



STAGE 2A
PROJET EIRBALLOON

Eirballon - Rapport de stage 2A



Project funded by the Interreg Sudoe Programme through the European Regional Development Fund (ERDF)

Elève :
Nigel IGNATOWICZ

Enseignant :
Anthony GHIOTTO

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Remerciements	3
1.2	Contexte du stage	3
1.3	Présentation du projet et description des objectifs	3
1.3.1	Études Atmosphériques	4
1.3.2	Étude des Transmissions Radio	4
1.3.3	Prise et stockage d'images	4
1.3.4	Répartition des objectifs	5
2	Élaboration de la liaison radio fréquence	5
2.1	Antenne monopole quart d'onde	5
2.1.1	Cahier des charges	5
2.1.2	Détermination du canal de liaison idéal	5
2.1.3	Conception et fabrication	6
2.1.4	Tests	8
2.1.5	Intégration	9
2.1.6	Pistes d'améliorations	10
2.2	Amplificateur faible bruit (réception)	10
2.2.1	Cahier des charges	10
2.2.2	Conception et fabrication	10
2.2.3	Tests	12
2.3	Amplificateur de puissance (émission)	13
2.3.1	Cahier des charges	13
2.3.2	Conception	13
2.4	Calcul du budget de liaison	14
2.4.1	Définition des variables et assignation des valeurs	14
2.4.2	Formules	14
2.4.3	Estimation de la portée maximale théorique	15
2.4.4	Effets de l'horizon et validation du critère	15
3	Élaboration de la structure mécanique de la nacelle et de ses équipements propres	15
3.1	Structure de la nacelle	15
3.1.1	Cahier des charges	16
3.1.2	Conception et fabrication	16
3.1.3	Tests	21
3.1.4	Intégration	21
3.1.5	Pistes d'améliorations	27
3.2	Voyants lumineux	27
3.2.1	Cahier des charges	27
3.2.2	Conception et fabrication	28
3.2.3	Tests	31
3.2.4	Intégration	34
3.2.5	Pistes d'améliorations	35

4 Étude du comportement des alimentations en basse température	35
4.1 Protocole expérimental	35
4.2 Résultats	36
5 Suivi du projet et validation du cahier des charges	38
5.1 Établissement des procédures de vol et suivi de l'avancement des tâches . .	38
5.1.1 Procédures de vol	38
5.1.2 Avancement des tâches	39
5.2 Suivi de l'avancement du projet vis à vis des exigences du cahier des charges	40
6 Le vol du ballon	41
7 Conclusion	42
8 Message aux futures équipes	42
8.1 Idées d'évolutions du projet	43
9 Annexes	43
9.1 Nomenclatures	43
9.1.1 Amplificateur faible bruit	43
9.1.2 Amplificateur de puissance	44
9.1.3 Structure mécanique de la nacelle et intégration	44
9.1.4 Voyants lumineux à LED	44
9.2 Bilan des masses	45
9.3 Datasheets	45
9.4 Cahier des charges	45
9.5 Tableurs	45
9.6 Logiciels	45
10 Table des figures	45

1 Introduction

1.1 Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon maître de stage, Monsieur Anthony GHIOTTO, qui m'a permis de réaliser ce stage et qui m'a fait confiance pour ce projet.

Je tiens ensuite à remercier Monsieur Guillaume DURIN de l'AJSEP, aérotechnicien en charge du suivi du projet pour son accompagnement et ses précieux conseils tout au long du projet.

Je tiens également à remercier tous les enseignants nous ayant accompagné durant le projet : Monsieur Guillaume FERRE, Monsieur Guy MORIZET, Monsieur Yannick BORNAT, ainsi que les étudiants membres de l'équipe du projet : Yohan BELLANGER, Antton BODIN, Edgar DE OLIVEIRA CRUZ, François VANLERBERGHE.

Enfin je tiens à remercier toutes les personnes qui sont intervenues de près ou de loin dans ce projet dont Marwane REZZOUKI, Jean-Marc MICOULEAU, Sébastien DELPEUCH, Christian FAURENS, Florian LOUPIAS, Marc TOUYET, Philippe MONIEZ, Emilie CHAPELLE, Dominique MARSAN, Julien HULOT ainsi que toute l'équipe CSH du laboratoire IMS et l'ensemble de nos partenaires.

1.2 Contexte du stage

Ce stage s'inscrit dans la continuité du projet thématique de seconde année de la filière électronique. En effet, en raison de la crise sanitaire, le projet n'a pas pu aboutir à la date prévue. Il a donc été décidé par l'ensemble de l'équipe en charge du projet de le poursuivre durant l'été sous forme de stage.

L'objectif de ce projet est de réaliser de A à Z une nacelle de ballon-sonde qui doit être lâché à l'occasion des 100 ans de l'ENSEIRB-MATMECA, en partenariat avec le CNES, l'AJSEP et Planète Sciences. Cette nacelle embarquera diverses expériences à son bord et répondra à un cahier des charges précis imposé par le CNES et Planète Sciences.

1.3 Présentation du projet et description des objectifs

Cette partie a pour but de définir les objectifs expérimentaux du projet Eirballoon, visant à lâcher un ballon sonde contenant plusieurs expériences embarquées à son bord. Ces objectifs sont multiples et sont détaillés dans la suite de cette partie.

En effet, dans le cadre des objectifs de notre projet, le ballon-sonde nous semblait être le moyen idéal de réunir les conditions expérimentales nécessaire à nos expériences, à savoir une basse température, une basse pression et une distance de plusieurs dizaines de kilomètres entre notre émetteur et notre récepteur.

Cependant, pour atteindre nos objectifs, notre équipe composée de 5 étudiants de l'ENSEIRB-MATMECA a pu mettre en place un dispositif expérimental fonctionnel en amont de la date de lancement. Pour cela, nous avons donc développé un module autonome constitué d'une série de capteurs et d'un GPS qui fonctionnent sur une carte Arduino. Le tout étant capable de transmettre les données de télémessures via le protocole LoRa à une station sol que nous avons également mis au point avec l'aide de nos enseignants.

De plus, un second système totalement indépendant du premier, en charge de la capture et du stockage d'images a également été mis au point. Celui-ci fonctionne également

en autonomie sur une carte Arduino et est équipé de deux petites caméras et d'une carte SD pour le stockage.

Enfin, nous avons également mis au point une nacelle équipée d'un système de repérage à LEDs ainsi que d'une antenne d'émission afin de pouvoir intégrer toutes nos expériences embarquées. Cette nacelle doit également répondre aux critères imposés par le cahier des charges de Planète Sciences et du CNES.

1.3.1 Études Atmosphériques

Présentation : Une partie de l'expérience embarquée est constituée d'un module réalisant des mesures atmosphériques (Température, UV, CO₂, Pression) ainsi qu'un module GPS. Ces capteurs seront actifs durant toute la durée du vol.

Objectifs : L'objectif de cette expérience sera d'étudier la variation des différents paramètres mesurés en fonction de l'altitude et de déterminer leur profil au travers des différentes couches de l'atmosphère traversées par le ballon. De plus, cela permettra d'évaluer le comportement des différents systèmes électroniques dans des conditions extrêmes de température et de pression. Enfin, le module GPS nous permettra d'étudier le suivi par GPS du ballon en temps réel, et donc de connaître sa position et son altitude à chaque instant, pour non seulement mettre ces informations en relation avec les mesures des différents capteurs, mais aussi de faciliter les recherches du ballon une fois celui-ci retombé.

1.3.2 Étude des Transmissions Radio

Présentation : Toutes les informations captées par les capteurs atmosphériques embarqués doivent être retransmises en direct au sol durant toute la durée du vol en utilisant le protocole de communication LoRa.

Objectifs : L'objectif de cette expérience est donc d'étudier la communication par ondes radio via le protocole LoRa à plusieurs dizaines de kilomètres de distance, tout en mettant en évidence l'encombrement du spectre de fréquence qui pourrait interférer avec les signaux que l'on souhaite recevoir au fur et à mesure que le ballon s'éloigne et que le signal utile reçu perd en puissance. Ainsi, nous pourrions étudier le fonctionnement et évaluer les performances du module de communication LoRa que nous aurons mis au point dans le cadre du projet (pour l'émission), et de la station sol (pour la réception).

1.3.3 Prise et stockage d'images

Présentation : Un système indépendant du reste et dédié à la prise d'images sera embarqué dans la nacelle, afin de prendre des images à intervalles réguliers durant toute la durée du vol, et les stocker localement.

Objectifs : Ce système aura pour objectif de fournir des images de la mission afin d'avoir un support visuel pertinent et permettre de partager notre expérience à un grand nombre de personnes. De plus, ce module ayant été mis au point par nos soins, le lancement du ballon sera également l'occasion de le mettre à l'épreuve afin de valider son fonctionnement en conditions réelles.

1.3.4 Répartition des objectifs

Tous ces objectifs ont été repartis sur trois équipes différentes. Dans ce rapport, seules les parties traitant de la liaison radio-fréquence, de la structure mécanique de la nacelle et du suivi de l'avancement du projet seront traités.

NB : La nomenclature de chaque module présenté, avec les références exactes, est présentée en annexe.

2 Élaboration de la liaison radio fréquence

Le module de télémesure LoRa doit permettre de recevoir les données mesurées par les capteurs en temps réel durant toute la durée du vol. Pour cela, la chaîne de transmission doit être optimisée afin de recevoir un signal exploitable au sol malgré la distance séparant la station de réception du ballon, qui peut-être de plusieurs centaines de kilomètres. Dans les parties suivantes seront détaillées la conception et la fabrication de l'antenne d'émission, des différents amplificateurs ainsi que le calcul du bilan de liaison.

2.1 Antenne monopole quart d'onde

La solution retenue pour émettre le signal utile depuis le module LoRa vers la station de réception est une antenne monopole quart d'onde. Les parties suivantes détaillent les choix techniques retenues pour assurer cette fonction.

2.1.1 Cahier des charges

Les contraintes concernant l'antenne sont les suivantes :

- 1. L'antenne sera de type monopole quart d'onde avec un plan de masse en feuilles d'aluminium.
- 2. L'antenne sera orientée vers le bas de la nacelle.
- 3. La pointe de l'antenne sera protégée par du polystyrène extrudé afin de ne pas blesser en cas de chute sur un individu.
- 4. L'antenne sera calibrée pour émettre un signal dont la fréquence correspond au canal LoRa choisi.

Les trois premières exigences seront détaillées au moment de la fabrication et de l'intégration. La quatrième est détaillée dans la partie qui suit.

2.1.2 Détermination du canal de liaison idéal

Il est possible d'utiliser 8 canaux différents pour utiliser le protocole LoRa. Ceux-ci sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Channel Number	LoRa Center Frequency
CH_10_868	865.20 MHz
CH_11_868	865.50 MHz
CH_12_868	865.80 MHz
CH_13_868	866.10 MHz
CH_14_868	866.40 MHz
CH_15_868	866.70 MHz
CH_16_868	867 MHz
CH_17_868	868 MHz

FIGURE 1 – Canaux LoRa utilisables

Cependant, certains canaux sont plus encombrés que d'autres suivant l'endroit où le récepteur se trouve. C'est pourquoi il est important de déterminer le canal le moins encombré afin de permettre une réception optimale du signal. Pour cela, chaque canal est analysé grâce à l'analyseur de spectre Tektronik RSA5106B présent au club radio de l'ENSEIRB-MATMECA.

Pour cela, il suffit de brancher une des antennes qui seront utilisées au moment du vol (elles sont au nombre de deux : une antenne directionnelle montée sur rotor de type Yagi-Uda et une antenne omnidirectionnelle de type monopole) sur l'analyseur de spectre et d'observer les signaux reçus.

Après analyse de chacun des canaux via l'antenne Yagi-Uda, il se trouve que le moins encombré au niveau de la station de réception est le canal CH_11_868 qui est centré à la fréquence de 865.5MHz. C'est donc ce canal qui sera retenu pour transmettre les mesures lors du vol du ballon, et qui doit être prit en compte pour l'exigence 4. du cahier des charges.

2.1.3 Conception et fabrication

Conception : La conception de l'antenne a été faite sur le logiciel CST Studio de Dassault Systemes. Cependant elle a été effectuée par François Vanlerberghe, un autre membre de l'équipe travaillant sur le projet, donc seuls les résultats retenus pour la fabrication seront mentionnés.

D'après les simulations réalisées, l'antenne doit mesurer 8,4cm de long et doit se situer idéalement au centre d'un plan de masse carré de 16,8cm de côté. Ainsi l'antenne a un rayonnement symétrique et est capable d'émettre à 865,5Mhz.

Ce sont donc ces paramètres qui seront initialement retenus pour la fabrication de l'antenne.

Fabrication : La fabrication de l'antenne est réalisée directement sur la nacelle. C'est à dire que l'antenne est indissociable de la nacelle. Pour ce faire, toute la surface de la nacelle sur laquelle se trouvera le plan de masse de l'antenne est recouverte de ruban adhésif double face. Ensuite, ce ruban adhésif est recouverte d'une fine feuille de papier d'aluminium (exigence 1.). Il est important de chasser au maximum les éventuelles bulles d'air présentes entre la nacelle et l'aluminium.

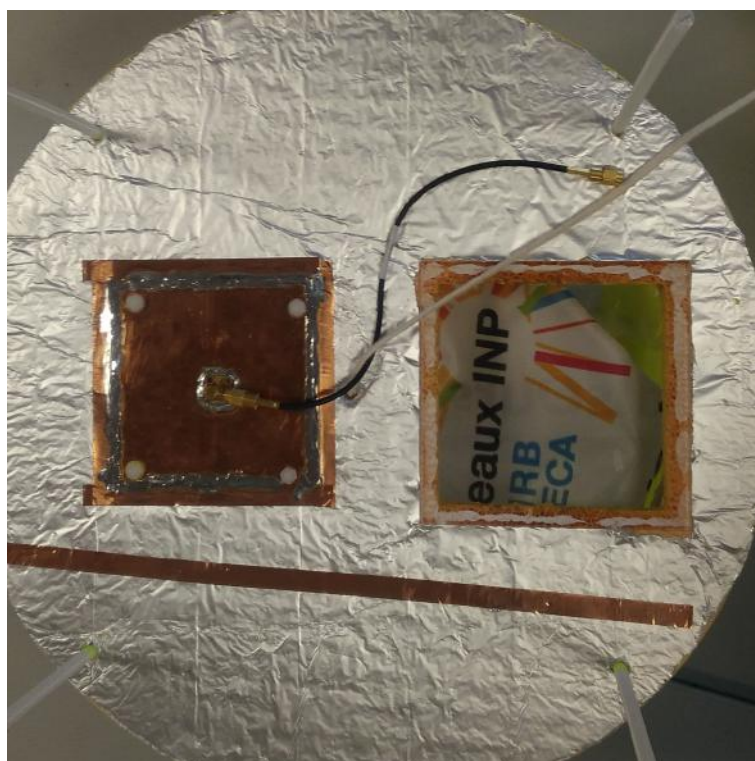


FIGURE 2 – Plan de masse de l'antenne

Ensuite, un connecteur SMA est soudé au centre d'une petite plaque de cuivre d'environ 12cm de côté (la taille de la plaque importe peu). Au bout du connecteur est soudé un fil de cuivre de section $1,5\text{mm}^2$ de longueur 10cm environ (la longueur sera ajustée lors des tests). Cette plaque est ensuite vissée sur le plan de masse à l'aide de 4 vis en nylon de 25mm de long et de diamètre M4. Le contact entre la plaque de cuivre et l'aluminium est renforcé grâce à des bandes de cuivres autocollantes.



FIGURE 3 – Plaque de cuivre servant de support au brin de l'antenne

L'antenne ainsi fabriquée peut donc être testée.

2.1.4 Tests

Les tests ainsi que la calibration de l'antenne sont réalisés sur l'analyseur de réseau de l'ENSEIRB-MATMECA, afin de mesurer ses paramètres tels que son Rapport d'Ondes Stationnaires (ROS) et sa fréquence de résonance.



FIGURE 4 – Tests et mesures sur l'antenne

Les mesures réalisées sur l'antenne dimensionnée conformément aux simulation se sont montrées peu satisfaisantes. Il a donc été choisi de prolonger le plan de masse sur toute la surface de la portion de nacelle utilisée.

Ainsi, le ROS de l'antenne est mesuré à 1,6. Cette valeur est acceptable sachant que dans le cas idéal où l'impédance caractéristique de l'antenne serait purement résistive et égale à $Z_a = 37\Omega$, le ROS ne peut être inférieur à $\frac{Z_c}{Z_a} = 1,3$ si la sortie de l'émetteur a une impédance caractéristique $Z_c = 50\Omega$

Dans les faits, les mesures montrent que l'impédance caractéristique de l'antenne est légèrement inductive et sa partie réelle vaut 27Ω .

Enfin, l'antenne doit être coupée à la bonne longueur afin que sa fréquence corresponde à la fréquence du canal LoRa utilisé, qui est de 865,5Mhz. Pour cela, l'antenne est raccourcie petit à petit jusqu'à ce que la bonne fréquence de résonance soit observée sur l'analyseur de réseau.

Ainsi, l'antenne est calibrée pour résonner à 865,5Mhz avec un paramètre S_{11} de -13dB à cette fréquence.

C'est donc cette antenne qui sera utilisée dans le ballon.

2.1.5 Intégration

La fabrication même de l'antenne fait office de pré-intégration. Donc afin d'intégrer définitivement l'antenne dans la nacelle, il suffit de la positionner tout en bas de celle-ci et de relier le connecteur de l'antenne au module LoRa via un câble SMA (exigence 2.). Un connecteur en angle-droit a été ajouté entre le câble SMA et le connecteur de l'antenne afin d'éviter les obstructions causées par les éléments qui se trouvent au dessus.



FIGURE 5 – Connexion de l'antenne au module LoRa

Enfin, la pointe de l'antenne est protégée par un morceau de polystyrène extrudé qui fait également office de décoration, et est collé à l'antenne au pistolet à colle :



FIGURE 6 – Abeille servant à protéger la pointe de l'antenne

2.1.6 Pistes d'améliorations

De nombreux problèmes ont été engendrés par le plan de masse de l'antenne. En effet, la forme de celui-ci est très importante, et sa forme optimale ne correspond pas forcément aux données de la simulation. En tout, 5 modèles d'antennes différents ont été fabriqués avant de trouver un modèle convenable. Il ressort de ces expériences que plus le plan de masse est grand, et plus les résultats obtenus sont satisfaisants. Il ne faut donc pas hésiter à faire un plan de masse le plus grand possible, en prenant garde à ne pas dépasser la masse maximale autorisée.

2.2 Amplificateur faible bruit (réception)

Afin d'obtenir un signal utile exploitable, un amplificateur faible bruit (LNA) doit être placé sur chaque antenne de réception.

2.2.1 Cahier des charges

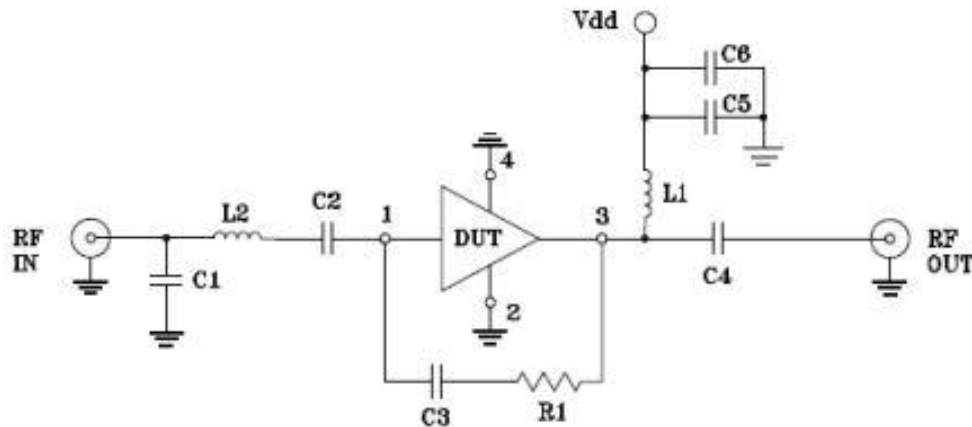
Les amplificateurs devront répondre aux exigences suivantes :

- 1. Ils doivent être capables d'amplifier un signal dont la fréquence est comprise entre 865Mhz et 868Mhz (ce qui englobe tous les canaux LoRa).
- 2. Ils doivent être alimentés par le câble coaxial de sortie.
- 3. Ils doivent être protégés par un boîtier de blindage électromagnétique.

2.2.2 Conception et fabrication

Conception : Le LNA retenu est le PHA-13LN+ de chez Mini-Circuits. Il est capable d'amplifier tout signal dont la fréquence est comprise entre 1Mhz et 1Ghz (exigence 1.) et sa tension d'alimentation est de 5V.

Le circuit d'application fourni dans la datasheet du composant est donc modélisé sur le logiciel ADS :



Components	Size	Value	Manufacturer	P/N
C1	0402	1.5 pF	Murata	GRM1555C1H1R5CZ01
C2	0603	2.2 uF		GRM188R61C225KE15
C3	0402	0.1uF		GRM155R71C104KA88
C4	0603	2.2 uF		GRM188R61C225KE15
C5	0402	1000 pF		GRM1555C1H102JA01
C6	0805	10 uF		GRM21BR61C106KE15
L1	1210	15 uH	Coilcraft	LQH32DN150K53L
L2	0603	5.1 nH		0603CS-5N1XJL
R1	0402	1500 Ω	Koa	RK73H1ET1501F

FIGURE 7 – Circuit d'application du PHA-13LN+

Le modèle obtenu sur ADS est le suivant :

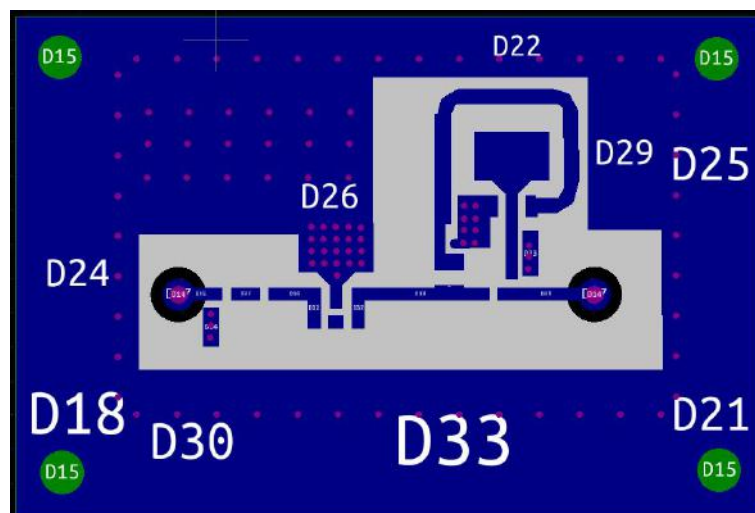


FIGURE 8 – Schéma Gerber de l'amplificateur

Le modèle diffère légèrement du circuit d'application. En effet, un régulateur de tension 5V a été ajouté afin d'alimenter le LNA et une capacité de 1nF ainsi qu'une inductance de 100nH ont été ajoutés en sortie afin de permettre l'alimentation par le câble coaxial de sortie (exigence 2.). Enfin, des vias métallisées ont été ajoutés tout autour du circuit

afin de permettre un contact optimal entre le circuit et le boîtier de blindage (exigence 3.) ainsi qu'au niveau des composants reliés à la masse afin que le trajet entre le composant et le plan de masse soit le plus court possible. La liste des composants utilisés est présentée en annexe.

Fabrication : Les composants sont soudés au four avec de la pâte à braser et les composants sont positionnés grâce au système Pick and Place du laboratoire IMS. Les connecteurs et le boîtier de blindage sont soudés à l'étain au fer à souder. Une fois terminés, les amplificateurs se présentent comme suit (sans le couvercle du blindage) :

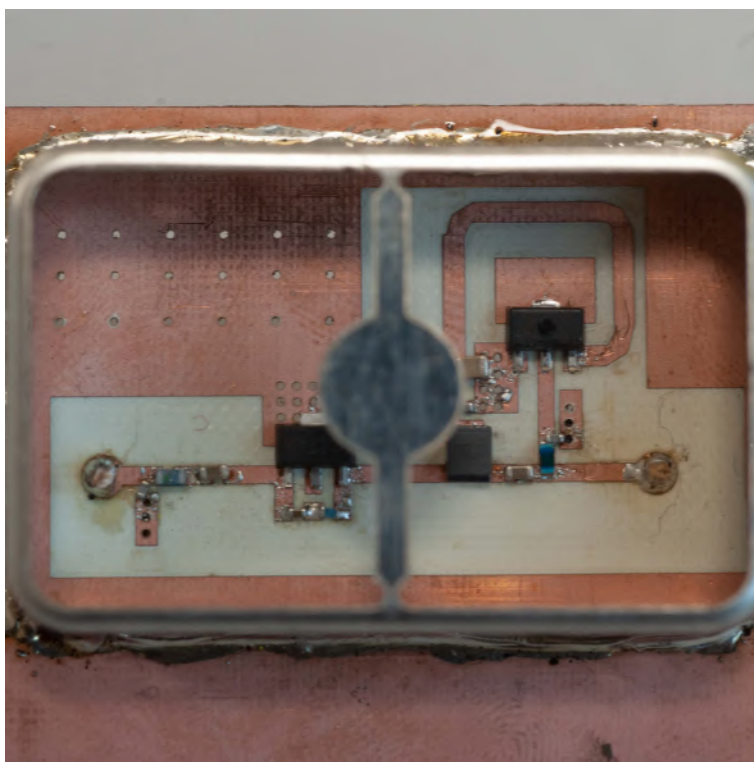


FIGURE 9 – Amplificateur faible bruit fabriqué

Les tests de fonctionnement peuvent débuter.

2.2.3 Tests

Lors des tests, un problème semble provenir des régulateurs de tension, qui ne fournissent pas la tension de 5V espérée. En effet, ceux-ci ne sortent que 3,8V et présentent une oscillation à 3Ghz. Ce problème doit être corrigé soit par la suppression du régulateur (et donc l'amplificateur sera directement alimenté en 5V par le câble coaxial de sortie) soit par l'ajout de capacités de découplage de $1\mu F$ en entrée et en sortie de régulateur.

A l'heure actuelle, nous ne savons pas encore si ces amplificateurs seront utilisés sur les antennes de réception ou pas. Plus de détails seront donnés durant la soutenance du stage.

2.3 Amplificateur de puissance (émission)

Initialement, il a été prévu qu'un amplificateur de puissance (PA) prenne place dans la nacelle du ballon, afin d'amplifier le signal de sortie du module LoRa.

2.3.1 Cahier des charges

Les exigences de l'amplificateur étaient les suivantes :

- 1. Le PA doit amplifier des signaux dont la fréquence est de 868Mhz.
- 2. Le PA doit permettre d'avoir une puissance de sortie de 28dbm.

2.3.2 Conception

Le PA retenu est le GVA-91+ de Mini-Circuits. Il permet d'amplifier des signaux dont la fréquence s'étend de 869Mhz à 2,7Ghz. L'exigence 1. est donc respectée.

La datasheet du PA fournit un circuit d'application qui est modélisé sur le logiciel ADS :

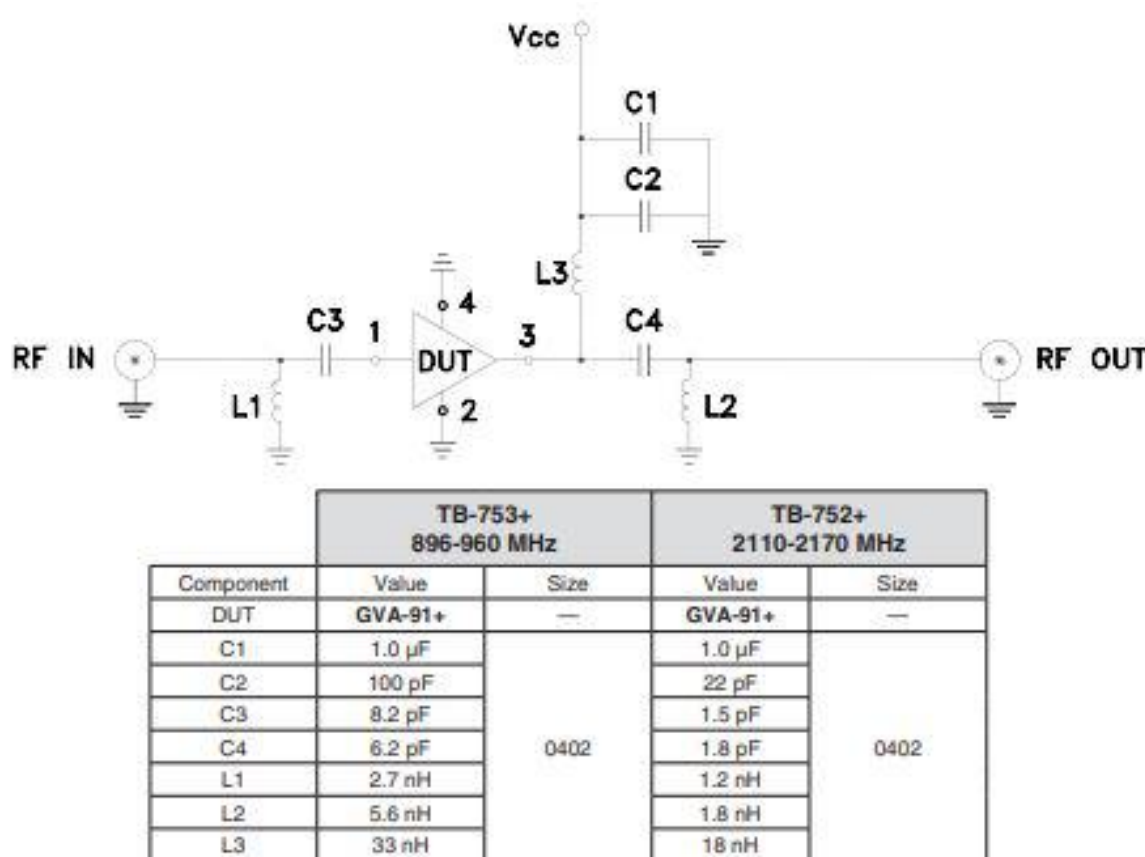


FIGURE 10 – Circuit d'application du GVA-91+

Malheureusement, l'ajout d'un PA en sortie du module LoRa transgresse la législation sur la puissance maximale pouvant être émise. Cependant, ce modèle de PA peut être repris pour une utilisation ultérieure sur une autre bande de fréquence qui autorise de plus grande puissances d'émission par exemple.

2.4 Calcul du budget de liaison

Cette partie a pour but d'établir le budget de liaison du module LoRa, afin de valider la possibilité de recevoir des données à au moins 200km de distance. Ce calcul s'inscrit dans le cadre du critère TEL 5 de l'exigence 10.9 du cahier des charges Planète Sciences. Le calcul est effectué en double : une fois pour chaque antenne utilisée. L'une est une antenne directionnelle montée sur rotor de type Yagi-Uda et l'autre est une antenne omnidirectionnelle de type monopole.

2.4.1 Définition des variables et assignation des valeurs

- BW = bande passante du signal
- NF = Facteur de bruit
- SNR = Rapport signal sur Bruit
- PTX = Puissance de l'émetteur
- GTX = Gain de l'antenne d'émission
- GRX = Gain de l'antenne de réception

Dans notre cas, les valeurs sont les suivantes :

- $BW = 125 \text{ kHz}$
- $NF = 6 \text{ dB}$ (Valeur volontairement supérieure à la valeur réelle pour garder de la marge)
- $SNR = -20$ (En réglant le Spreading Factor (SF) sur $SF = 12$)
- $PTX = 14 \text{ dBm}$
- $GTX = 0 \text{ dB}$
- $GRX = 0 \text{ dB}$ (antenne monopole) ou $GRX = 10 \text{ dB}$ (antenne Yagi-Uda). Une fois de plus les valeurs sont volontairement plus faible qu'en réalité afin de garder de la marge.

2.4.2 Formules

Le budget de liaison se calcule comme suit :

$$B_L = PTX + GTX - S + GRX$$

Avec S :

$$S = -174 + 10\log(BW) + NF + SNR$$

On a donc :

$$S = -174 + 10\log(125000) + 6 - 20 = -137 \text{ dBm}$$

Donc (Antenne monopole) :

$$B_L = 14 + 0 + 137 + 0 = 151 \text{ dBm}$$

et (Antenne Yagi-Uda) :

$$B_L = 14 + 0 + 137 + 10 = 161 \text{ dBm}$$

Notre budget de liaison vaut donc 151dBm avec l'antenne monopole et 161dBm avec l'antenne Yagi-Uda.

2.4.3 Estimation de la portée maximale théorique

Notre communication se fera exclusivement en ligne directe. En effet aucun obstacle autre que l'air se trouvera entre notre émetteur et notre récepteur. La portée maximale se calcule donc en fonction du FSPL (Free Space Path Loss) avec d la distance entre l'émetteur et le récepteur et f la fréquence du signal (865,5 MHz) :

$$FSPL = 20\log(d) + 20\log(f) - 147,55$$

Donc :

$$d = 10^{\frac{FSPL + 147,55 - 20\log(f)}{20}}$$

On veut connaître la distance maximale, donc on prend $FSPL = B_L$.

Ce qui donne (antenne Monopole) :

$$d = 10^{\frac{151 + 147,55 - 20\log(865500000)}{20}} = 978km$$

Et (antenne Yagi-Uda) :

$$d = 10^{\frac{161 + 147,55 - 20\log(865500000)}{20}} = 3091km$$

Donc théoriquement, notre système permet de recevoir des données jusqu'à 978km environ avec l'antenne monopole et 3091km avec l'antenne Yagi-Uda.

2.4.4 Effets de l'horizon et validation du critère

Donc théoriquement, le critère TEL 5 est validé, car notre portée maximale théorique est supérieure à 200km. Cependant, nous devons prendre en compte les effets de l'horizon. En effet, lorsque le ballon passera sous l'horizon lors de sa descente, nous avons de fortes chances de perdre son signal. Cependant ce problème est commun à tous les systèmes d'émission/réception radio. Il est donc important que notre portée maximale théorique comporte une marge importante comme dans notre cas afin de garantir la meilleure liaison possible. C'est également pour cette raison qu'une station de réception LoRa portable est à l'étude, afin de pouvoir éventuellement suivre le ballon lors de sa chute sans en perdre le signal.

3 Élaboration de la structure mécanique de la nacelle et de ses équipements propres

3.1 Structure de la nacelle

La structure de la nacelle doit être pensée pour accueillir les différents modules des expériences embarquées ainsi que tout le reste de ses équipements. De plus, elle doit permettre de valider un certain nombre d'exigences imposées par le cahier des charges.

3.1.1 Cahier des charges

Le cahier des charges du CNES et de Planète Sciences impose les critères suivants vis à vis de la nacelle (la notation utilisée est celle utilisée par le CNES et Planète Sciences, tous étant regroupés au sein de l'exigence 10.13 "Mécanique de la nacelle") :

- MEC 1 : La nacelle contenant l'expérience doit avoir une masse inférieure à 1,8 kg.
- MEC 2 : La surface de la base de la nacelle ne peut être inférieure à 625cm². La hauteur d'une nacelle ne peut être inférieure à 10 cm.
- MEC 3 : La masse surfacique maximum de la nacelle doit être inférieure à 13 g/cm².
- MEC 4 : Toute suspente ou câble extérieur à la nacelle doit pouvoir se rompre sous l'effet d'une force de traction de 230 N (environ 23 kg).
- MEC 5 : Les éléments de la chaîne de vol doivent être fabriqués en matériaux peu denses (polystyrène extrudé, carton fort, plastiques légers...).
- MEC 6 : Le contenu de la nacelle doit pouvoir être accessible, jusqu'au moment du lâcher.
- MEC 7 : La nacelle sera accrochée par une ligature type « paquet cadeau » avec de la cordelette résistante à au moins 20 kg.

De plus, nous nous sommes imposés d'autres contraintes mécaniques afin de rendre notre nacelle différente de ce que l'on peut trouver habituellement dans ce type de projet :

- 1. La nacelle sera de forme cylindrique
- 2. La fixation se fera via une corde centrale (remplaçant ainsi la ligature de type "paquet cadeau" de l'exigence MEC 7)
- 3. La nacelle devra comporter deux fenêtres afin de permettre la prise d'images : l'une donnant sur le sol et l'autre sur l'horizon
- 4. L'ensemble des différents modules doivent avoir un interrupteur déporté sur une des faces de la nacelle accompagné d'un témoin lumineux indiquant la position de celui-ci.
- 5. La nacelle doit permettre l'intégration de deux capteurs sur une des faces extérieures de la nacelle (Température et UV)
- 6. Le capteur de température extérieur doit être protégé des rayons UV du soleil lors du vol.

Toutes ces exigences ont donc du être prises en compte lors des phases de conception, détaillées dans la partie suivante. Pour la réalisation de la nacelle ainsi que pour satisfaire l'exigence MEC 5 nous avons choisi d'utiliser des plaques de polystyrène extrudé (PE) afin de garantir une bonne isolation thermique de l'intérieure de la nacelle, ainsi qu'une grande légèreté.

3.1.2 Conception et fabrication

Conception : La conception de la nacelle a été faite sur le logiciel de modélisation 3D Blender. Ce logiciel offre de nombreuses possibilités, notamment la réalisation d'un modèle 3D en taille réel, afin de prévoir l'intégration des différents composants à l'avance, mais également l'exportation de chaque pièce du modèle dans plusieurs formats afin de les découper au laser par exemple.

Corps de la nacelle : Plusieurs versions de cette nacelle ont été pensées en 3D au fil de l'évolution du projet, mais seule la version finale sera présentée ici. Celle-ci

est de forme cylindrique (exigence 1.) et se compose de 3 étages distincts, composés de différentes couches de PE de 20mm ou 30mm d'épaisseur suivant les besoins et remplissant des fonctions bien précises :

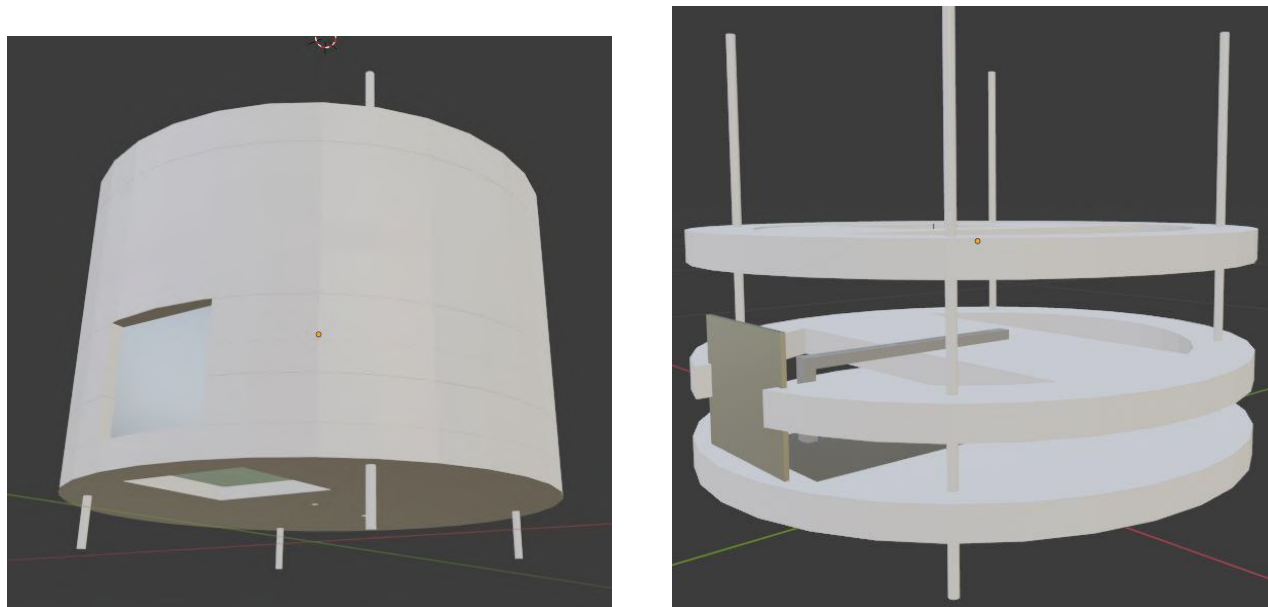


FIGURE 11 – Modèle 3D de la nacelle avec et sans les inter-étages

Voici une description de l'assemblage, de bas en haut :

- Le premier étage sert de support à l'antenne d'émission du module de télémétrie LoRa. Il comporte également une des fenêtres destinées à la prise d'images. Il se compose d'une couche de 20mm d'épaisseur de PE.
- L'inter-étage situé entre le 1er et le second étage est constitué d'une couche de PE de 30mm, percé d'un trou afin de permettre le placement d'une vitre de plexiglas de 80mm par 95mm.
- Le second étage comporte les deux expériences embarquées, placées côte à côte ainsi que la deuxième fenêtre (donnant sur l'horizon) permettant la prise d'images. Il se compose d'une couche de PE de 20mm.
- L'inter-étage situé entre le second et le troisième étage est constitué de deux couches de PE de 30mm dont le premier est percé d'un trou pour permettre la pose de la fenêtre.
- Le troisième et dernier étage comporte le système de repérage à LEDs, dont la conception est détaillée plus bas. Il se compose d'une couche de PE de 20mm d'épaisseur.
- Enfin, le dessus de la nacelle se compose de trois couches de PE de 30mm dont la dernière est un disque plein, qui permet de fermer la nacelle en son sommet.

La nacelle a un diamètre de 38cm pour une hauteur (hors antenne et hors tiges de fixation) de 24cm. Ainsi, l'exigence MEC 2 est validée, de même que l'exigence MEC 3 si l'on considère que MEC 1 est validé à la fin du projet.

Enfin un trou central permet à la corde de fixation (fournie par le CNES, donc conforme à MEC 5) de la traverser de part en part (exigence 2.).

Vitres : Sur cette nacelle se trouve deux vitres de 3mm d'épaisseur, qui permettent la prise d'images lors du vol (exigence 3.) :

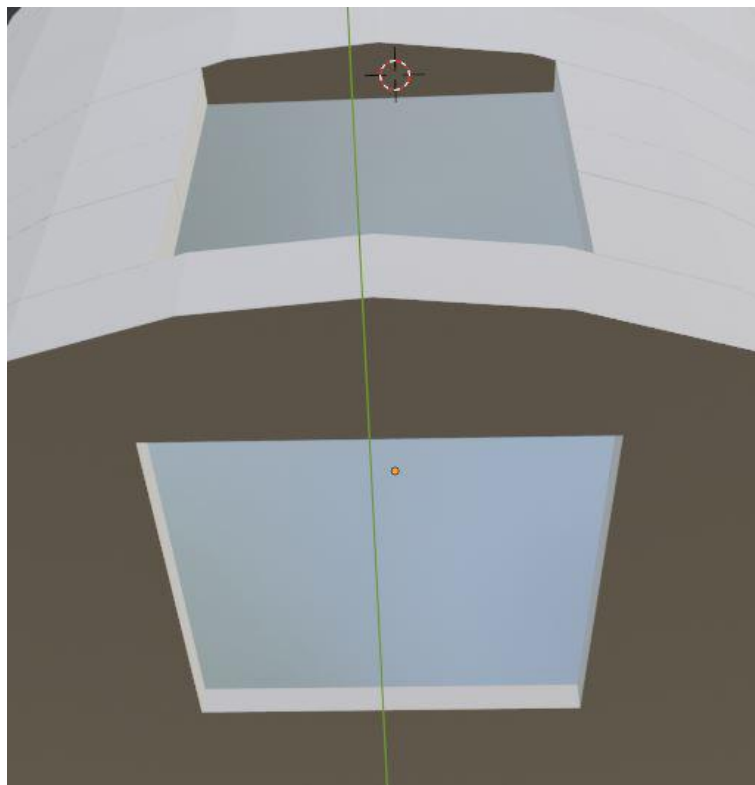


FIGURE 12 – Design et position des vitres sur Blender

La première, située sur le premier étage, mesure 12cm par 12cm. Elle donne sur une fenêtre de 10cm par 10cm découpée dans le premier étage.

La seconde vitre mesure 80mm par 95mm. Elle donne sur l'horizon est maintenue grâce à des encoches creusées dans les plaques de PE.

Enfin, chaque vitre a été dimensionnée pour permettre à une caméra de 116 ° d'angle de prendre des images sans que son cadrage soit gêné par la nacelle elle-même, et les deux fenêtres sont placées à proximité immédiate l'une de l'autre afin de les placer sur un unique support

Support de caméra : Notre nacelle doit comporter deux caméra placées perpendiculairement l'une par rapport à l'autre afin de capturer des images durant le vol. Afin de les maintenir en place dans la nacelle dans la position souhaitée, un support de caméra a été modélisé sur Blender :

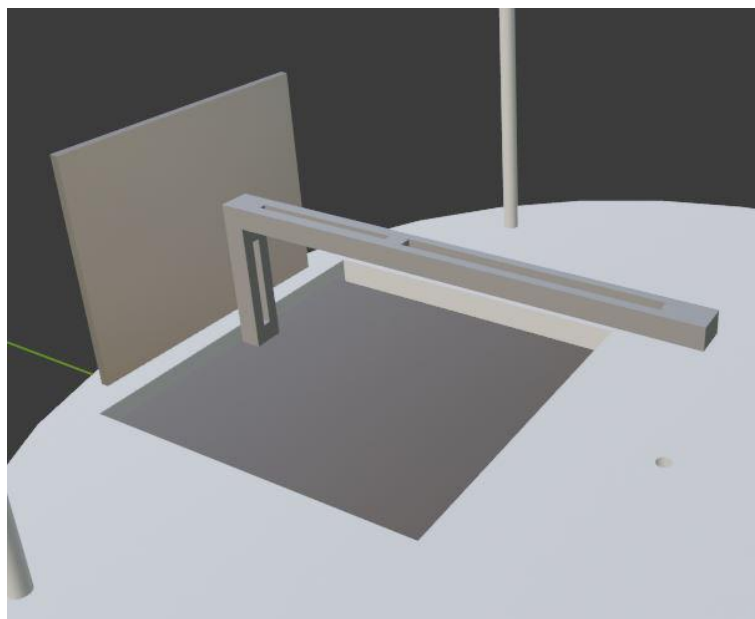


FIGURE 13 – support de caméra sur Blender

Cette pièce comprend trois glissières de 2,1mm de large qui permettent de régler la distance des caméras par rapport aux vitres afin de garantir un cadrage le plus judicieux possible et mesure 16cm par 5cm. Elle permet également de supporter les deux caméras en même temps.

Fabrication :

Corps de la nacelle et vitres : La majeure partie des pièces de la nacelle ont été découpées au laser afin de faire des découpes les plus précises possibles. Pour cela, la découpeuse laser du Fablab de l'ENSEIRB-MATMECA a été utilisée.

Afin d'obtenir un fichier lisible par la découpeuse laser, il faut exporter chaque pièce au format DXF depuis Blender. Si jamais le fichier est illisible (comme c'était le cas ici), il faut alors exporter la pièce au format OBJ, puis le convertir en fichier image, pour ensuite le vectoriser sur le logiciel InkScape. Ainsi, le fichier peut être enregistré au format SVG, lisible par la découpeuse laser, ou bien converti en fichier DXF.

Vitres : Les vitres ont également été découpées au laser. Une fois celles-ci découpées, il est important d'y percer un petit trou (environ 3mm de diamètre) dans l'un des coins afin de permettre l'équilibre des températures des deux côtés de la vitre et ainsi éviter tout problème de buée qui pourrait rendre les images inutilisables.



FIGURE 14 – Vitres découpées au laser

Support de caméra Le support de caméra a été fabriqué en matière plastique (PLA) grâce à une imprimante 3D, également située au FabLab de l'ENSEIRB-MATMECA. Cette technique a l'avantage de produire des pièces solides de la forme désirée tout en ayant une masse contenue. Pour ce faire, il est nécessaire d'exporter la pièce au format STL depuis Blender pour ensuite l'imprimer en 3D.

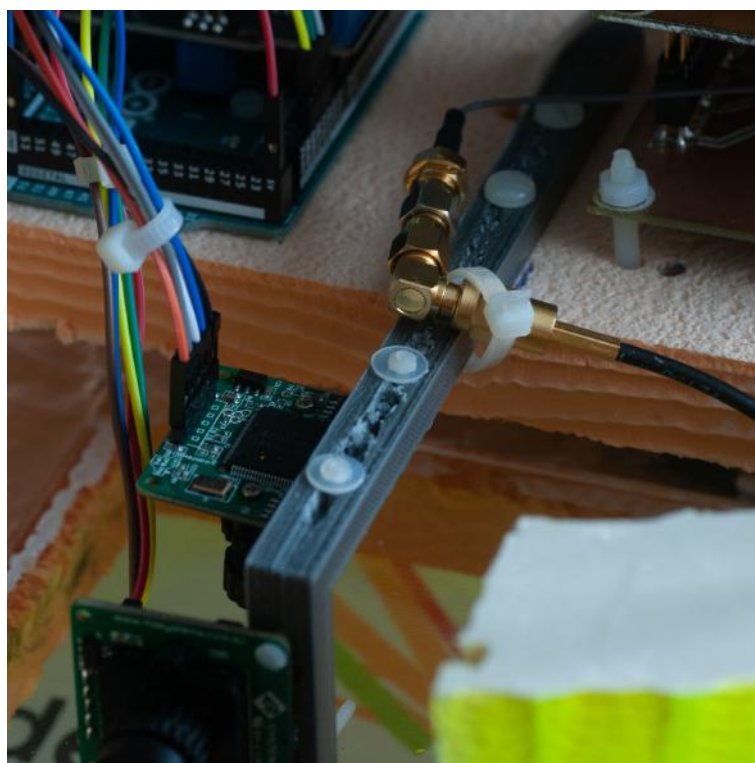


FIGURE 15 – Support de caméras imprimé en 3D

3.1.3 Tests

Les tests réalisés au niveau de la structure de la nacelle concernent principalement son isolation thermique. Le test consiste à placer un étage de la nacelle (fermé en haut et en bas) dans une enceinte thermique, et d'y faire varier la température de 25°C à -50°C environ, ce qui représente à peu près les contraintes thermiques que rencontrera la nacelle lors de son vol. Ainsi en mesurant la température à l'intérieur et à l'extérieur de la nacelle, les propriétés isolantes de celle-ci peuvent être mises en évidence. Un étage possédant une fenêtre vitrée ainsi qu'un étage sans fenêtre sont mis à l'essai, et Les résultats obtenus permettent de tracer les courbes suivantes :

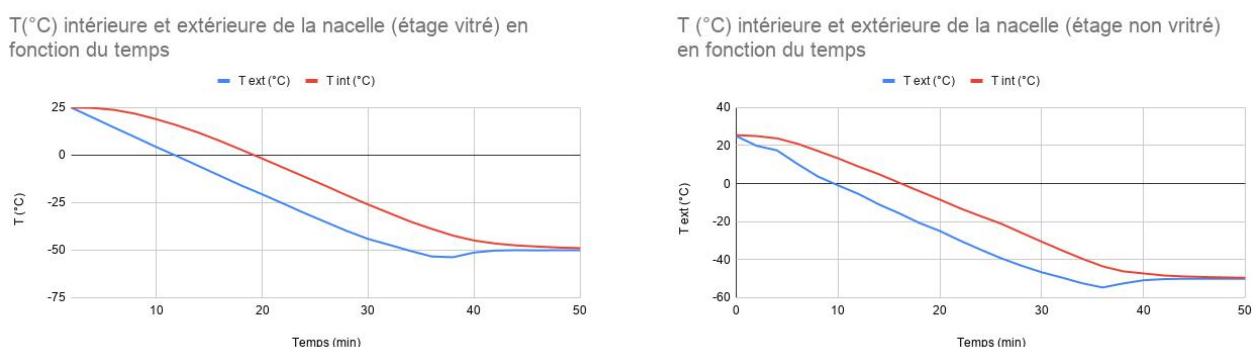


FIGURE 16 – Courbes de température obtenues avec et sans la fenêtre

Les résultats montrent une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de 10°C en moyenne pour l'étage sans fenêtre et de 11°C pour l'étage avec la fenêtre. Il semblerait donc que la présence ou non d'une fenêtre n'ait pas un impact majeur sur l'isolation thermique, voire que la vitre isole mieux thermiquement que le polystyrène seul.

Dans les deux cas, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur se stabilise autour de 17°C et est plutôt constante au cours du refroidissement. Cependant, lorsque la température extérieure se stabilise, il faut environ 10 minutes pour que l'équilibre thermique se produise.

Ces tests sont plutôt concluant, sachant que lors du vol réel, la nacelle ne subira des températures de -50°C que ponctuellement (au niveau d'un point appelé tropopause, situé entre la troposphère et la stratosphère) et n'y restera pas plus de quelques minutes. De plus, la nacelle en configuration de vol aura un volume plus important que la version de test, et donc une inertie thermique bien plus grande, ce qui contribuera à augmenter la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, de même que le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique. Enfin, l'électronique embarquée produisant également de l'énergie thermique, celle-ci pourra contribuer au réchauffement de l'air intérieur.

3.1.4 Intégration

Le processus d'intégration de la nacelle est réalisé par étage. En effet, une certaine indépendance entre les étages a été pensée au moment de la conception, afin de pouvoir intervenir de manière séparée sur chacun des étages sans risquer de créer des conflits au niveau du câblage par exemple. Le troisième étage est donc totalement indépendant du reste, tandis que le premier étage est relié au second uniquement par un câble SMA

permettant de relier l'antenne au module LoRa. Les deux pouvant être séparés rapidement si nécessaire. De plus, avant l'intégration, la nacelle a été poncée afin de retirer les irrégularités dans le découpage et peinte en jaune clair afin de la rendre plus visible

Liaisons mécaniques : Les liaisons mécaniques sont réalisées avec des boulons en nylon, afin d'être les plus légères possibles. Ainsi, le corps de la nacelle, composé de plaques de PE empilées les unes sur les autres, est maintenu grâce à quatre tiges en nylon de diamètre M6, boulonnées en haut avec des écrous papillon, et avec des écrous hexagonaux en bas. Sous le premier étage se trouve une pièce de plexiglas de 3mm d'épaisseur afin que la corde qui suspendra la nacelle soit maintenue grâce à un matériau moins friable que le PE. En effet, les efforts appliqués sur la corde risqueraient de la faire traverser le PE, ce qui doit être évité absolument. De même, cette pièce de plexiglas comprend des attaches permettant d'y fixer un petit drapeau.

Ensuite, les liaisons mécaniques entre les différents modules (sauf le module LoRa) et la nacelle seront réalisées avec des vis en nylon de 25mm de longueur et de diamètre M3 (d'où l'utilisation de plaques de PE de 20mm et non de 30mm au niveau des étages). Il est important de placer une rondelle de diamètre adapté entre l'écrou et le polystyrène afin de répartir les efforts mécaniques sur une plus grande surface et ainsi éviter que l'écrou ne traverse le PE en raison de sa grande friabilité. Pour le module LoRa, ce sont des vis M4 de 40mm de long qui ont été placées en raison de la masse plus importante du module.

Enfin, certains équipements, comme les boîtiers de piles sont maintenus grâce à du ruban adhésif double face : celui-ci permet de les repositionner facilement afin de placer le barycentre de la nacelle sur l'axe vertical.

Vitres : La vitre donnant sur le sol est fixée grâce à du joint silicone disposé sur le pourtour de la vitre. Un sillon d'1cm de large a été gravé au laser sur tout le tour de la fenêtre afin de faciliter l'insertion de la vitre. La vitre donnant sur l'horizon a simplement été glissée dans les encoches prévues à cet effet.

Module LoRa : Le module LoRa a le très grand avantage d'être monobloc, ce qui facilite son intégration et son câblage. Celui-ci se trouve donc au second étage mais son sommet culmine légèrement au dessus du troisième étage. En effet, un trou prévu à cet effet se trouve dans le troisième étage afin de pouvoir facilement accéder aux compartiments à piles (Exigence MEC6). Celui-ci est donc fixé à la nacelle grâce à quatre vis M4 de 40mm de long, comme précisé précédemment.

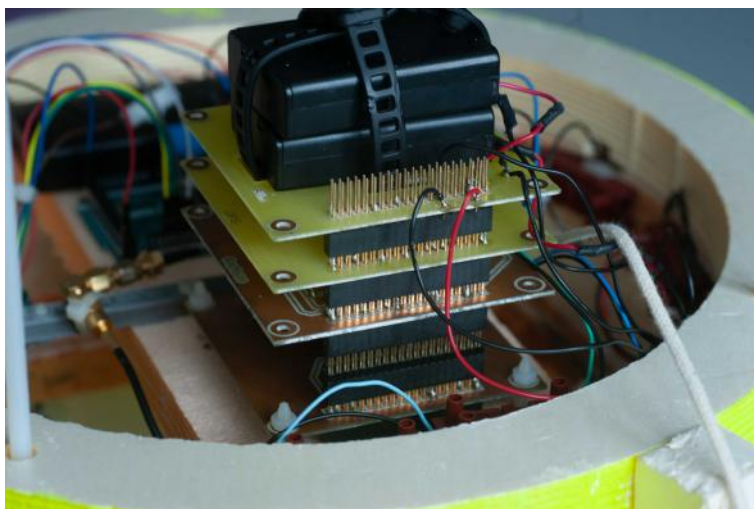


FIGURE 17 – Intégration du module LoRa

De plus, ce module possède deux capteurs extérieurs (Température et UV) qui doivent être placés sur l'une des faces extérieures de la nacelle (exigence 5.). Pour cela, les capteurs sont montés au bout de deux fils que l'on passe entre deux couches de polystyrène extrudé dans lesquelles un petit canal a été fraisé pour permettre le passage des fils. Les capteurs sont ensuite fixés à l'extérieur à l'aide de ruban adhésif double face. Le capteur de température est placé dans une petite cavité composée d'un petit cube creusé en PE de 3cm de côté afin de le protéger des UV (exigence 6.).

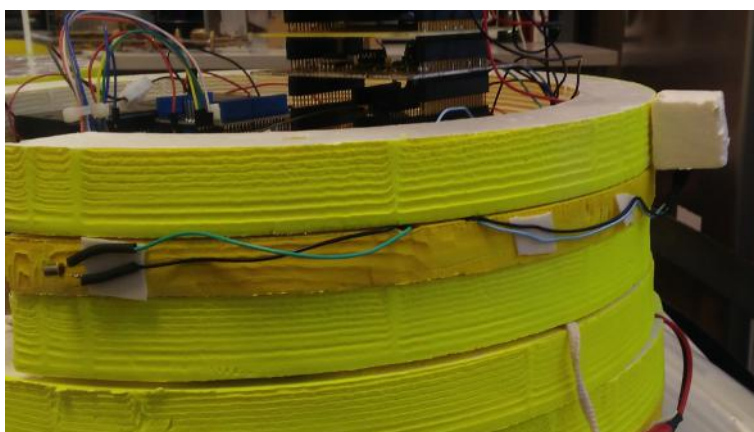


FIGURE 18 – Intégration des capteurs extérieurs

Les capteurs extérieurs (comme tous les éléments extérieurs de la nacelle) sont reliés au module par un connecteur permettant de séparer facilement le module du reste de la nacelle si une intervention est nécessaire sur celui-ci.

Enfin le module est relié à l'antenne via un câble SMA au bout duquel se trouve un connecteur SMA en angle droit, afin que le second étage ne fasse pas obstacle au câble, comme cela est le cas lorsque le câble SMA est relié directement au connecteur de l'antenne (voir partie dédiée à l'antenne).

Module caméra : Le système de prise d'images est composé d'une carte Arduino Méga surmontée d'un shield de carte SD, de deux caméras uCAM-III de 4D Systems et de deux

boîtiers de 3 piles AA chacun. L'ensemble prend place au second étage, aux côtés du module LoRa.

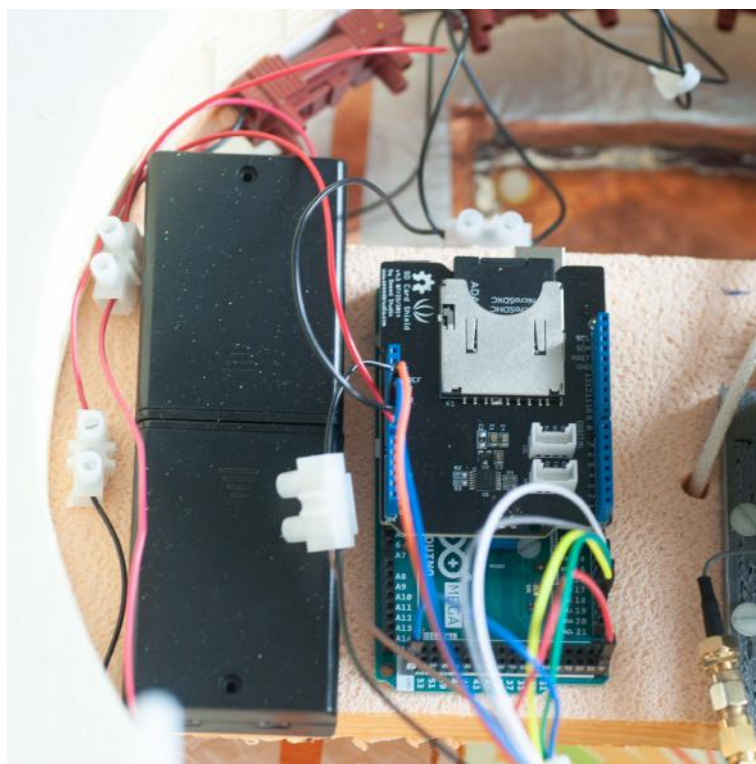


FIGURE 19 – Intégration du module Arduino pour la prise d'images

Caméras : Les caméras sont montées sur leur supports, de manière perpendiculaires, afin de prendre des images de l'horizon et du sol. La caméra pointant vers l'horizon est équipée d'un objectif grand angle, elle est donc au plus près de sa vitre pour éviter que la nacelle entre dans le cadre de l'image.

Le support de caméra est fixé à la nacelle grâce à deux vis M4 de 40mm de long, et les caméras sont montées sur le support grâce à deux vis M2 de 25mm de long chacune (elles ne sont fixées que d'un côté). Le support ainsi conçu, avec son système de glissière se montre d'une efficacité redoutable pour positionner les caméras comme souhaité, bien que l'impression 3D ait généré des "supports de ponts" assez difficiles à retirer :

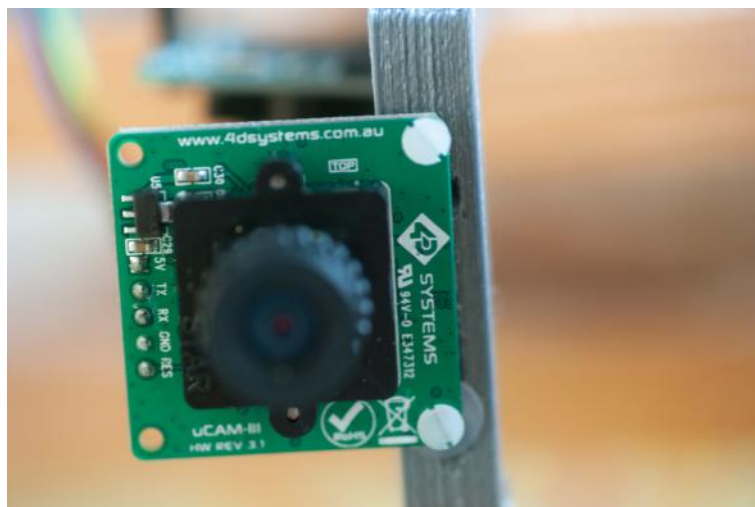


FIGURE 20 – Caméras montées sur leur support

Arduino et alimentations La carte Arduino quant à elle est fixée avec deux vis M3 de 25mm de long à la nacelle. Celle-ci doit être la plus éloignée du centre possible afin de garantir un accès facile au bouton "RESET", indispensable pour la mise en route du système. Les piles, doivent également être les plus éloignées du centre afin d'équilibrer les masses pour compenser le déséquilibre engendré par l'imposant module LoRa. Les boîtiers de piles sont fixés à l'aide de ruban adhésif double face.

Interrupteurs et témoins lumineux : Pour chaque module, un interrupteur ainsi qu'un témoin lumineux (composé d'un ruban de trois LEDs) sont déportés sur une des faces externes de la nacelle (exigence 4.). Pour ce faire, un trou est percé à la fraiseuse entre la couche du seconde étage et la couche de son inter-étage immédiatement située au dessus. Ainsi l'interrupteur (choisi de forme circulaire spécialement pour cela) loge dans le trou ainsi fraisé. Un peu de ruban adhésif double-face permet de maintenir l'interrupteur en place si besoin, de même que le témoin lumineux, dont les fils passent entre deux couches de PE, dans lesquelles un canal a été fraisé. L'interrupteur ainsi que le témoin lumineux sont reliés à leurs modules respectifs par un connecteur permettant d'extraire les modules facilement, sans avoir à tout démonter en cas de nécessité.

Ajout du drapeau : A la fin de l'intégration, un drapeau "ENSEIRB-MATMECA" a pu être ajouté sous la nacelle. Celui-ci est fixé sur les attaches prévues à cet effet sur la pièce de plexiglas servant à rigidifier la structure de la nacelle et maintenir la fixation de la corde en place. Le drapeau est fixé grâce à quatre colliers Rislan :

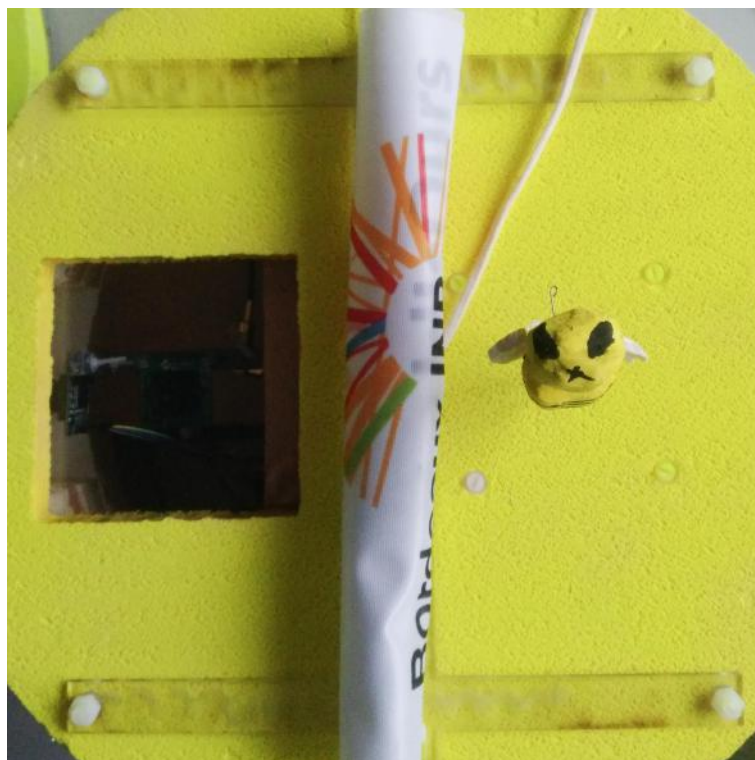


FIGURE 21 – Dessous de la nacelle avec le drapeau et la fixation en plexiglas

Aspect final Une fois assemblée, la nacelle se présente comme ceci :

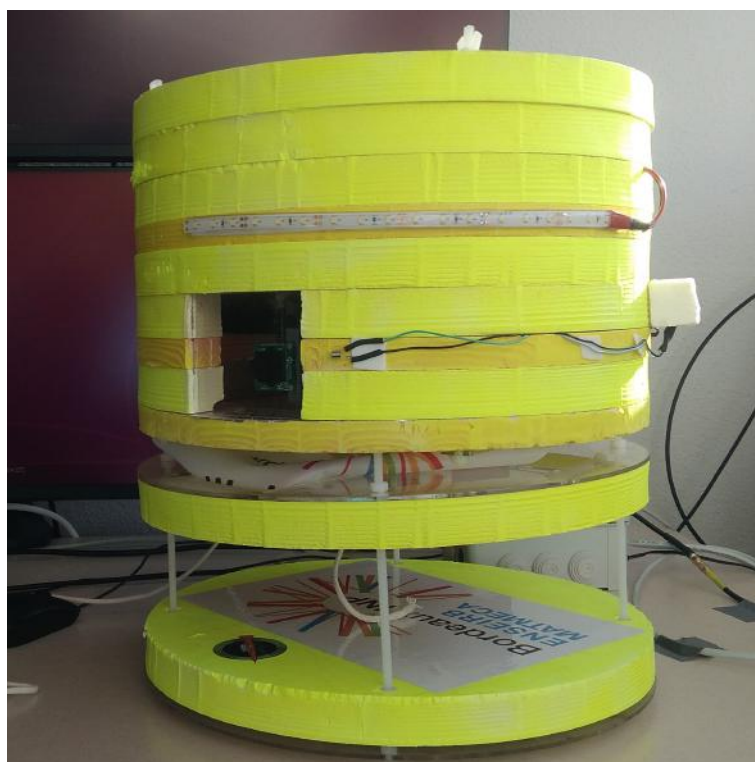


FIGURE 22 – Nacelle complète en configuration de vol

Un support a été spécialement conçu avec du surplus de matériel afin de pouvoir poser

la nacelle sans risquer d'abîmer l'antenne.

Bilan des masses : Au terme de l'intégration complète de la nacelle, c'est à dire une fois celle-ci en configuration de vol, sa masse totale est de 1740g, soit 60g en dessous de la limite maximale autorisée. L'exigence MEC 1 est donc validée.

3.1.5 Pistes d'améliorations

De nombreuses améliorations peuvent être réalisées sur la conception de la nacelle, notamment au niveau du bilan de masse. Par exemple, en concevant une nacelle de dimension minimale par rapport aux composants souhaités, de manière à optimiser le volume total de la nacelle pour ne pas avoir de poids mort. En effet, une grande partie du bilan de masse est occupée par la structure de la nacelle vide (environ 700g).

Ensuite, les connecteurs utilisés pour désolidariser les éléments extérieurs des modules auxquels ils appartiennent représentent environ 135g en tout. Un système présentant les mêmes fonctions tout en étant plus légers peut être trouvé.

3.2 Voyants lumineux

Notre nacelle est prévue pour être équipée, en plus des expériences embarquées, d'un système de LEDs clignotantes placées sur ses faces extérieures, afin de faciliter son repérage une fois celle-ci retombée à terre.

3.2.1 Cahier des charges

Pour la conception de ce système, nous nous sommes fixé les contraintes suivantes :

- 1. Le système de commande doit être compact et de faible masse ;
- 2. Les LEDs situées sur les faces extérieures doivent résister aux intempéries ;
- 3. Les LEDs situées sur les faces extérieures doivent clignoter en permanence afin d'attirer l'oeil plus facilement ;
- 4. L'autonomie du système doit être supérieure à 30h ;
- 5. La longueur totale couverte par les LEDs doit être supérieure ou égale à la moitié de la circonférence de la nacelle ;

Pour satisfaire l'exigence 1. nous avons opté pour une carte réalisée à partir de composants montés en surface, afin d'avoir un encombrement et une masse les plus faibles possibles.

Nous avons choisi des rubans de LEDs RS PRO possédant un indice de protection (IP) de 65 pour une longueur totale de 1m afin de satisfaire les exigences 2. et 5. Cependant afin de limiter la consommation du système tout en satisfaisant l'exigence 5. nous n'avons gardé que deux bandes de 30cm de LED chacune, pour un total de 60 cm disposés de part et d'autre de la nacelle.

L'exigence 3. sera satisfaite grâce à des timer NE555 de Texas Instruments.

Enfin, nous utiliserons 8 piles Energizer Ultimate Lithium 1,5V de 3Ah chacune afin de garantir une autonomie suffisante et donc l'exigence 4. Le calcul de l'autonomie sera détaillé plus loin dans la partie tests.

3.2.2 Conception et fabrication

Conception Pour la conception de ce module, les simulations de fonctionnement ont été réalisées sur le logiciel TINA de Texas Instruments, et le design sur KiCad.

Avant toute chose, il était primordial de déterminer la temporisation du timer NE555, et donc la valeur des composants utilisés. Dans le cas d'un NE555 monté en astable, comme c'est le cas ici, le schéma électrique est le suivant (les capacités de 10nF seront remplacées par des capacités de 1nF) :

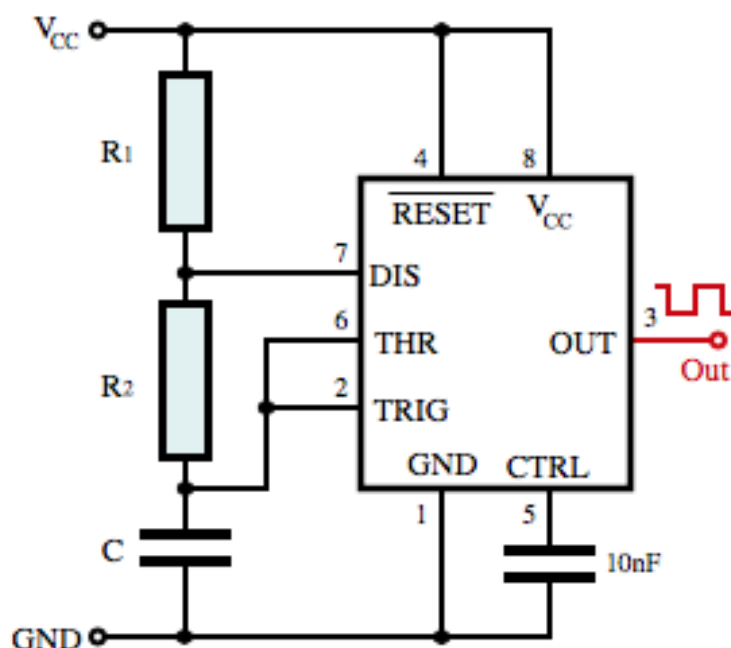


FIGURE 23 – Schéma du montage astable du NE555

Les différentes périodes de fonctionnement se calculent comme suit :

$$T_H = \ln(2) \times (R1 + R2) \times C1$$

$$T_L = \ln(2) \times R2 \times C1$$

Dans notre cas, nous cherchons à avoir environ $T_H = 1,5s$ et $T_L = 0,5s$. Nous avons donc retenues les valeurs suivantes :

- $R1 = 390k\Omega$
- $R2 = 220k\Omega$
- $C1 = 3,3\mu F$

Ce qui nous donne $T_H = 1,4s$ et $T_L = 0,5s$. Nous entrons alors ces valeurs dans TINA et obtenons le schéma global suivant :

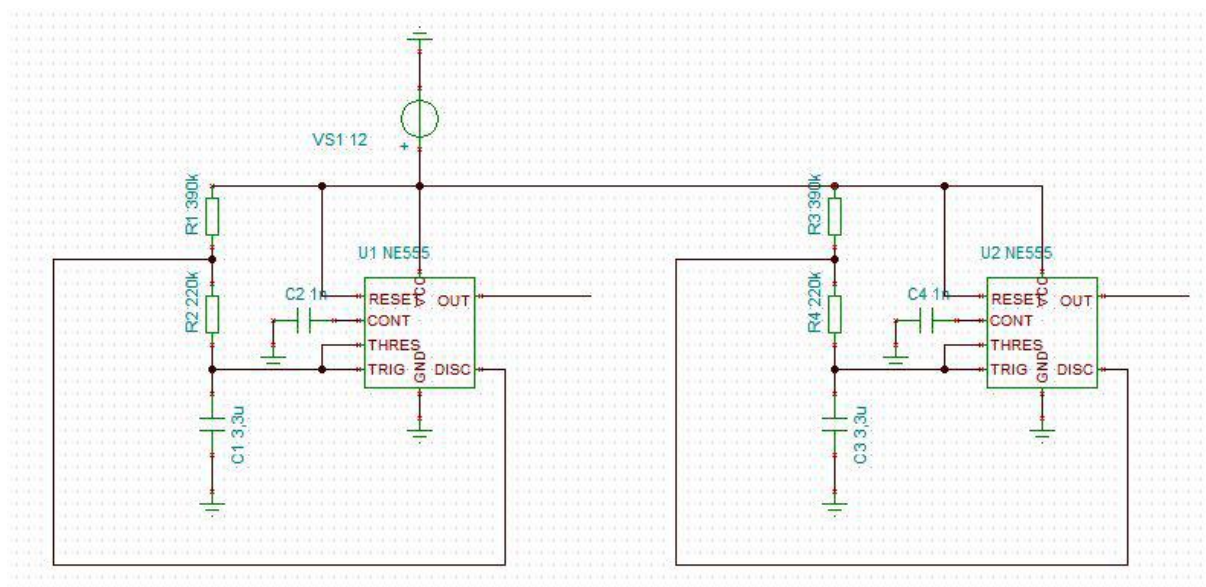


FIGURE 24 – Schéma du montage réalisé sur TINA

Notons que ce schéma présente deux NE555 montés en astable. En effet, la consommation de 30cm de ruban de LEDs s'élève environ à 120mA. Il n'est donc pas possible d'alimenter deux rubans de 30cm avec un seul circuit NE555 sachant que son courant de sortie maximal est d'environ 200mA.

Les résultats de simulation obtenus sont les suivants :

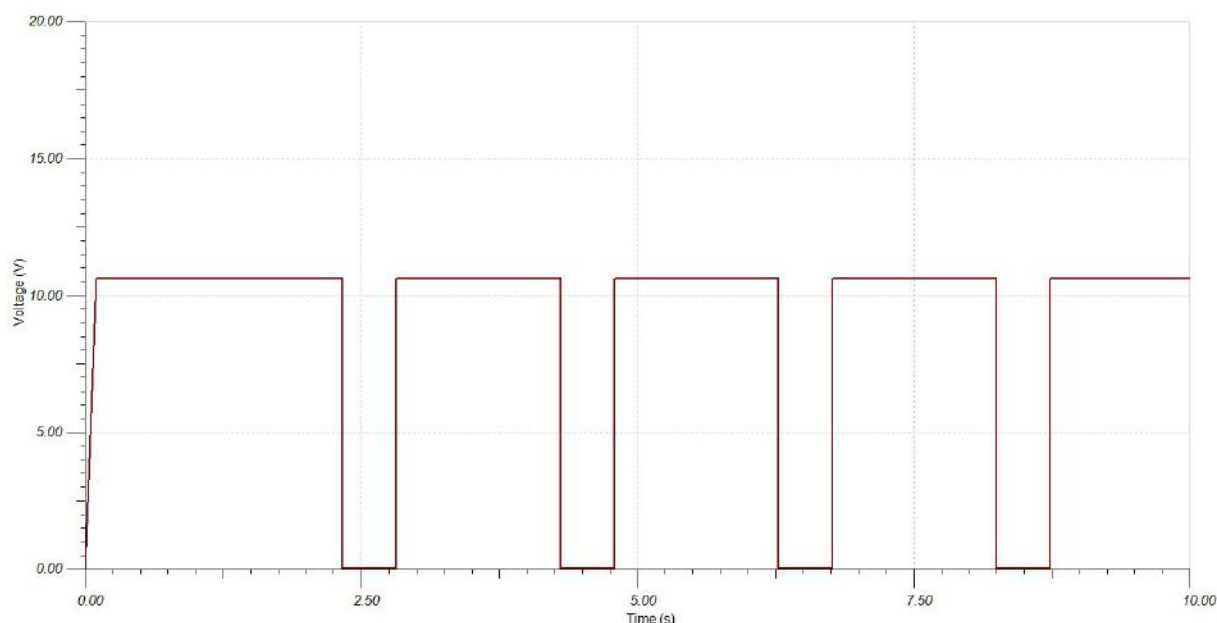


FIGURE 25 – Simulation du comportement de la sortie des NE555 astables

La simulation présente bien comme souhaité un temps haut T_H d'environ 1,4s (qui correspond à l'allumage des LEDs) et un temps bas T_L d'environ 0,5s (qui correspond à l'extinction des LEDs).

Le fonctionnement théorique du système étant validé, le design de la carte peut donc débuter.

Pour cela, les CMS utilisés auront une empreinte 1206, afin de faciliter leur soudure tout en gardant un encombrement modéré. Les pistes utilisées, quant à elles sont de taille 12 mils pour celles issues des circuits intégrés, et de 50 mils sinon. Les vias sont de diamètre 3mm/1mm. Le design final ainsi obtenu est le suivant :

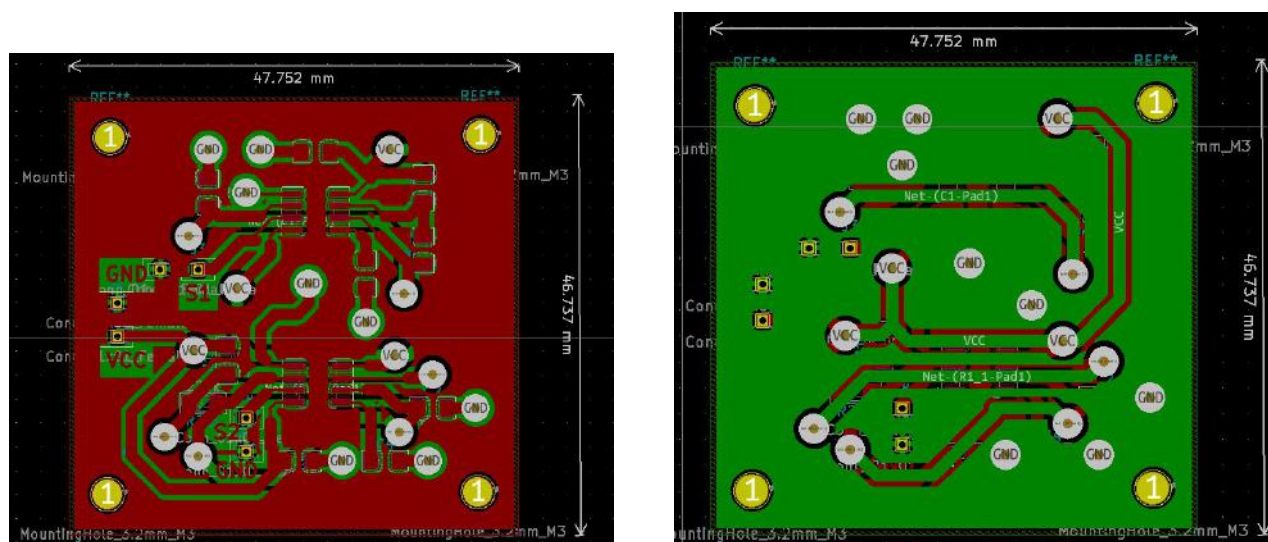


FIGURE 26 – PCB top et bottom de la carte de commande des LEDs sur KiCad

Fabrication Il ne reste plus qu'à envoyer la carte en production. Pour cela il suffit de fournir les fichiers "Edge.cuts", "F.Cu", "B.Cu" et le fichier de perçage. La soudure de la carte a été réalisée à l'aide de pâte à braser et du dispositif "Pick And Place" disponible au laboratoire IMS. La finalisation de la soudure s'est réalisée grâce à un four spécialement conçu pour cela. Il faut noter que les vias doivent être soudés après le reste des composants, et à la main.

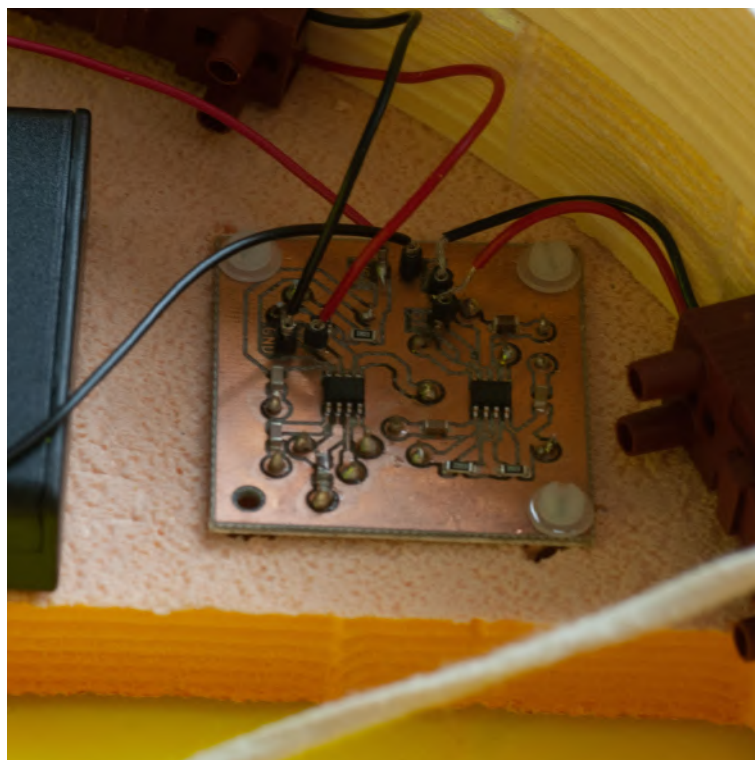


FIGURE 27 – Carte de commande des LEDs finale

3.2.3 Tests

Tests de fonctionnement : La série de tests réalisée sur la carte a révélé quelques défauts de soudure au niveau des vias, ainsi qu'un NE555 défectueux. Les vias sont facilement rectifiables, mais le NE555 devant être changé doit être dessoudé et ressoudé à l'air chaud. En effet, un fer classique ne permet pas une telle opération.

Tests de consommation : Une fois la carte fonctionnelle, un test de consommation a pu être réalisé. L'ensemble du dispositif consomme environ 55mA lorsqu'il est alimenté sous 12V et à température ambiante, soit beaucoup moins que prévu. Ceci est une bonne nouvelle pour l'autonomie du système qui doit être maximale, d'autant que cette consommation est effective uniquement lorsque les LEDs sont allumées, soit seulement 3/4 du temps. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la tension en sortie du NE555 n'est pas exactement égale à la tension d'alimentation, ce qui se traduit par une diminution de l'éclairement des LEDs, mais également une baisse de consommation. Ainsi, avec une telle consommation, les piles de 3Ah utilisées sont capables d'alimenter le système durant une période $T = \frac{3}{0,055} = 54,5h$. Sachant que cette consommation n'est effective que 3/4 du temps, l'alimentation peut en théorie faire fonctionner le système pendant une période $T = \frac{4}{3} \times 54,5 = 72,6h$, ce qui valide l'exigence 4.

Tests thermiques : Bien que la fonction de ce module soit primordiale une fois l'atterrissage effectué, il est important de s'assurer que les températures extrêmes rencontrées en haute altitude ne causent pas de dégâts irréversibles au système, ce qui pourrait compromettre son bon fonctionnement une fois de retour sur la terre ferme.

Pour cela, le système a été placé en enceinte thermique durant environ 1h30, afin d'éprouver le système en conditions réelles. C'est pourquoi le système a été placé dans une nacelle constituée des mêmes matériaux que la nacelle finale afin de conserver une certaine isolation thermique.

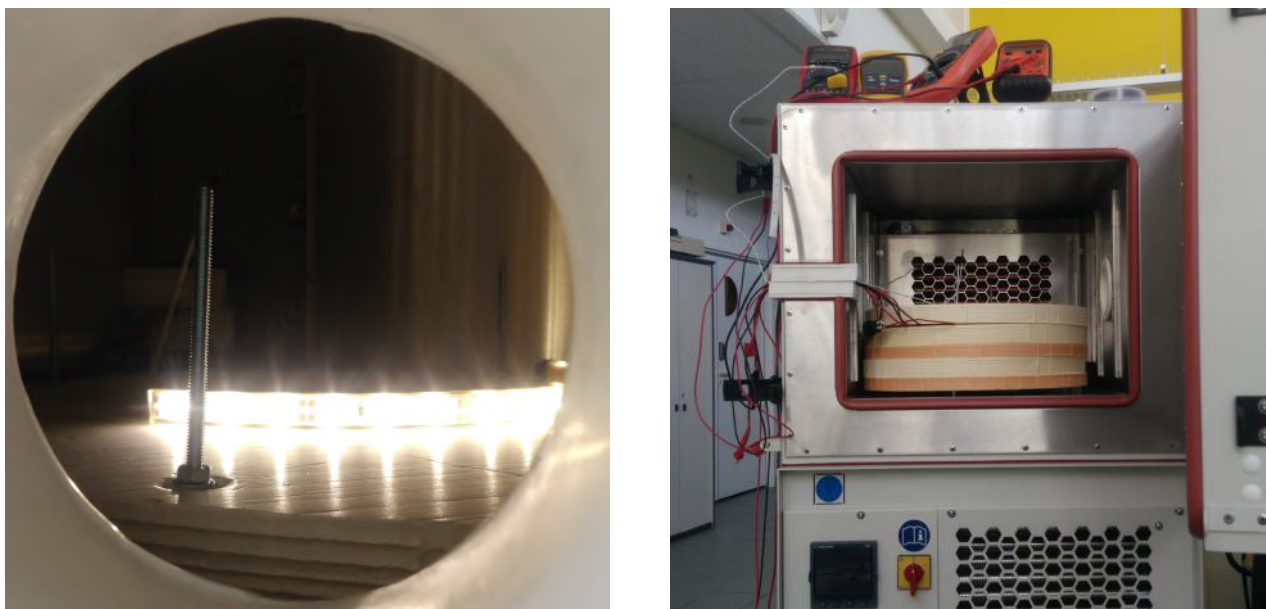


FIGURE 28 – Essais en enceinte thermique du système LEDs

Le protocole expérimental prévoyait un cycle thermique à faire subir au système qui avait l'allure suivante :

Profil de température de l'expérience

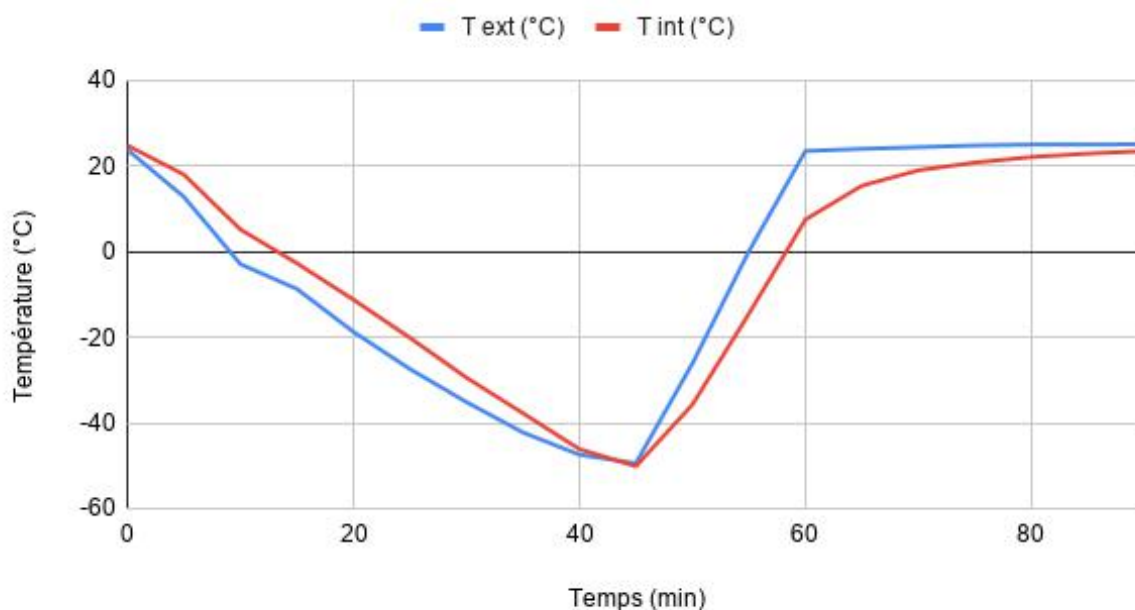


FIGURE 29 – Profil de température des essais thermiques du système LED

Durant la totalité de l'expérience, la tension et le courant délivrés par l'alimentation sont relevés afin d'observer l'effet de la température sur ces grandeurs :

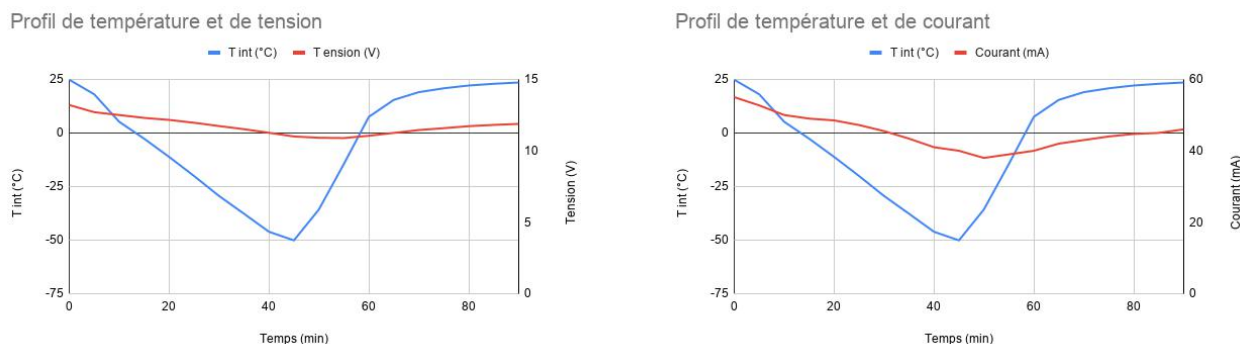


FIGURE 30 – Profil de tension et de courant du système LED lors de l'expérience et suivant la température

Au moment le plus critique de l'expérience, la chute de tension d'alimentation est de 2,31V mais surtout le système continue de fonctionner correctement. De même, une fois la température de l'enceinte revenue à une température de 25 °C environ, cette chute n'est plus que de 1,32V. Il est important d'observer qu'à ce moment précis, les piles sont encore recouvertes de condensation et sont donc encore très froides. Une fois que les piles sont revenues à température ambiante, leur tension à vide se retrouve de nouveau très proche de la tension nominale attendue. De ce fait, aucun dégât irréversible n'est à observer sur l'ensemble du système. Ce test est donc validé.

Tests à vide : La pression en haute altitude est extrêmement basse. La nacelle n'étant pas pressurisée, il est important de prendre en compte l'effet de ce paramètre sur l'électronique embarquée. En effet, l'absence d'air en quantité suffisante provoque une baisse d'efficacité significative du refroidissement par air qui s'opère naturellement à pression ambiante. Donc pour prévenir tout risque de surchauffe, des tests à vide sont réalisés pour éprouver le système. En général il suffit de réaliser cette expérience durant 15 minutes environ à une pression quasiment nulle afin que la température de fonctionnement des composants se stabilise autour d'une valeur, permettant ainsi de révéler des quelconques anomalies qui pourraient survenir.

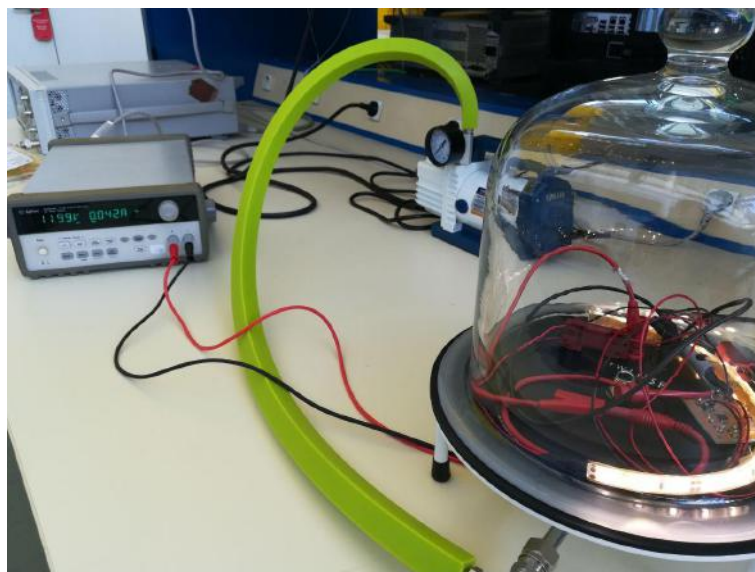


FIGURE 31 – Essais à vide du système LED

Au bout de 15 minutes passées dans une cloche à vide, le système continue de fonctionner de manière nominale et aucun problème de surchauffe n'est à déplorer. Ce test est donc également validé.

3.2.4 Intégration

La batterie de tests subie par le système n'ayant révélé aucune anomalie de fonctionnement, celui-ci est donc prêt à être intégré dans la nacelle.

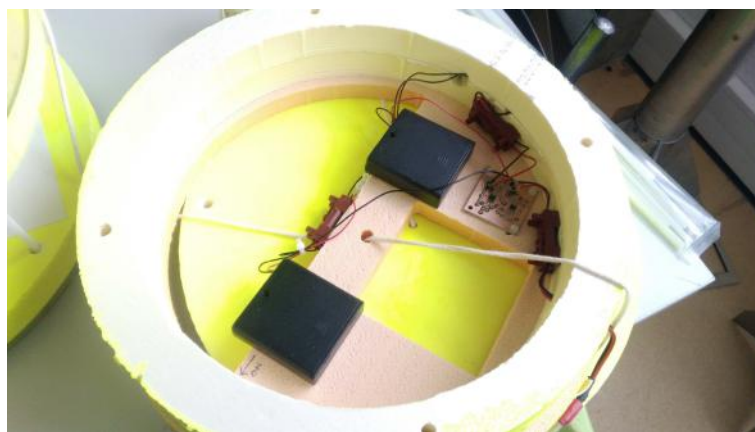


FIGURE 32 – Intégration du système LED dans la nacelle

Celui-ci est donc intégré sur le troisième étage de la nacelle. La position des compartiments de pile permet d'équilibrer les masses de sorte que la nacelle ne souffre pas d'un déséquilibre trop important. Ceux-ci sont fixés à la nacelle grâce à du ruban adhésif double face. De plus, la référence utilisée pour les compartiments comportent des interrupteurs individuels. Il est important de les placer en position "on", de mettre un repère quelconque pour s'assurer que l'interrupteur est en position "on" au toucher et de ne plus changer la position de l'interrupteur ensuite.

Les rubans de LEDs, quant à eux, sont placés de part et d'autres de la nacelle afin d'être visibles quelque soit la rotation de la nacelle. Ils sont fixés grâce à du ruban adhésif double face, et leurs fils sont acheminés vers l'extérieur entre deux couches de PE, dans lesquels a été fraisé un canal.

Un interrupteur déporté a également été placé sur une des faces extérieures de la nacelle, de la même manière que pour les modules de caméra et LoRa. De même, les deux rubans de LEDs ainsi que l'interrupteur sont reliés au module par un connecteur.

La carte de commande est boulonnée au troisième étage de la nacelle par trois vis M3 de 25mm de long.

3.2.5 Pistes d'améliorations

Une des principales améliorations qui pourraient être faites sur ce système consiste à réduire le duty-cycle du système afin que la période durant laquelle les LEDs sont allumées soit plus réduite. Ainsi, l'autonomie du système pourrait facilement être augmentée. De même un système de détection du jour et de la nuit qui permet d'allumer les LEDs seulement la nuit pourrait contribuer à augmenter cette autonomie, sans pour autant perdre en efficacité.

4 Étude du comportement des alimentations en basse température

Lors du vol, le ballon sera soumis à des températures pouvant atteindre -50°C à l'extérieur. Il faut donc s'assurer que les alimentations sont capables de fournir une tension et un courant suffisants à de telles températures.

4.1 Protocole expérimental

Afin de réaliser ce test, une résistance de 5Ω est placée aux bornes de 2 piles AA de 1,5V. Le tout est placé en enceinte thermique, dont le profil de température varie comme suit :

Profil de température

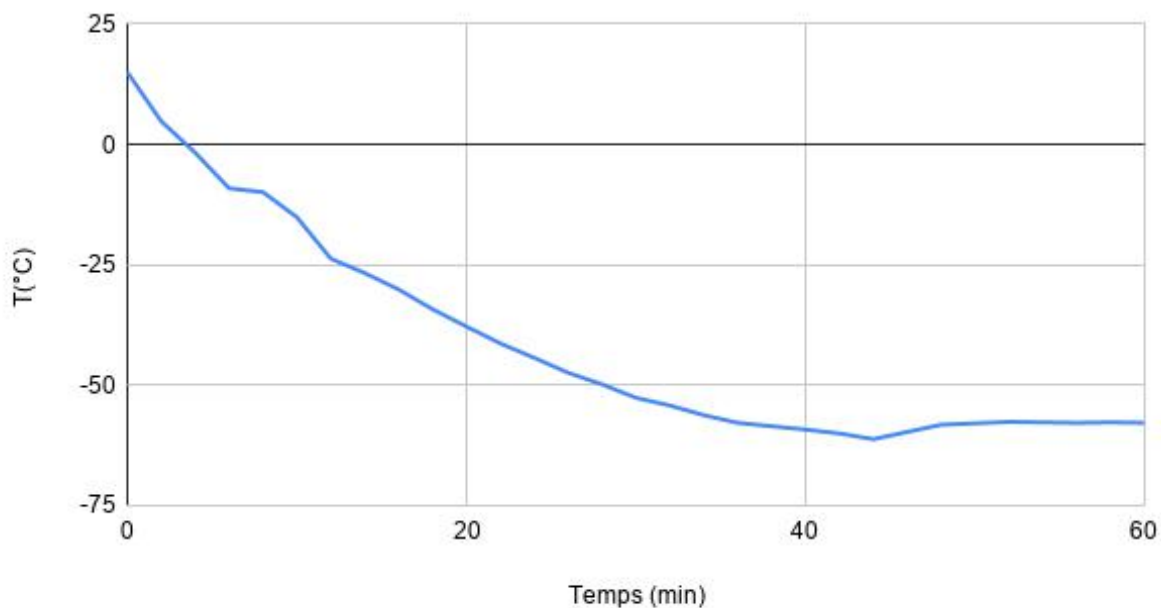


FIGURE 33 – Profil de température subi par les alimentations au cours de l'expérience

La température, le courant et la tension sont relevés tout au long de l'expérience qui dure en tout une heure.

4.2 Résultats

La tension aux bornes des piles varie en fonction de la température suivant la courbe suivante :

Profil de température et de tension

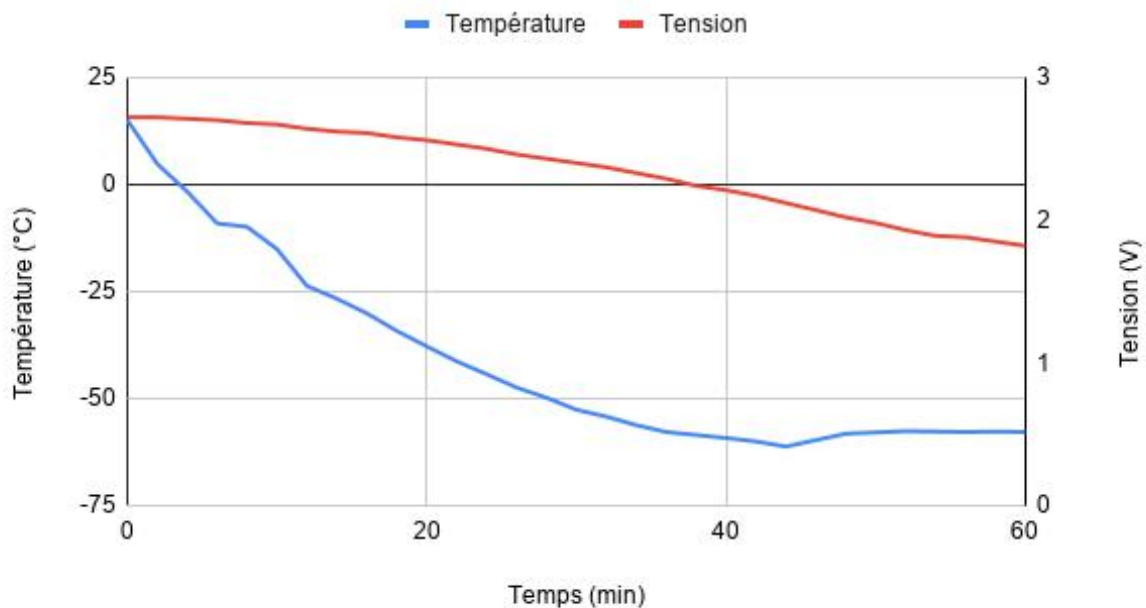


FIGURE 34 – Variation de la tension aux bornes des piles au cours de l'expérience et selon la température

Au moment le plus critique de l'expérience, la tension aux bornes des piles est de 1,82V, soit lorsque la température est de -58 °C. Cela représente une chute de tension de 0,45V par pile par rapport à une température de 15 °C. Ainsi, une estimation peut être faite concernant la chute de tension des blocs de 6 piles qui seront utilisés dans le ballon. En effet, en considérant une tension à vide de 9V et une chute de 0,45V par pile, cela donne une tension de $9 - 0,45 \times 6 = 6,3V$.

Sachant que les systèmes embarqués dans le ballon fonctionnent sous 5V, cette tension reste suffisante pour alimenter l'ensemble des systèmes, bien que la température utilisée au cours de l'expérience est largement inférieure à ce que subiront réellement les systèmes embarqués au cours du vol.

Le courant, quand à lui varie suivant cette courbe :

Profil de température et de Courant

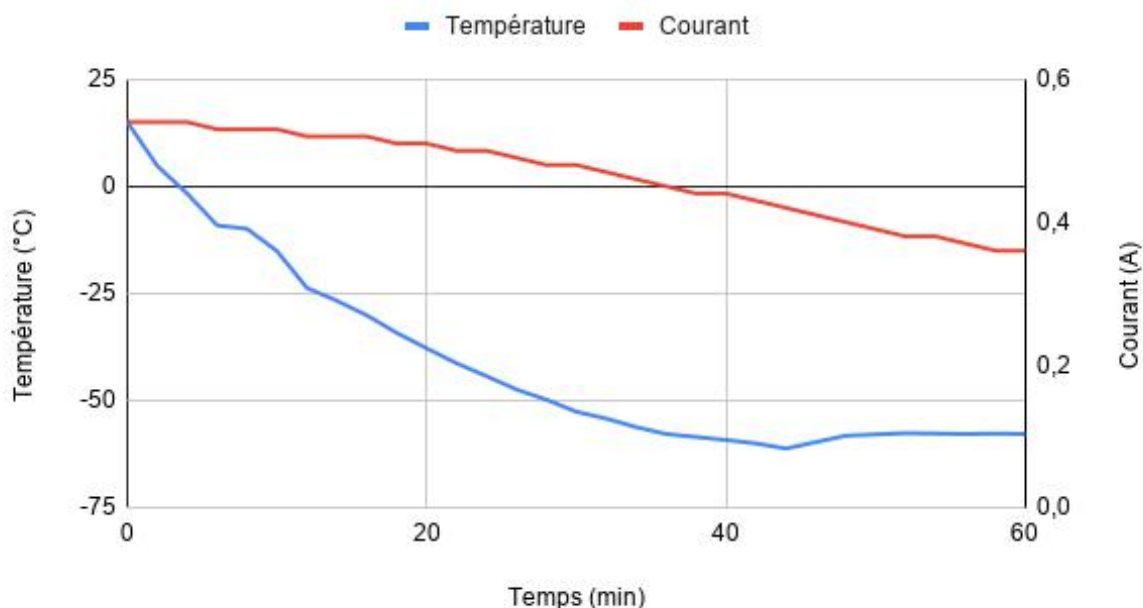


FIGURE 35 – variation du courant fourni par les alimentation au cours de l'expérience et selon la température

Quelque soit la température, les piles sont donc capables de fournir un courant d'au moins 360mA. Cette valeur est largement suffisante sachant que le module nécessitant le plus de courant consomme environ 220mA au maximum.

Cette expérience prouve donc que les piles utilisées sont tout à fait capable de supporter des températures allant jusqu'à -58 °C tout en garantissant un apport en énergie électrique suffisant pour alimenter les différents systèmes.

5 Suivi du projet et validation du cahier des charges

Ce projet s'est étalé sur près d'une année complète, avec des périodes d'activité et d'inactivité en raison du coronavirus, et a été pris en charge par plusieurs équipes successives. C'est pourquoi il était important d'assurer un suivi constant et précis durant toute la durée du projet, afin de s'assurer de son aboutissement, de la bonne préparation de l'équipe en vue du jour J et du respect du cahier des charges imposé par le CNES et Planète Sciences.

5.1 Établissement des procédures de vol et suivi de l'avancement des tâches

5.1.1 Procédures de vol

Afin de s'assurer que tout sera prêt le jour du lâché en terme d'organisation de l'équipe, des procédures de vol qui regroupent toutes les actions à mener dans les heures qui pré-

cèdent et suivent le lâché ont été établies. Ces procédures évolueront de façon permanente jusqu'au jour du lâché.

Pour ce faire, l'outil en ligne "Trello" a été utilisé. En effet il permet un suivi et une évolutivité importante des tâches à réaliser :

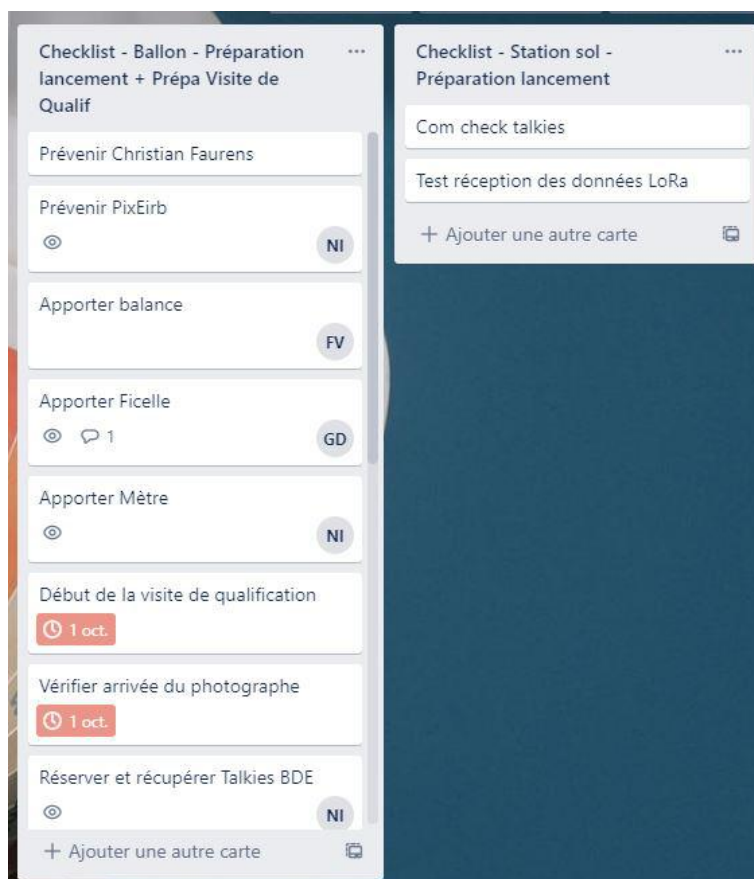


FIGURE 36 – Procédures de vol sur Trello

A partir de ce tableau, un planning détaillé du jour du lâché a pu être rédigé sous forme de tableur. Le lien du planning se trouve en annexe.

Ce planning sera complété au fur et à mesure jusqu'au jour du lâché, prévu actuellement dans le courant du mois de novembre 2020.

5.1.2 Avancement des tâches

De même, les différentes tâches et vérifications critiques qui doivent être faites avant le décollage sont regroupées au sein de ce même tableau Trello :

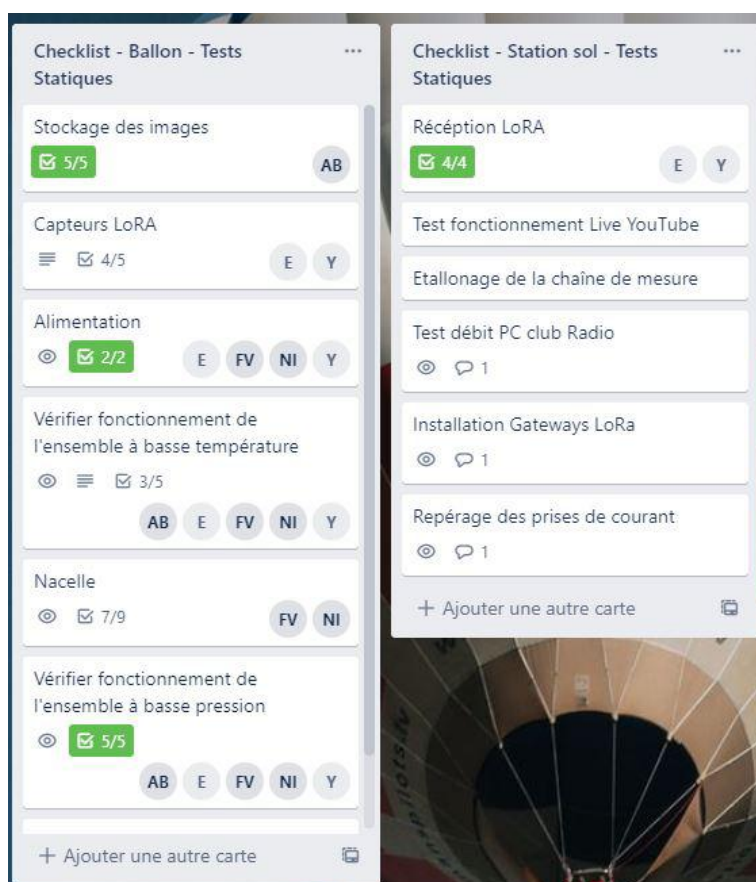


FIGURE 37 – Tâches à réaliser avant le jour du lâché

La chronologie des tâches et le planning des tâches sont regroupés sous forme de tableurs, dont les liens se trouvent en annexe.

5.2 Suivi de l'avancement du projet vis à vis des exigences du cahier des charges

Le CNES et Planète Sciences impose un cahier des charges pour tous les projets de ballons expérimentaux. Ce cahier des charges est régulièrement mis à jour et le lien de la version utilisée ici se trouve en annexe.

Une fois encore, l'outil "Trello" a été utilisé afin de regrouper toutes les exigences applicables au projet et d'assurer leur suivi tout au long de la conception de la nacelle. De plus cet outil permet également de regrouper et valider ou non les exigences imposées par l'équipe du projet en plus de celles du cahier des charges du CNES et Planète Sciences :

Checklist - Visite de qualification

Détails de validation

Compte rendu pour Planète Sciences

Détermination et qualification du site de lâcher

0/5

Autorisations administratives

17 août 8/8

10.1. DEFINITION DE L'EXPERIENCE

6/9

AB E FV NI Y

10.2. EXPERIENCES EMBARQUEES

13/13

FV NI

10.8. LA CHAINE DE MESURE, UTILISATION D'UN AUTRE STANDARD DE TELEMESURE

12/12

E Y

+ Ajouter une autre carte

FIGURE 38 – Exigences à valider pour être conforme au cahier des charges

De plus, les exigences applicables et non applicables ont été regroupées sous forme de tableur afin de suivre l'évolution de la validation des critères et démontrer leur validation. Le lien vers le tableur se trouve en annexe.

Enfin, des réunions ont régulièrement été organisées entre les membres de l'équipe du projet ou avec l'aérotechnicien en charge du suivi du projet, afin de faire un point sur l'évolution du projet et sur la conformité de la nacelle.

6 Le vol du ballon

Actuellement le vol du ballon est prévu dans le courant du mois de novembre 2020. D'après les prédictions, le vol doit durer environ 3h depuis le décollage jusqu'à l'atterrissage.

Le vol sera retransmis en direct sur la chaîne YouTube de l'ENSEIRB-MATMECA, avec retransmission en direct des données des capteurs et de la position du ballon, le tout étant possible grâce à trois scripts Python. De plus, plusieurs caméras seront placées à des endroits clés afin de suivre et direct le décollage.

Plus de détails seront donnés lors de la soutenance du stage, qui aura lieu après le vol pour cette raison.

7 Conclusion

Ce projet, qui aura duré près d'une année complète touche bientôt à sa fin. Son déroulement n'était pas linéaire car il a été très fortement perturbé par la crise sanitaire. En effet, initialement, le lâché du ballon était censé se dérouler le 16 avril 2020, à l'occasion des 100 ans de l'ENSEIRB-MATMECA. Cependant, travailler sur ce projet a été pour moi une expérience formidable, et ces difficultés n'ont fait qu'augmenter le challenge qu'il représente. A ce jour, l'équipe du projet est parvenue à mettre au point une nacelle opérationnelle et quasiment prête à décoller. Grâce à ce stage, j'ai pu découvrir et travailler au sein du laboratoire IMS, et avoir la chance de mener un projet ambitieux en équipe du début à la fin. J'ai ainsi pu améliorer mes compétences en radio-fréquence et en électronique générale, mais également en gestion de projet. J'ai également pu découvrir de nouvelles disciplines telles que la modélisation 3D, qui m'étaient alors inconnues.

C'est entre autre cette pluridisciplinarité, entre les compétences acquises durant mon cursus à l'ENSEIRB-MATMECA et les nouvelles compétences qui m'ont fait grandement apprécier ce stage, qui s'est montré extrêmement varié au niveau des tâches à réaliser. Je regrette cependant que le cahier des charges initialement retenu avant la crise sanitaire n'ait pas pu être conservé par la suite, notamment concernant la retransmission en direct des images prises durant le vol, bien que cela n'enlève en rien à la dimension extrêmement ambitieuse du projet, et je suis persuadé que cela verra le jour très bientôt lors d'un projet similaire.

Ce stage est donc pour moi une très bonne expérience, et je remercie encore une fois Monsieur Anthony GHIOTTO, mon maître de stage, pour m'avoir fait confiance du début jusqu'à la fin pour travailler sur ce projet. Celui-ci n'est pas encore tout à fait terminé, mais de mon côté le travail se poursuit avec toujours autant de passion jusqu'au jour du lâché.

8 Message aux futures équipes

Ce message s'adresse aux futures équipes en charge du ou des prochains ballon-sondes qui seront lâchés à l'ENSEIRB-MATEMCA.

J'espère que vous prendrez autant de plaisir que moi à la réalisation de ce projet. En effet, ce projet particulièrement ambitieux a été une réelle chance pour moi, et il n'a eu de cesse de me passionner malgré tout le travail que cela implique. Ce rapport vous est également destiné et j'ai essayé de transmettre par écrit toutes les connaissances et difficultés que j'ai pu rencontrer durant la conception du projet afin de vous aiguiller au mieux dans vos choix techniques.

Cependant, n'ayez pas peur d'avoir des idées ambitieuses pour autant, n'hésitez pas à tenter des choses mêmes si celles-ci vous paraissent irréalisables. Il existe forcément une solution à tous les problèmes que vous pourriez rencontrer au sein du projet, seules votre imagination et votre ambition sont la limite alors profitez-en au maximum.

C'est pourquoi dans la partie suivante je vous propose quelques idées qui pourraient être intégrées dans un projet similaire.

8.1 Idées d'évolutions du projet

Voici une liste non exhaustive d'idées et de conseils qui pourraient prendre place au sein d'un projet ballon similaire :

- Une prise de photos de meilleure résolution.
- Une prise de vidéo en caméra embarquée durant tout le vol.
- Une transmission en direct des photos ou vidéos prises durant le vol.
- L'ajout d'un avertisseur sonore pour retrouver la nacelle plus facilement après l'atterrissage (attention aux normes concernant le niveau sonore!).
- Détecteur d'éclatement du ballon.
- Détecteur de déploiement du parachute.
- Ajouter d'autres capteurs sur le module LoRa.
- Augmenter la cadence d'émission des données capteurs (Attention à la réglementation concernant l'utilisation de la bande).

Cependant, il faudra veiller à rester conforme au cahier des charges, notamment vis à vis de la masse maximale. Pour cela vous pouvez :

- Utiliser des piles AAA au lieu de AA (attention à l'autonomie cependant).
- Remplacer les connecteurs pour les équipements extérieurs par quelque chose de plus léger.
- Optimiser au maximum le volume de la nacelle afin d'embarquer un minimum de poids mort.
- réduire l'épaisseur des parois de la nacelle (attention à la résistance mécanique)
- Utiliser des cartes plus fines et plus petites pour le module LoRa par exemple.

9 Annexes

9.1 Nomenclatures

9.1.1 Amplificateur faible bruit

Composant	Quantité	Référence	Fabricant	Lien
PHA-13LN+	1	PHA-13LN+	Mini-Circuits	Lien
Régulateur 5V	1	MCP1703AT-5002E/MB	Microchip	Lien
Condensateur 1,5pF	1	GRM1555C1H1R5CA01D	Murata	Lien
Condensateur 2,2uF	2	GRM188R61C225KAADJ	Murata	Lien
Condensateur 0,1uF	1	GRM155R71C104KA88D	Murata	Lien
Condensateur 1000pF	2	GRM1555C1H102JA01D	Murata	Lien
Condensateur 10uF	1	GRM21BR61C106KE15K	Murata	Lien
Inductance 15uH	1	LQH32DN150K53L	Murata	Lien
Inductance 5,1nH	1	0603CS-5N1XJLU	Coilcraft	Lien
Résistance 1500Ω	1	RK73H1ERTTP1501F	KOA Speer	Lien
Inductance 100nH	1	LQW18ANR10G00D	Murata	Lien
Boîtier de blindage	1	MS415-20	Masach Tech	Lien
Connecteurs SMA	2	546-3181	RS-PRO	Lien

9.1.2 Amplificateur de puissance

Composant	Quantité	Référence	Fabricant	Lien
GVA-91+	1	GVA-91+	Mini-Circuits	Lien
Régulateur 5V	1	MCP1703AT-5002E/MB	Microchip	Lien
Condensateur 1uF	1	GRM155C81C105ME11J	Murata	Lien
Condensateur 100pF	1	GCM1555C1H101JA16D	Murata	Lien
Condensateur 8,2pF	1	GCQ1555C1H8R2WB01D	Murata	Lien
Condensateur 6,2pF	1	GCQ1555C1H6R2BB01D	Murata	Lien
Inductance 2,7nH	1	LQG15HN2N7C02D	Murata	Lien
Inductance 5,6nH	1	LQG15WZ5N6S02D	Murata	Lien
Inductance 33nH	1	LQW15AN33NG80D	Murata	Lien
Boîtier de blindage	1	MS415-20	Masach Tech	Lien
Connecteurs SMA	2	546-3181	RS-PRO	Lien

9.1.3 Structure mécanique de la nacelle et intégration

Composant	Quantité	Référence	Fabricant	Lien
Tiges M6	Paquet de 5	280-458	RS-PRO	Lien
Ecrous papillon M6	Paquet de 25	292-619	RS-PRO	Lien
Ecrous hexagonaux M6	Paquet de 50	528-148	RS-PRO	Lien
Kit de fixation	1	524-095	RS-PRO	Lien
Vis M2	Paquet de 100	291-313	RS-PRO	Lien
Ecrous M2	1	528-126	RS-PRO	Lien
Connecteur mâle	3 paquets de 5	495-6187	RS-PRO	Lien
Connecteur femelle	3 paquets de 5	495-6193	RS-PRO	Lien
Interrupteur	3	KDH3ANA1BBB	ZF	Lien
Plaque de PE 30mm	5 plaques	70867531	SOPREMA	Lien
Plaque de PE 20mm	5 plaques	70867482	SOPREMA	Lien

9.1.4 Voyants lumineux à LED

Composant	Quantité	Référence	Fabricant	Lien
Ruban de LED	1	855-5946	RS-PRO	Lien
NE555D	2	NE555D	Texas Instruments	Lien
Porte Piles AA x4	2	185-4643	RS-PRO	Lien
Condensateur 3,3uF	2	C3216X7R1H335K160AC	TDK	Lien
Condensateur 1nF	2	C1206C102KGRACU	KEMET	Lien
Condensateur 100nF	2	CC1206KKX7R0BB104	Yageo	Lien
Résistance 220kΩ	2	ERJP08F2203V	Panasonic	Lien
Résistance 390kΩ	2	ERJP08F3903V	Panasonic	Lien
Supports SIL	6 voies	1-1814655-5	TE Connectivity	Lien
Piles AA	8	7638900262643	Energizer	Lien

9.2 Bilan des masses

Composant	Quantité	Masse totale
Module LEDs (hors piles et connecteurs)	1	115g
Module LoRa (hors piles et connecteurs)	1	220g
Module Caméra (hors piles et connecteurs)	1	100g
Nacelle à vide (avec tiges, peinture, vitres et antenne)	1	700g
Paire de connecteurs	9	135g
Piles AA	20	300g
Plexiglas de renfort	1	60g
Interrupteurs	3	21g
Supports 3 piles	4	48g

Le total théorique pèse 1699g sans compter les fils, les autocollants, l'abeille et le drapeau.

Finalement, la nacelle complète pèse 1740g en tout. Dans tous les cas, l'exigence MEC1 est validée.

9.3 Datasheets

- PHA-13LN+ : <https://www.minicircuits.com/pdfs/PHA-13LN+.pdf>
- GVA-91+ : <https://www.minicircuits.com/pdfs/GVA-91+.pdf>

9.4 Cahier des charges

- Cahier des charges CNES et Planète Sciences (Janvier 2020) : https://www.planete-sciences.org/espace/IMG/pdf/cahier_des_charges_ballon_v14.pdf

9.5 Tableurs

- Planning jour J : <https://docs.google.com/spreadsheets/d/14BbvW1u3lhAqqSrm6lHvHsIk2g/edit?usp=sharing>
- Planning des tâches : https://docs.google.com/spreadsheets/d/1lDHw7y4rCpv_4wdrZ40fD1-5cWKXxDfdKQskPG3ig_s/edit?usp=sharing
- Validation du cahier des charges : https://docs.google.com/spreadsheets/d/1qlyS4en-GYZGp8Pg_FfV2F5TgBYS30GgpivWzlNJSr8/edit?usp=sharing

9.6 Logiciels

- Blender : <https://www.blender.org/>
- Tina : <https://www.ti.com/tool/TINA-TI>
- KiCad : <https://kicad-pcb.org/>
- Trello : <https://trello.com/>

10 Table des figures

Table des figures

1	Canaux LoRa utilisables	6
2	Plan de masse de l'antenne	7
3	Plaque de cuivre servant de support au brin de l'antenne	8
4	Tests et mesures sur l'antenne	8
5	Connexion de l'antenne au module LoRa	9
6	Abeille servant à protéger la pointe de l'antenne	10
7	Circuit d'application du PHA-13LN+	11
8	Schéma Gerber de l'amplificateur	11
9	Amplificateur faible bruit fabriqué	12
10	Circuit d'application du GVA-91+	13
11	Modèle 3D de la nacelle avec et sans les inter-étages	17
12	Design et position des vitres sur Blender	18
13	support de caméra sur Blender	19
14	Vitres découpées au laser	20
15	Support de caméras imprimé en 3D	20
16	Courbes de température obtenues avec et sans la fenêtre	21
17	Intégration du module LoRa	23
18	Intégration des capteurs extérieurs	23
19	Intégration du module Arduino pour la prise d'images	24
20	Caméras montées sur leur support	25
21	Dessous de la nacelle avec le drapeau et la fixation en plexiglas	26
22	Nacelle complète en configuration de vol	26
23	Schéma du montage astable du NE555	28
24	Schéma du montage réalisé sur TINA	29
25	Simulation du comportement de la sortie des NE555 astables	29
26	PCB top et bottom de la carte de commande des LEDs sur KiCad	30
27	Carte de commande des LEDs finale	31
28	Essais en enceinte thermique du système LEDs	32
29	Profil de température des essais thermiques du système LED	32
30	Profil de tension et de courant du système LED lors de l'expérience et suivant la température	33
31	Essais à vide du système LED	34
32	Intégration du système LED dans la nacelle	34
33	Profil de température subi par les alimentations au cours de l'expérience	36
34	Variation de la tension aux bornes des piles au cours de l'expérience et selon la température	37
35	variation du courant fourni par les alimentation au cours de l'expérience et selon la température	38
36	Procédures de vol sur Trello	39
37	Tâches à réaliser avant le jour du lâché	40
38	Exigences à valider pour être conforme au cahier des charges	41

Project funded by the Interreg Sudoe Programme through the European Regional Development Fund (ERDF)