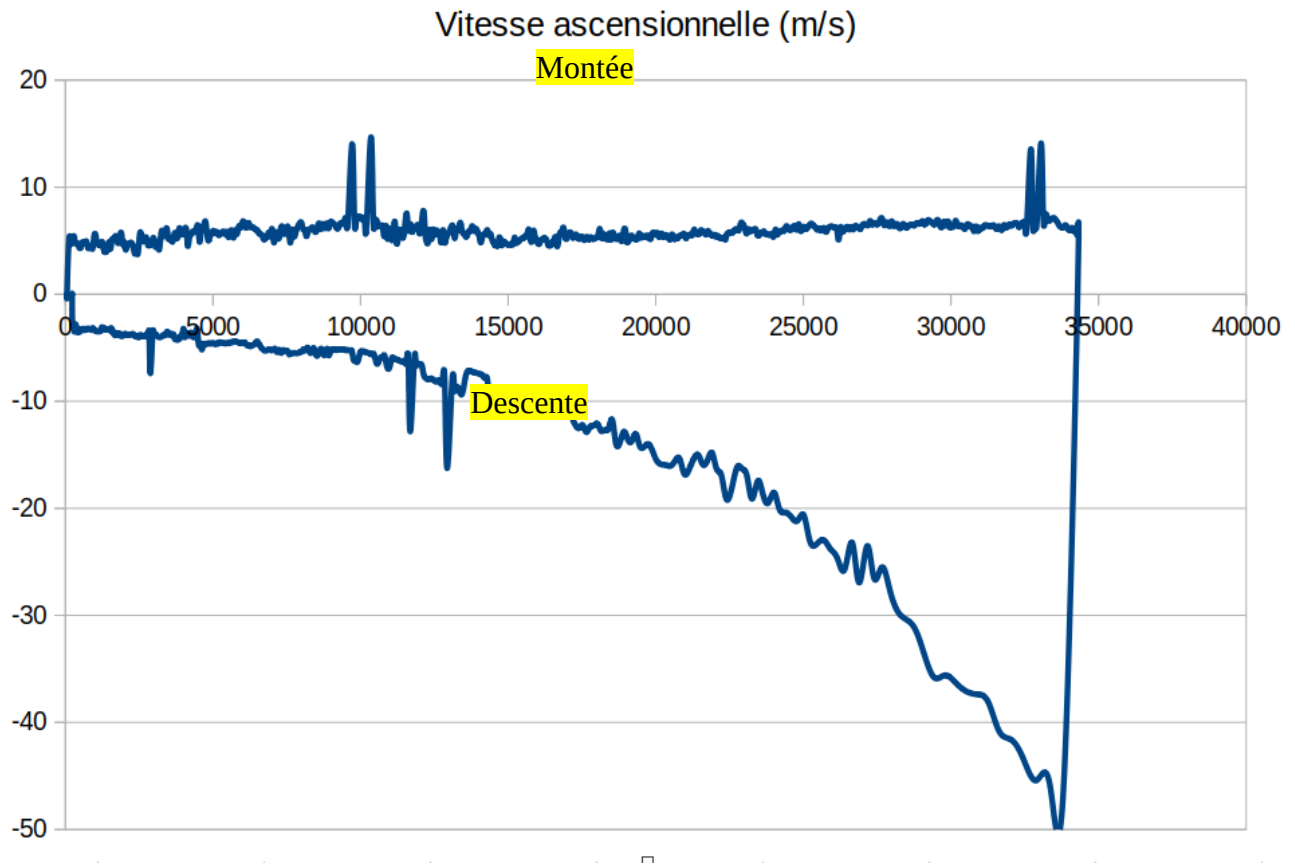


Le centre de gravité étant situé dans la partie supérieure de la nacelle (coté opposé à la caméra), à l'éclatement du ballon, elle bascule sur le côté permettant ainsi à la caméra de filmer ce qui reste de l'enveloppe du ballon. Altitude à l'éclatement = **34 295 m**

Les années précédentes la nacelle était plus lourde (1800g) le ballon était donc gonflé avec un volume d'hélium plus important et éclatait vers 30 000m. 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 remarque une vitesse de montée presque constante, entre 5 m/s et 6 m/s, et une vitesse de descente qui suit bien celle de la masse volumique de l'air.

4 Alimentations

L'alimentation de la charge utile du ballon est une des parties essentielles pour le succès du projet. Elle est loin d'être évidente à concevoir et peut mener à l'échec total du projet. La conception doit prendre en compte plusieurs contraintes :

- La masse limitée de la charge utile, ce qui oblige à limiter le nombre d'accumulateur et à surveiller leur taux de charge.
- Le courant de pointe, alimenter de électronique d'instrumentation et un émetteur à partir de la même source n'est pas évident.
- Les conditions de température, les caractéristiques des accus n'étant pas trop documentées à

température ambiante, elles sont inconnues aux très basses températures.

Bilan électrique

Les cartes doivent être alimentées avec une

- Tension d'alimentation **5V**
- Consommation **170 mA** (250mA avec l'émetteur du WIFI).

Réalisation



Trois accumulateurs **18650** (lithium ion) de capacité 3000 mAh sont utilisées. Leur tension nominale est 3,6 V. Ils sont montés en série. La tension au bornes de l'ensemble atteint 12,6 V lorsqu'ils sont complètement chargés et 9,6 V lorsqu'ils sont déchargés.

Le travail de surveillance est effectué grâce à une carte électronique de gestion appelée **BMS** "Battery Management System".

Le BMS interrompt la décharge des cellules avant que cela ne devienne critique pour leur durée de vie.

Il interrompt aussi la charge des cellules avant qu'elles ne soient trop chargées

Il optimise un chargement homogène d'une cellule à l'autre

Il vérifie la température des cellules.



un convertisseur **DC DC buck**, (hacheur série) abaisse la tension à 5v. Le capteur INA219 est aussi utilisé pour mesurer le courant et la tension. Il est donc possible de connaître en temps réel l'état de charge des accumulateurs grâce au calcul du SOC "State Of Charge" en %

En définitive une carte spécifique a été développée pour connecter l'ensemble des éléments.

Avant le lancement la charge des batteries est maintenue à l'aide d'une alimentation nourrice extérieure à la nacelle. Juste avant le lancement la nourrice est déconnectée. la tension au décollage était de 12,6 V à la fin du vol 12V, la charge restante était de 2393 mAh soit un taux de charge de 79 %.

L'alimentation a parfaitement rempli sa fonction.

5 Fréquences et Indicateurs des émetteurs

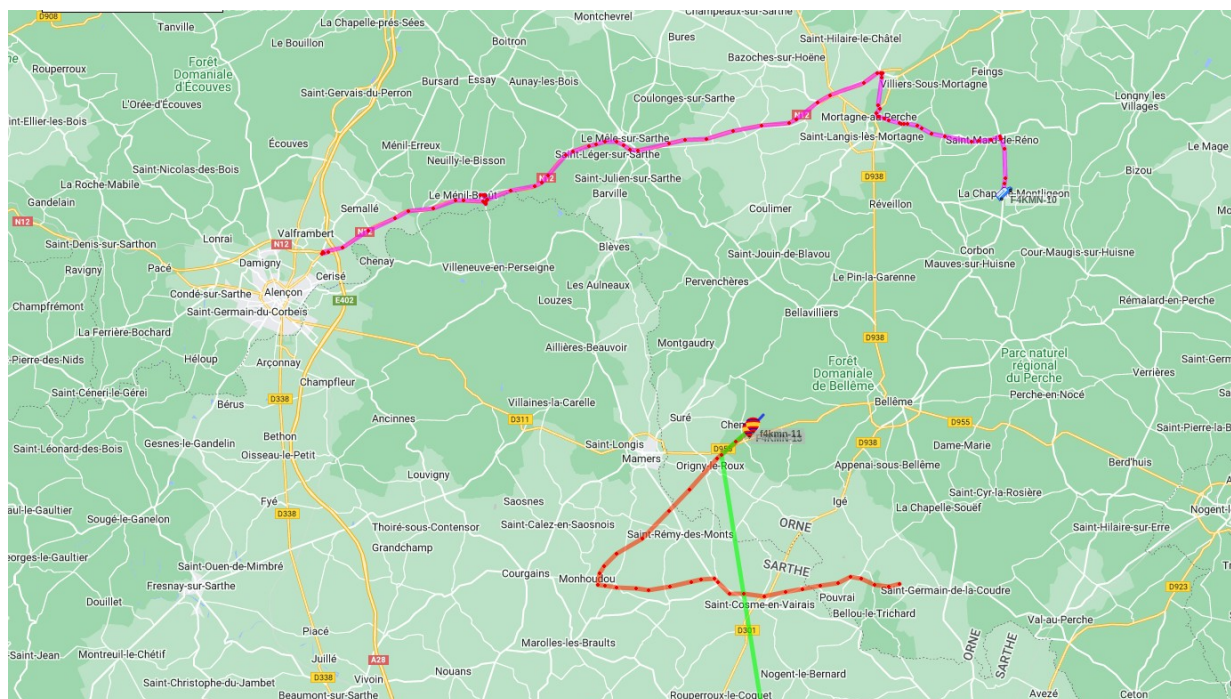
La nacelle est équipée de trois émetteurs radios:

- APRS sur LoRa fréquence **433,775 MHz** indicatif **F4KMN-11**
- APRS sur FX25 fréquence **137,05 MHz** indicatif **F4KMN-13**
- Sigfox fréquence **868 MHz** indicatif **C50EE9**

Les émissions sont décalées

- trame APR FX25 à la seconde 57
- trame APRS Lora à la seconde 20
- trame Sigfox à la seconde 40

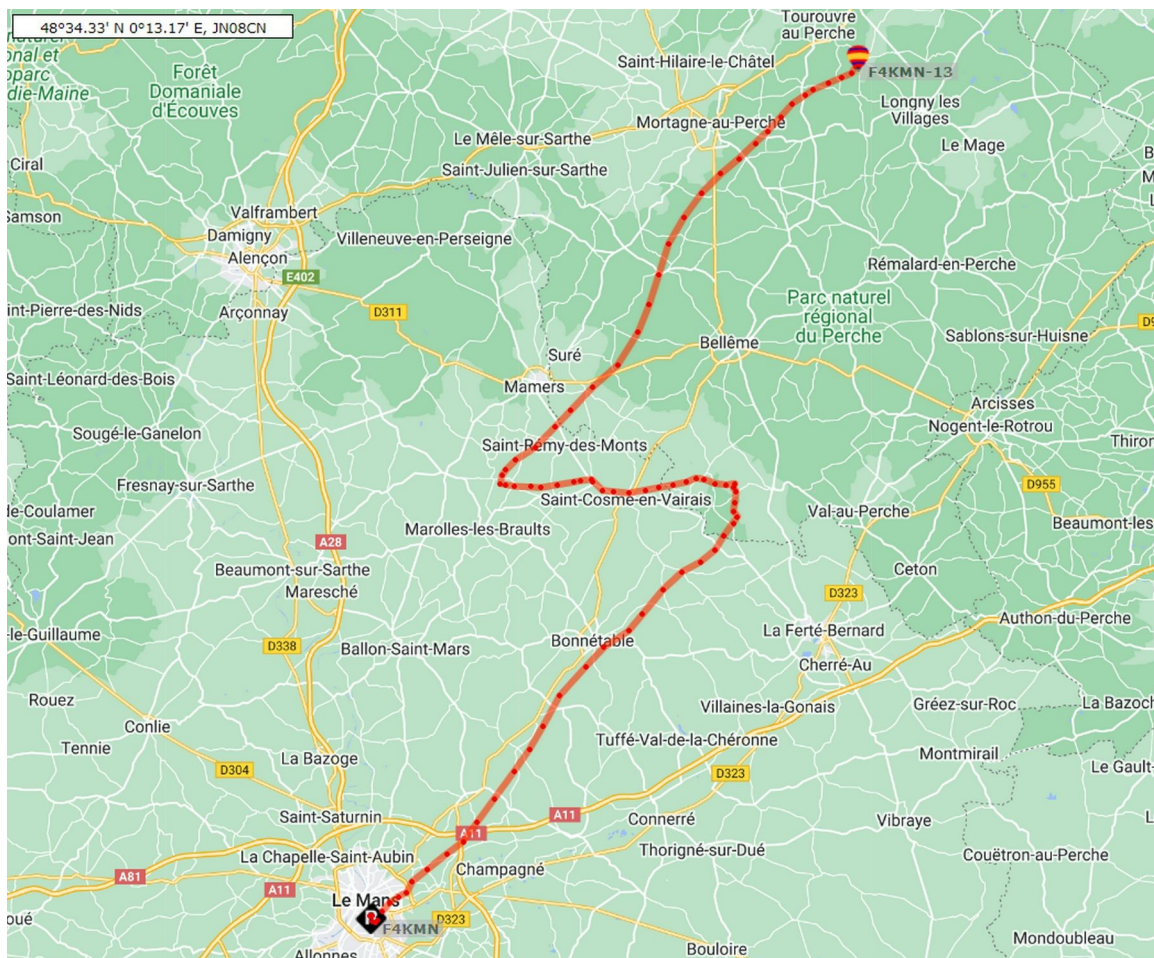
Indicatif de la voiture suiveuse **F4KMN-10**



La voiture suiveuse est arrivée sur la zone prévisionnelle atterrissage.

6 Le suivi de la trajectoire

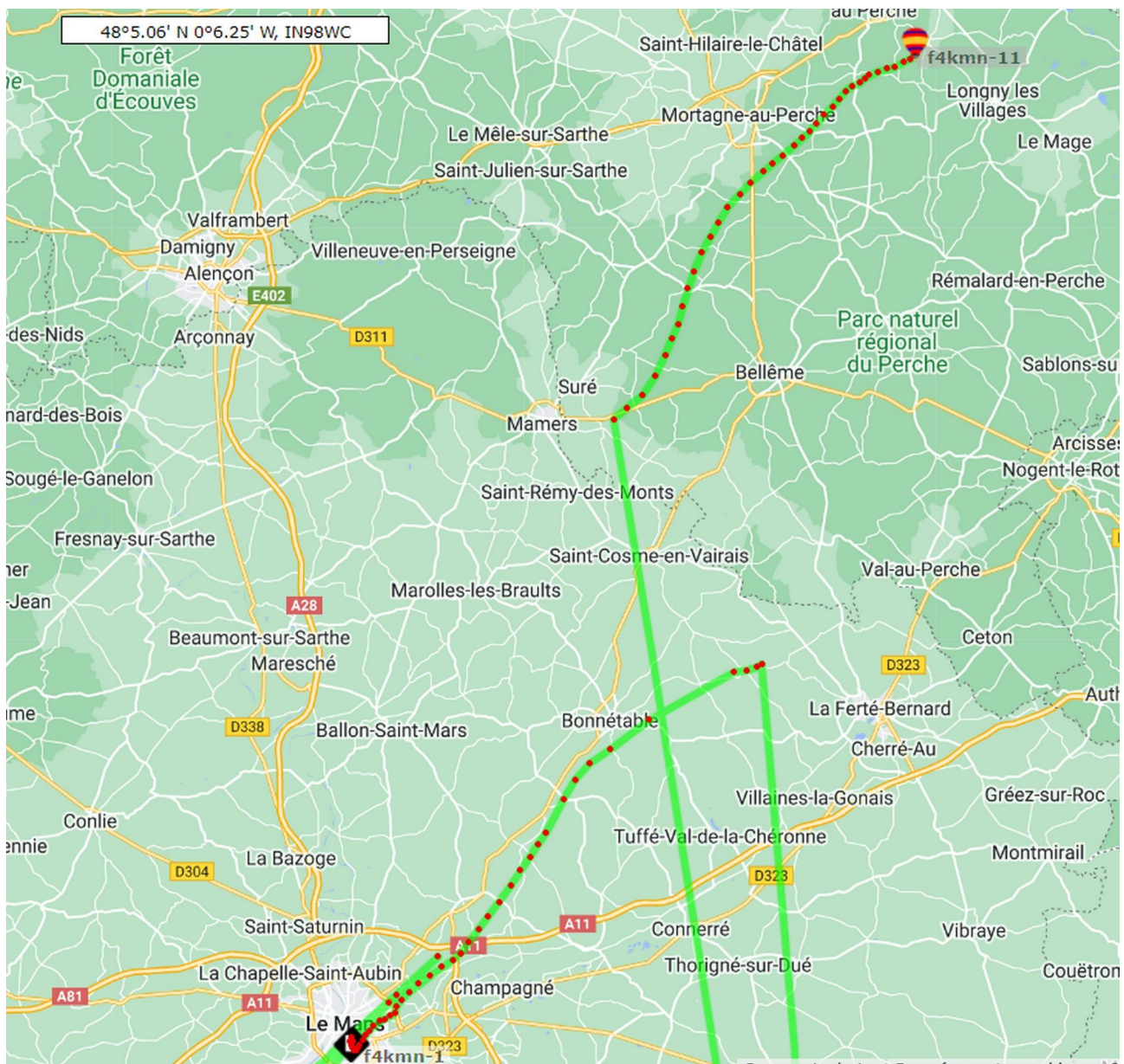
Le taux de mise à jour pour le suivi est d'une fois par minute sur la fréquence 433 MHz (Lora) et d'une fois toutes les deux minutes pour les fréquences 137,05 MHz (APRS FX25) et 868 MHz (Sigfox).



Temps de vol

Départ **13h 44' 15''** Arrivée **16h 29' 55''** durée **2h 45' 40''**

Sur la carte TTGO « LoRa », la puce GNSS a cessé de fonctionner à une altitude d'environ 12 000 m. Les positions du ballon au-dessus de 12 000 m étaient donc totalement fausses. Cependant le fonctionnement est revenu à la normale à la descente. On remarque que les points sont plus serrés que sur la trajectoire précédente car le taux de mise à jour est de une fois toutes les minutes.



Après quelques recherches sur le WEB, nous découvrons que la puce GNSS (NEO-6M) est configurée par défaut sur le modèle de plate-forme dynamique **Portable** (altitude max 12000m). Toutefois elle peut enregistrer les rapports d'altitude et de positionnement jusqu'à 160 000 FT (48 768 m), nous devons nous assurer d'activer le modèle de plate-forme dynamique (voir tableau ci-dessous) pour ajuster le moteur de navigation à l'environnement d'application attendu. le modèle **Airborne1g** est prévu pour fonctionner jusqu'à 50 km d'altitude.

Dynamic Platform Model Details

Platform	Max Altitude [m]	MAX Horizontal Velocity [m/s]	MAX Vertical Velocity [m/s]	Sanity check type	Max Position Deviation
Portable	12000	310	50	Altitude and Velocity	Medium
Stationary	9000	10	6	Altitude and Velocity	Small
Pedestrian	9000	30	20	Altitude and Velocity	Small
Automotive	6000	100	15	Altitude and Velocity	Medium
At sea	500	25	5	Altitude and Velocity	Medium
Airborne <1g	50000	100	100	Altitude	Large
Airborne <2g	50000	250	100	Altitude	Large
Airborne <4g	50000	500	100	Altitude	Large
Wrist	9000	30	20	Altitude and Velocity	Medium
Bike	6000	100	15	Altitude and Velocity	Medium

Vitesse mesurée de descente après éclatement

13941 pieds = 4249 m $4249 / 120 = 35,40 \text{ m/s}$ 127 km/h

Le modèle **Airborne <1g** est prévu pour fonctionner jusqu'à une vitesse verticale de 100m/s.

Conclusion

Le modèle Airborne <1g est le mieux adapté.

Par contre quand le ballon est retombé au sol, il serait bien de revenir au modèle **Stationary** qui donne la meilleur précision de position possible.

Extrait de programme pour adapter le modèle

```
myGPS.setDynamicModel(DYN_MODEL_AIRBORNE1g);
// Verification de la prise en compte
uint8_t newDynamicModel = myGPS.getDynamicModel();
if (newDynamicModel == 255)
{
    Serial.println(F("***!!! Warning: getDynamicModel failed !!!***"));
}
else
{
    Serial.print(F("The new dynamic model is: "));
    Serial.println(newDynamicModel);
}
```

7 La mesure des radiations

L'expérience principale 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 uSv/h à 10 mSv/h entre 0,01 cpm et 300 Kcpm)



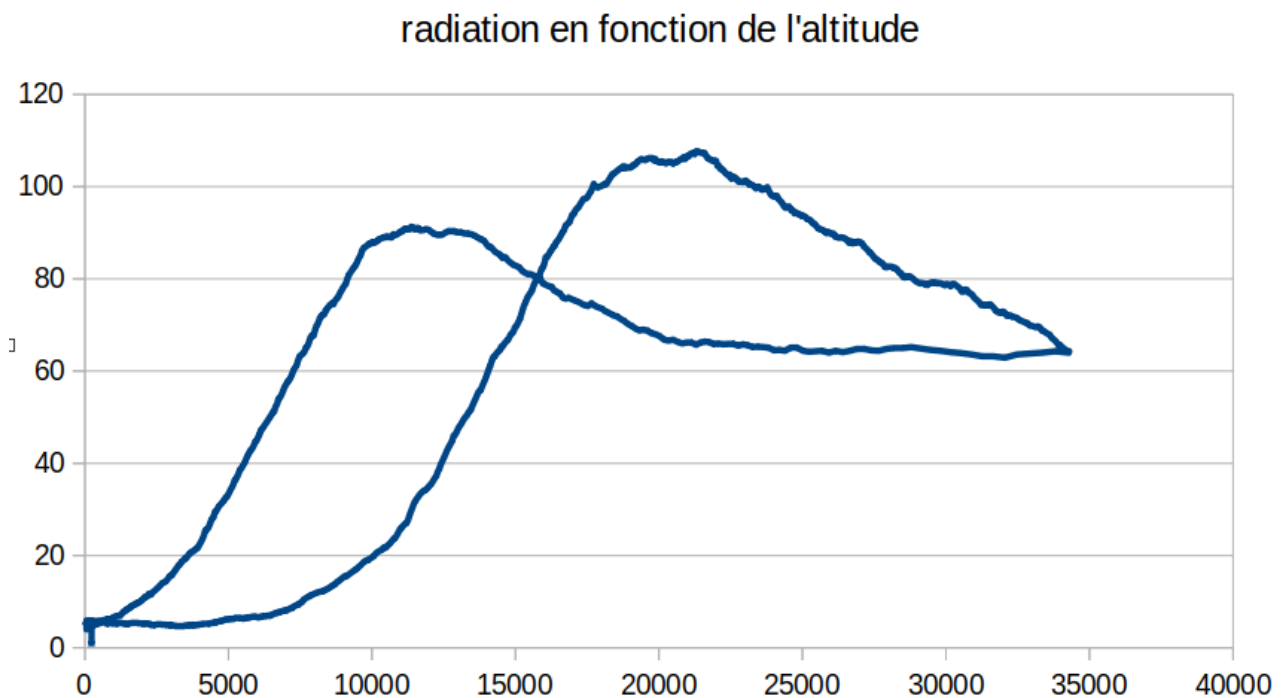
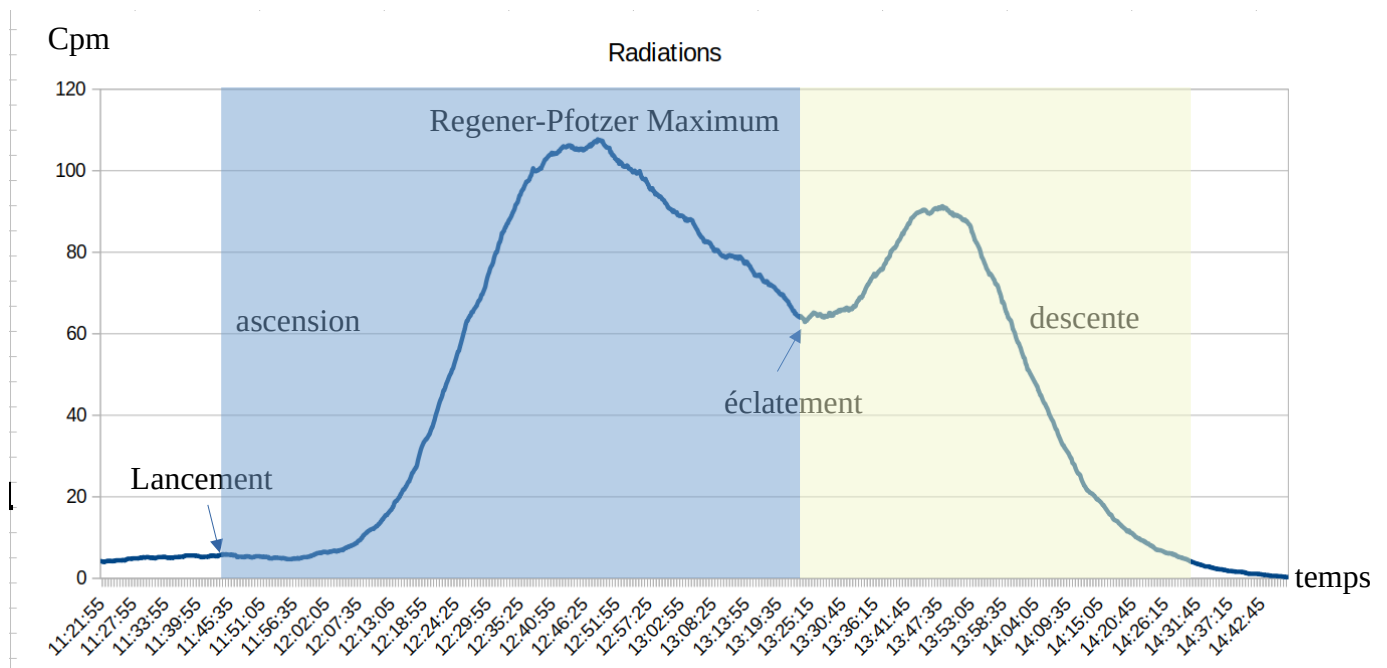
Le rayonnement est composé de photons gamma et de particules capables de provoquer, directement ou indirectement, la formation d'ions (par arrachement d'électrons) dans la matière qu'ils traversent.

La détection du rayonnement ionisant repose sur un type particulier de diode, la **diode PIN**. PIN pour Positive Intrinsic Negative fait référence directement à la manière dont est constitué le composant. Dans une diode PIN on trouve entre les zones P et N une zone non dopée dite intrinsèque.

La structure PIN permet la détection de photons, un peu à la manière d'un tube Geiger-Muller avec un effet 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 est dominante dans la région d'énergie gamma d'intérêt entre 5 keV et 100 keV. Les détecteurs basés sur **l'absorption directe dans le silicium** constituent une alternative peu coûteuse par rapport au détecteur à gaz (tube Geiger-Muller).

Notre expérience vise à confirmer les données concernant le maximum **Regener-Pfotzer**. Nous n'avons trouvé aucune étude européenne sur le maximum de Regener-Pfotzer lors de nos recherches.

Lors de nos mesures nous avons constaté un maximum à 69369 pieds = **21 143 m** → **107 cpm**
La dose de rayonnement diminue comme prévu lorsque le capteur atteint des altitudes plus élevées que ce Maximum dit de Regener-Pfotzer .

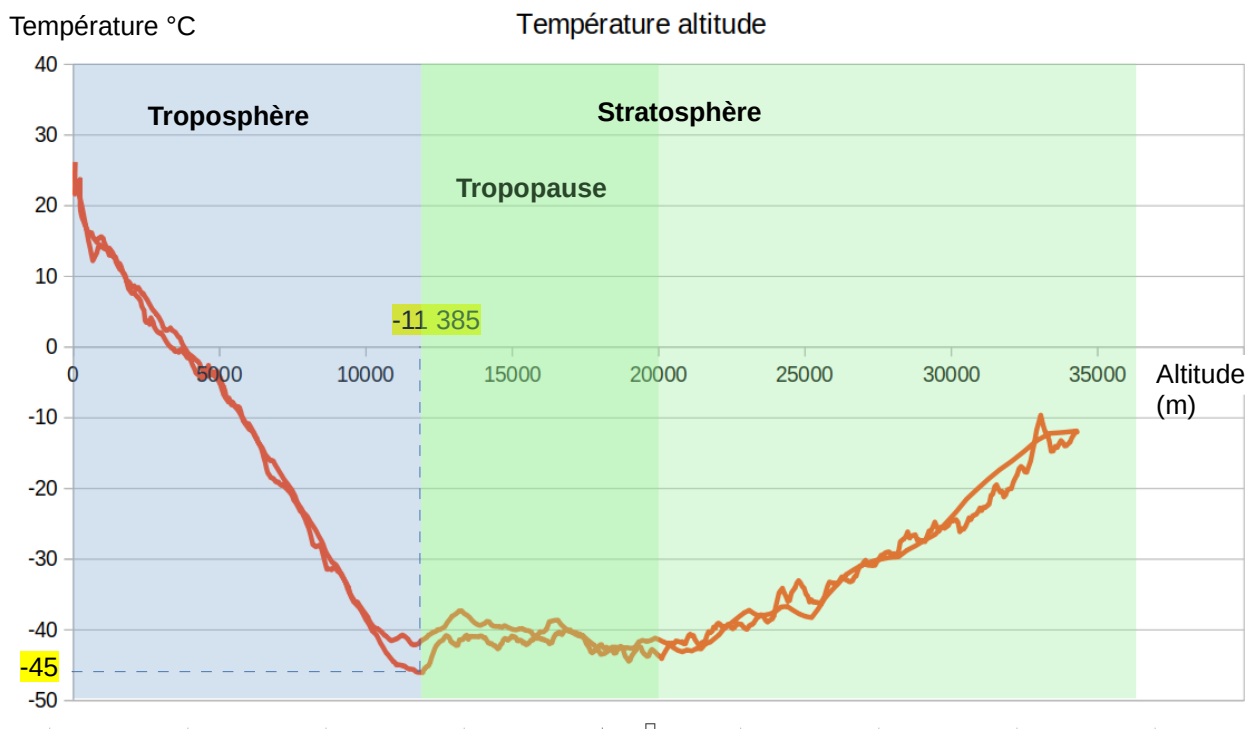


Conclusion : Nous observons bien un maximum pour l'altitude 20000m. La hausse due au rayonnement apparaît plus tardivement lors de la descente, car la vitesse de descente est plus importante que celle de la montée à ces altitudes.

8 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 μV par °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 °C/Km**

Le gradient thermique dans la tropopause est : **+0 °C/km**

Le gradient thermique dans la stratosphère est : **+2,22 °C/km**

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

9 Température minimale à l'intérieur de la nacelle

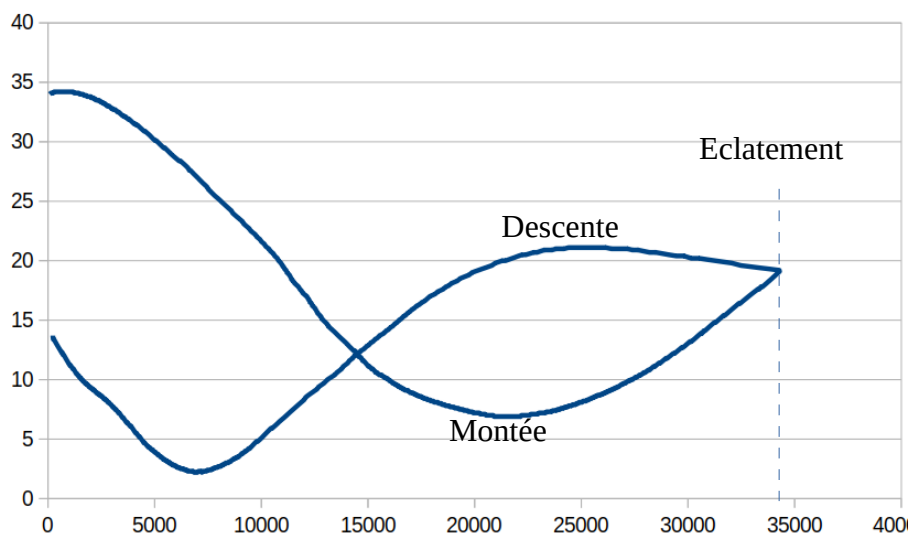
Un capteur mesure la température à l'intérieur de la nacelle. L'objectif est d'avoir une température positive à l'intérieur de la nacelle pendant toutes les phases du vol.



Ainsi la nacelle a été entièrement recouverte d'une couverture de couleur or pour retenir la chaleur interne.

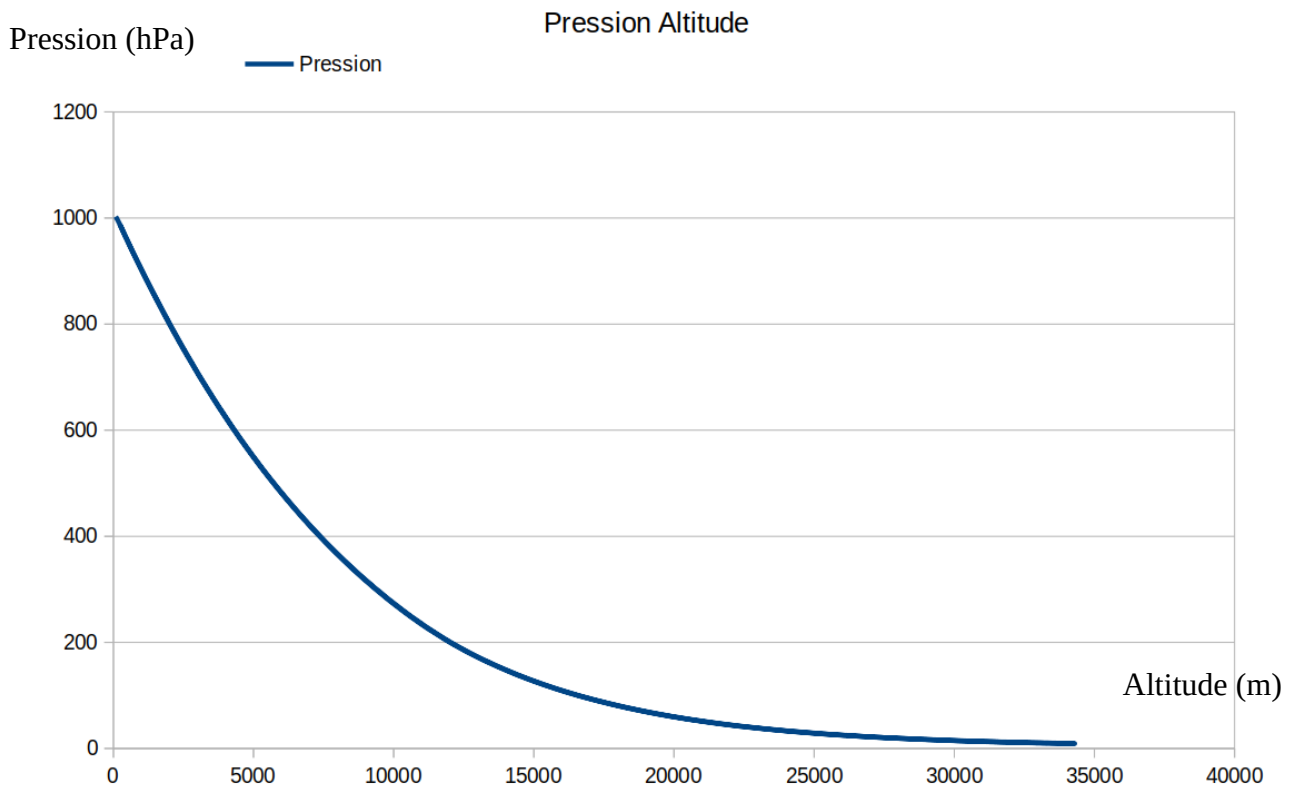
La couverture est revêtue de deux faces métallisées distinctes, respectivement dorée et argentée. Ces faces répondent à deux fonctions distinctes : le côté argenté, réfléchit 90% du rayonnement infrarouge, tandis que le côté doré absorbe 50% de la chaleur incidente. De ce fait, en positionnant la face dorée vers l'extérieur, la nacelle est protégée du froid, en retenant sa chaleur.

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.

10 Evolution de la pression avec l'altitude



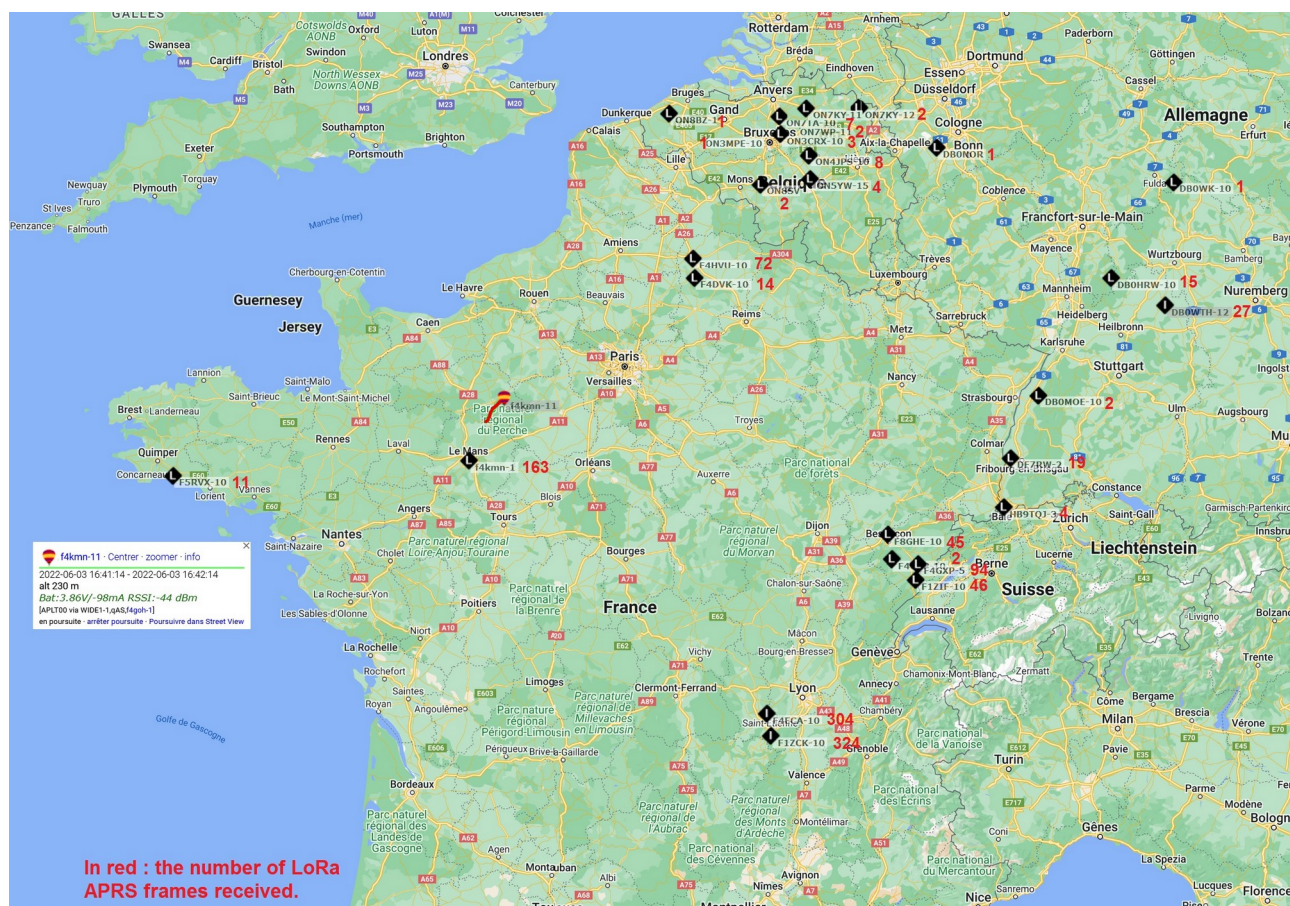
La pression est réduite :

- 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.

11 Trames APRS via LoRA

Pendant le vol, une trame par minute est émise, soit au total 177 trames transmises.
Les trames ont été entendues et relayées par les relais suivants.



Nombre de trames relayées par station (grep F1ZCK-10 Trame_F4KMN-11.txt | wc)

F1ZCK-10	324	F4GXP-10	5
F4ECA-10	304	ON5YW-15	4
F4KMN-1	163	HB9TQJ-3	4
F4GOH-1	122	ON3CRX-10	3
F4GXP-5	93	ON7WP-11	2
F4HVV-10	72	F4EWJ-10	2
F1ZIF-10	46	DB0MOE-10	2
F8GHE-10	45	ON7KY-12	2
DB0WTH-12	27	ON8SV-15	2
DF7RW-2	19	ON8BZ-13	1
DB0HRW-10	15	ON7KY-11	1
F4DVK-10	14	DB0NOR	1
F5RVX-10	11	DB0WK-10	1
ON4JPS-10	8	ON3MPE-10	1
ON7TA-10	7	F4GXP-3	1

Remarque : Les Relais F1ZCK-10 et F4ECA-10 ont bouclé sur eux-mêmes, ce qui explique qu'ils ont entendu plus de messages que le ballon en a envoyés.

12 Atterrissage

Le véhicule suiveur à emprunté l'autoroute ; il est arrivé à proximité du point de chute prévisionnel environ 30 minutes avant l'atterrissage. Finalement, le véhicule suiveur est arrivé sur la zone du point du chute à 16h32 deux minutes après l'atterrissage (16h30). La poursuite du ballon a donc été un succès.

La charge utile avec le réflecteur et le parachute se sont posé sur une petite route de campagne.

route de l'épine Jousset

commune de **Tourouvre au Perche** dans l'**Orne**

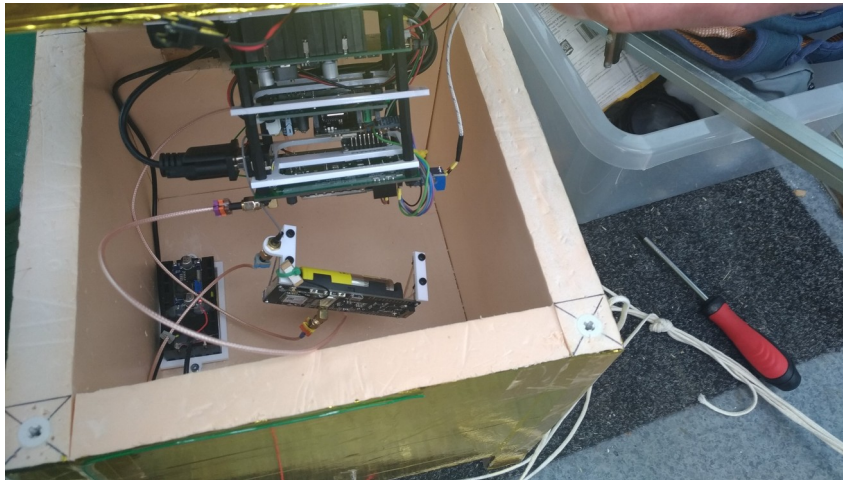
Latitude : **48,562312°**

Longitude: **0,684471°**

heure **16h 29' 55''**



Son état général est très bon, les cartes n'ont pas bougé, seule les fixations de la carte TTGO ont cédés à l'impact.



Il faudra modifier la fixation de cette carte afin d'avoir 4 points de fixation!

Il faudra prévoir de renforcer les pieds de la nacelle.

13 Source des logiciels sur Github

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

Logiciel serveur web [Valentin Desaunay](#)

Logiciel carte Sigfox [Benjamin Neveu](#)

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

Logiciel carte APRS FX25 [Philippe Simier](#)

14 Conclusions générales

Pour conclure, nous pouvons maintenant répondre aux questions que nous nous sommes posées au début de notre projet. 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 de nombreuses péripéties le jour du départ du fait de la météo orageuse, le ballon a pu prendre son envol. Malgré quelques difficultés les résultats obtenus sont intéressants et en tout cas confirment le succès technique du projet.