



# **Rapport du Projet Télémétrie embarqué dans une Fusée Expérimentale Supersonique**

Rapport rendu le 03 octobre 2025

BLONDEAU Killian et SAVATIER-DUPRÉ Charly

## Table des matières

<b>Table des illustrations .....</b>	<b>3</b>
<b>Introduction :.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Analyse technique du besoin .....</b>	<b>6</b>
1.1. Préambule et description du besoin.....	6
1.2. Cahier des charges fonctionnels.....	7
<b>2. Principales solutions disponibles .....</b>	<b>11</b>
2.1. Kiwi .....	11
2.2. Kikiwi.....	11
2.3. LoRa.....	11
<b>3. Architecture du système .....</b>	<b>13</b>
3.1. Architecture Générale.....	13
3.2. Capteurs du système.....	14
3.3. Système d'émission.....	14
3.4. Système de réception .....	15
3.5. Système de stockage des données .....	16
3.6. Gestion et affichage des données .....	16
3.7. Cahier des charges technique .....	17
<b>4. Sécurité et fiabilité .....</b>	<b>18</b>
4.1. Protocole de tests .....	18
4.2. Résultats des tests .....	19
<b>5. Gestion du projet .....</b>	<b>22</b>
5.1. Organisation générale.....	22
<b>6. Limites actuelles et perspectives d'améliorations .....</b>	<b>24</b>
6.1. Limites du projet.....	24
6.2. Perspectives d'améliorations .....	25
<b>Conclusion.....</b>	<b>26</b>
<b>Table des annexes.....</b>	<b>27</b>

## Table des illustrations

Tableau 1 : Résumé du CDC du CNES .....	5
Tableau 2 : Tableau des fonctions principales .....	7
Tableau 3 : Tableau des fonctions secondaires .....	10
Figure 1 : ESP32 LoRa V3 de chez Heltec Automation® .....	12
Figure 2 : Schéma du fonctionnement du système .....	13
Tableau 4 : Qualité du signal en fonction du RSSI .....	14
Figure 3 : courbe de la distance en fonction de la puissance d'émission de la LoRa .....	15
Tableau 5 : CDC technique du projet .....	17
Figure 4 : simulation de l'accélération de la fusée en fonction du temps .....	20
Figure 5 : débit brut en fonction du Spreading factor, du Bandwidth et du code rate .....	20
Figure 6 : Diminution du débit en fonction de la distance .....	21
Tableau 6 : Caractérisation de la trame par la librairie Heltec.....	21

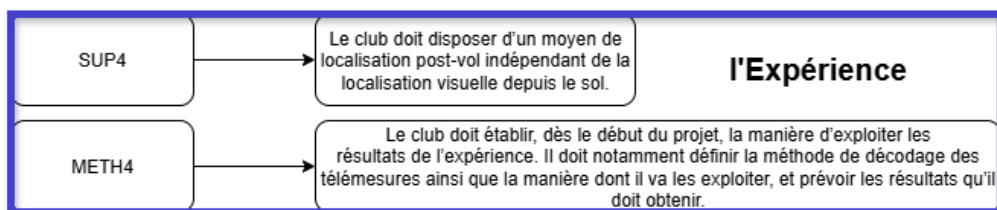
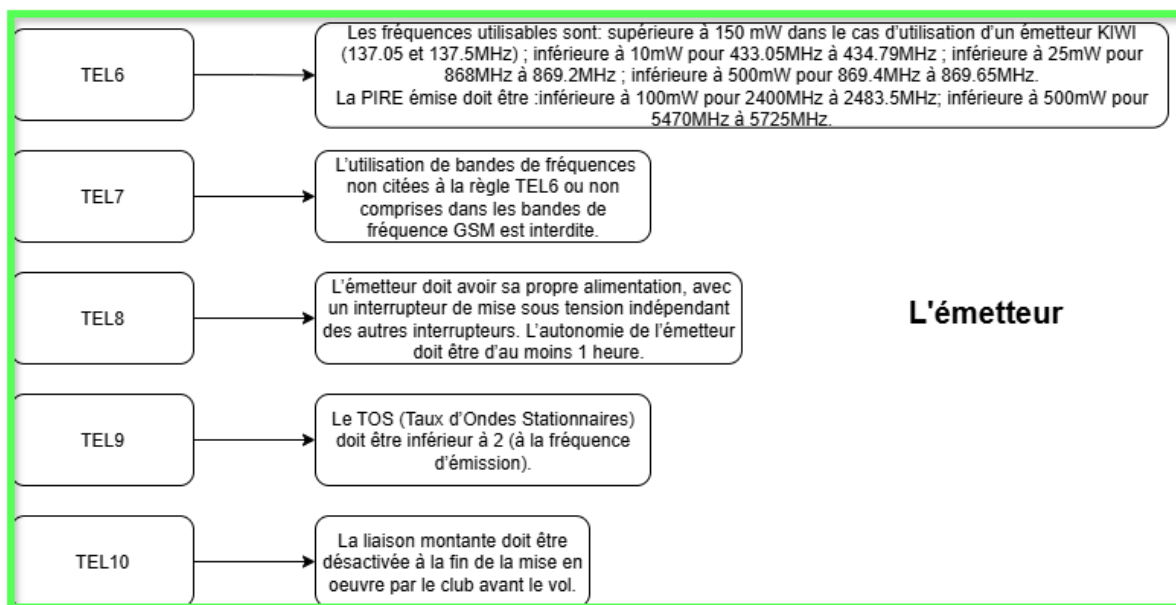
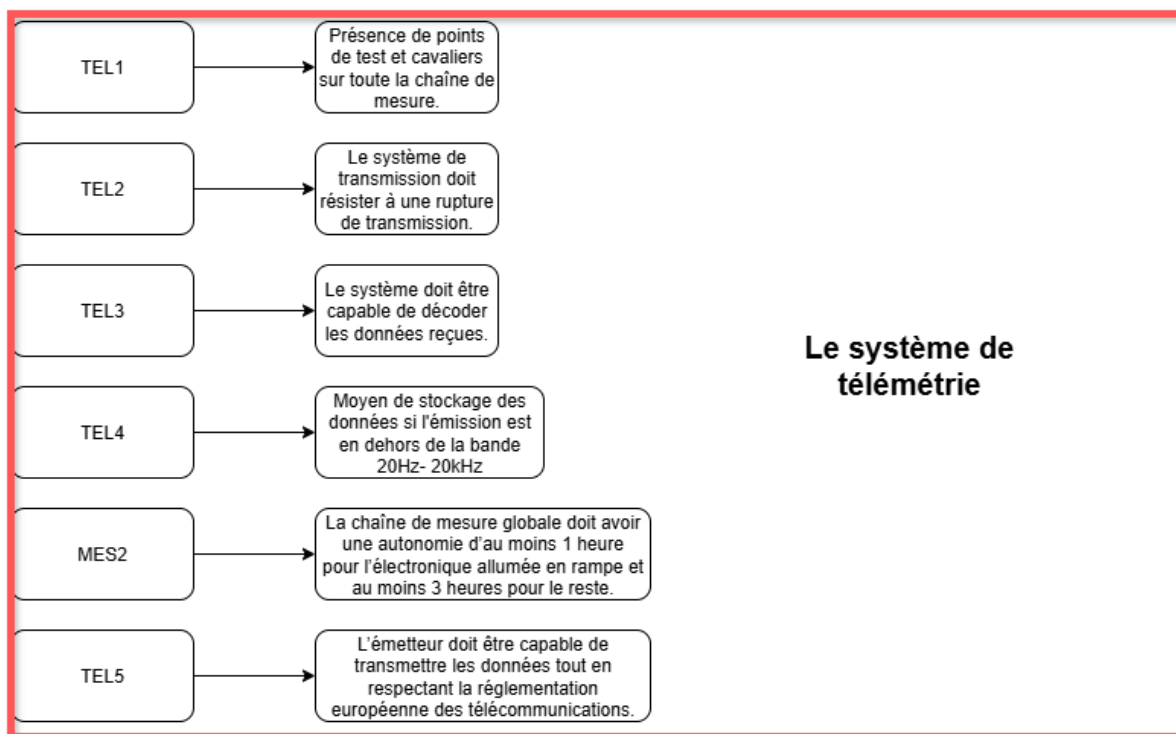
## Introduction :

Dans le cadre du projet de développement de la fusée expérimentale supersonique mené par Space'Tech, la mise en œuvre de plusieurs systèmes embarqués robustes sont nécessaire à la certification de la fusée. Chaque composant doit être conçu pour fonctionner en parallèle des autres systèmes afin d'assurer la réussite du vol. Parmi ces éléments, le système de télémétrie occupe une place importante : il est le lien entre la fusée en vol et les équipes au sol, et il permet surtout de recueillir les données, de les traiter et de les transmettre.

La télémétrie permet de suivre en temps réel les paramètres essentiels du vol tels que la vitesse, l'altitude, l'accélération et la position. Ces données sont essentielles non seulement pour garantir le bon déroulement du lancement, mais aussi pour valider les hypothèses expérimentales demandées par le Centre National d'Études Spatiales. En effet, l'analyse post-vol repose principalement sur la qualité et la fiabilité des informations transmises si la fusée n'est pas retrouvée.

Ce rapport s'inscrit dans une démarche de continuité du projet F.E.U.R (Fusée Expérimentale Ultra Rapide), visant à passer le mur du son pour renforcer la capacité d'analyse des vitesses supersonique. Il présente l'architecture du système de télémétrie embarqué, en détaillant ses composants, et son principe de transmission et de réception. L'objectif est d'une part de documenter les choix techniques effectués pour la première version du système ; d'autre part, identifier les axes d'amélioration pour la continuité du projet tout au long de l'année.

En essayant d'adopter une approche système, ce rapport débute par une vue d'ensemble du système embarqué de la fusée, avant de se concentrer sur le sous-système de télémétrie, puis sur les aspects spécifiques de la transmission et de la réception des données.



*Tableau 1 : Résumé du CDC du CNES*

# 1 Analyse technique du besoin

## 1.1. Préambule et description du besoin

Dans le cadre de la conception de l'électronique embarquée de la fusée expérimentale, nous devons développer un système de télémétrie destiné à équiper une fusée supersonique, conformément aux exigences définies par le Centre National d'Études Spatiales (CNES). Ce système vise à assurer la transmission en temps réel de données critiques, depuis le lancement jusqu'à la phase de validation du vol nominal. Compte tenu des contraintes spécifiques liées aux vols supersoniques, notamment les fortes accélérations et les variations thermiques et mécaniques. Le dispositif doit posséder une robustesse mécanique et garantir une fiabilité de transmission adaptée à des conditions extrêmes. L'ensemble du développement s'appuie sur le cahier des charges officiel du CNES relatif aux fusées expérimentales et supersoniques, afin d'assurer la conformité aux normes de sécurité, de compatibilité et de puissance radio.

Nous nous appuierons donc sur trois axes majeurs issus du cahier des charges FUSEX du CNES : l'exploitation des données de l'expérience menée, le système télémétrique et l'émetteur radio. L'exploitation des données concerne la capacité du dispositif à garantir le stockage des informations jusqu'à la récupération de la fusée, malgré les conditions extrêmes. Le système télémétrique, quant à lui, permet une acquisition fiable et en temps réel des paramètres de vol (altitude, vitesse, température, etc.). Enfin, l'émetteur constitue le composant essentiel de la chaîne de communication et doit répondre aux exigences de portée, de fréquence, de puissance et de compatibilité réglementaire définies par le CNES. Ces trois points seront au cœur de notre démarche de conception du prototype télémétrique.

Ci-dessous vous trouverez les parties du CDC Fusex relatif au système télémétrique organisé de façon visuelle. Vous trouverez également en annexe le lien vers celui du CNES dont il est inspiré.

## 1.2 Cahier des charges fonctionnels

Fonction	Description	Acronyme	Interacteur
FS1	<b>Transmettre</b> les données.	TRANSXX	Émetteur
FS2	<b>Recevoir</b> les données.	RECXX	Récepteur
FC1	<b>Résister</b> à différentes contraintes mécaniques.	RESXX	Support
FC2	<b>Consommer</b> de l'énergie pour le fonctionnement.	CONSXX	Batterie
FS3	<b>Interpréter</b> les données brutes des capteurs.	INTERXX	Microcontrôleur
FC3	<b>Respecter</b> la réglementation en vigueur.	RESPXX	Télémetrie

*Tableau 2 : Tableau des fonctions principales*

Fonction	Description	Critères	Niveau	Flexibilité
REC01	Afficher des données	Affichage des données traitées des capteurs grâce à un logiciel propriétaire développé en interne.	Logiciel fonctionnel à la date de rendue du projet.	F2
REC02	Décoder des données	Décodage correct des paquets, système capable de gérer la perte ou la duplication de données (cf. TEL2, TEL3, TEL5).	Perte de paquets < 5% à 4km et 1% à 1km.	F0
REC03	Stocker des données	Stockage local des données sur mémoire non-temporaire après réception des données au sol.	Perte de données < 5% à 4 kms et <1% à 1 km, comparativement aux données stockées directement en sortie de la carte de traitement.	F0

(cf. TEL4, TEL2).				
TRANS01	Encoder des données	Encodage des données grâce à une trame qui sera simple et compacte. (cf. TEL2)	Trame fonctionnel et optimisé pour les données traitées.	F1
CONS01	Transmettre de l'énergie	La carte doit pouvoir être alimenter à tout moment du vol ainsi que pendant les manipulation au sol. (cf. TEL8)	Alimentation de la carte et émetteur indépendants des autres éléments électroniques.	F0
CONS02	Stocker de l'énergie	Batterie dimensionnée pour consommation maximale prévisionnelle, inclure protection et contrôle de la charge. (cf. TEL8 et MES2)	Autonomie de l'émetteur avec capteurs allumés >1h  Autonomie de l'électronique hors capteurs et émetteur >3h.	F1
INTER01	Définir l'ordre d'envoi des données	Prioriser données critiques (localisation) avant logs capteurs. (cf. TEL10, SUP4).	Intervalle de transfert $\leq 0.05s$ .	F2
INTER02	Lire les données des capteurs	Lecture fiable des capteurs, filtrage des valeurs impossible. (cf. METH4)	Les valeurs ne devront pas dépasser le spectre des valeurs définies par l'utilisateur.	F0
INTER03	Stocker les données traitées	Stockage temporaire avant envoi, gestion de	Aucun perte de données toléré.	F0



		reprise si perte de liaison, compatibilité avec stockage SD. (cf. METH4, TEL4)		
RESP01	Limiter la Masse	Le système télémétrique doit être le plus léger possible. (cf. MEC2).	Masse totale de la carte < 150 g hors batterie et antenne.	F1
RESP02	Dimensionner l'ensemble télémétrique	Le système télémétrique doit être le moins encombrant possible et doit pouvoir tenir dans un cylindre. (cf. MEC2)	Volume ≤ Ø60×100 mm, antenne exclue.	F1
RESP03	Appliquer les normes fréquentiels	Le système télémétrique devra adopter une ou plusieurs fréquences homologués et autorisés par le CNES. (cf. TEL5, TEL6, TEL7)	Plages de fréquences autorisées :	F1
			-137.05-137.5MHz	
			(KIWI seulement).	
			-433.05-434.79MHz	
			-868-869.2MHz	
			-869.4-869.65MHz	
			-2400-2483.5MHz	
			-5470MHz-5725MHz.	
			-144-146MHz (License radioamateur requise).	
			-GSM avec carte SIM.	

		Puissance isotrope rayonnée équivalente maximale :	
RESP04	Appliquer les normes de puissances fréquentiels	Le système télémétrique devra respecter la PIRE ainsi que la réglementation sur le TOS. (cf. TEL6, TEL9)	-150mW< pour la bande 137MHz -10mv< pour la bande 433MHz -25mW pour la bande 868mW -500mW pour la bande 869MHz -100mW< pour la bande 2.4GHz -500mW< pour la bande 5GHz
RESP04			F0
RES01	Résister aux différentes contraintes mécaniques	Le système télémétrique devra résister à d'importants facteur de charges ainsi qu'à de fortes cavitations et vibrations à cause de la forte accélération dû à la nature supersonique de la fusée.	La carte de la fusée doit pouvoir supporter une compression équivalente à $F = 2 * \text{Accélération Max} * M_{\text{sup}}$ où $M_{\text{sup}}$ est la masse de la carte et Accélération Max vaut $313.3 \text{ m/s}^2$ soit $\approx 32 \text{ G}$
RES01			F1

Tableau 3 : Tableau des fonctions secondaires

F0 : flexibilité nulle, niveau impératif

F1 : flexibilité faible, niveau peu négociable

F2 : flexibilité bonne, niveau négociable

F3 : flexibilité forte, niveau négociable

## 2. Principales solutions disponibles

### 2.1. Kiwi

Lors de nos premières recherches sur le sujet de la télémétrie de F.E.U.R, nous avons étudié le cahier des charges FusEx du CNES. Il propose une solution de télémétrie pré-paramétré appelé KIWI. Ce système pouvait être fourni par planète science pour ne pas avoir à faire soi-même une carte de télémétrie fonctionnelle. Cependant, cette carte n'est plus disponible car sa création remonte à 1995, cette solution n'était donc plus d'actualité depuis 2016, date à laquelle le système Kikiwi l'a remplacé. Néanmoins, bien que ce document ne relate plus de composants en service, celui-ci a pu nous apprendre de nombreuses connaissances à propos des télécommunications et de leur fonctionnement interne.

### 2.2. Kikiwi

La suite de nos recherches nous ont conduit vers le successeur du kiwi, le Kikiwi. Ce dispositif de télémétrie est lui aussi fourni par planète science. C'est une carte électronique plus moderne que le kiwi sorti en 2017. Pour la réalisation de ce projet, nous avions à réaliser ce genre de dispositif, il nous semblait donc moins intéressant de prendre une solution toute faite. Ainsi, nous avons décidé de ne pas choisir cette solution qui en plus ne nous permettait pas autant de puissance et de bande passante que le protocole LoRa, surtout en présence de la nécessité d'avoir une vitesse de transmission de données très rapide en raison de l'aspect supersonique de la fusée.

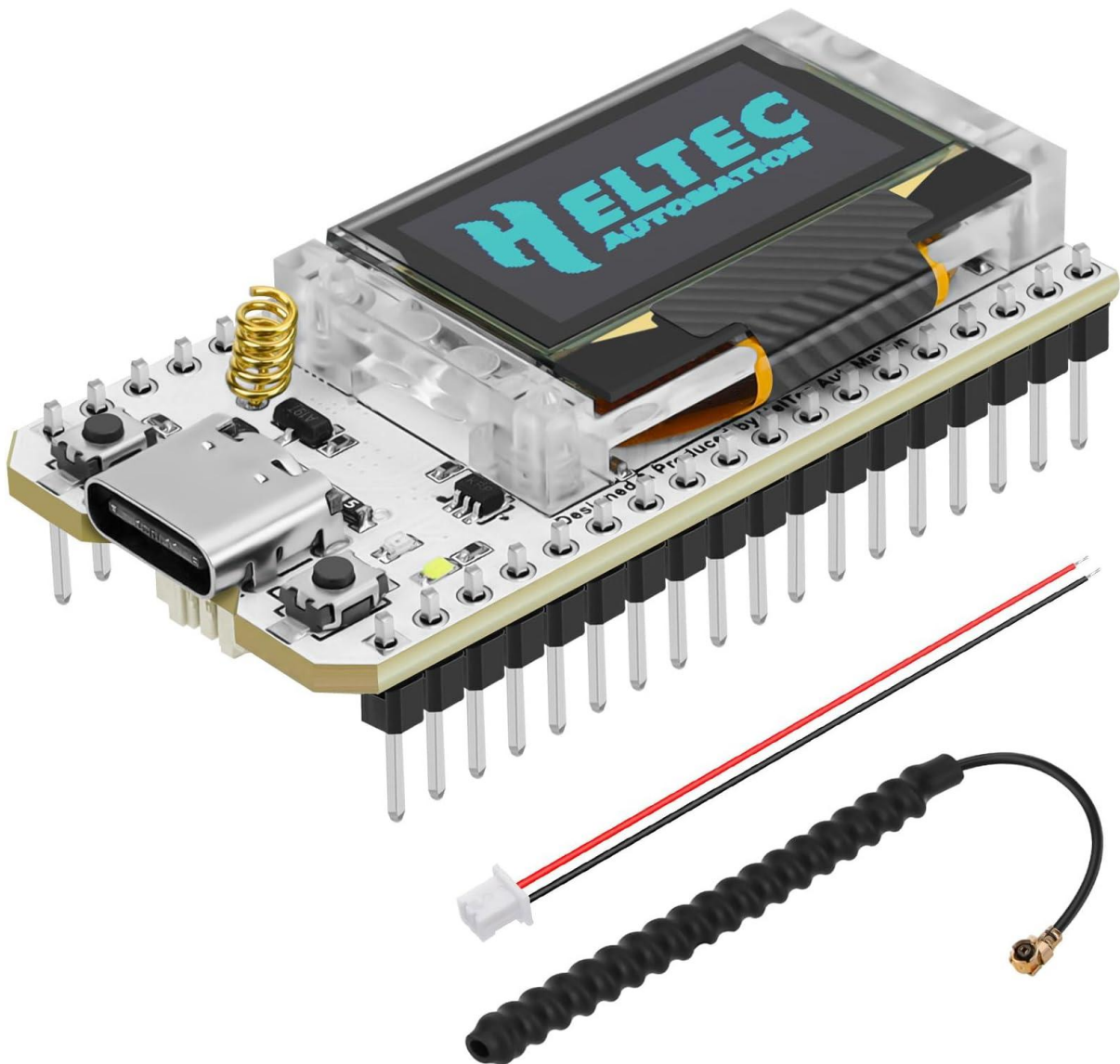
### 2.3. LoRa

La fin de nos recherches nous a conduits vers la technologie LoRa. LoRa signifie « Long Range », et permet une communication radio en RF pouvant atteindre jusqu'à 10 km dans des conditions optimales. L'un des principaux avantages de ce protocole est sa compatibilité avec l'environnement ESP32, que nous avons choisi pour assurer la lecture des capteurs embarqués dans la fusée.

Les modules LoRa sont disponibles sous plusieurs formes, plus ou moins complexes selon les cas d'usage. Le premier se présente sous la forme d'un petit composant difficile à souder (SX1276 ou 1262). Le second, basé sur ce même composant, est une carte au

format ESP32 équipée d'un port antenne et avec ses ports accessible et pré-soudés, facilitant l'accès au module LoRa. Enfin, la troisième solution est une carte intégrant directement un ESP32 et un module LoRa, permettant une utilisation native de la fonctionnalité sans adaptation supplémentaire.

C'est cette dernière option que nous avons retenue pour la réalisation de notre projet car elle permet en plus de tout faire avec une seule carte grâce à sa puissance et à sa versatilité.



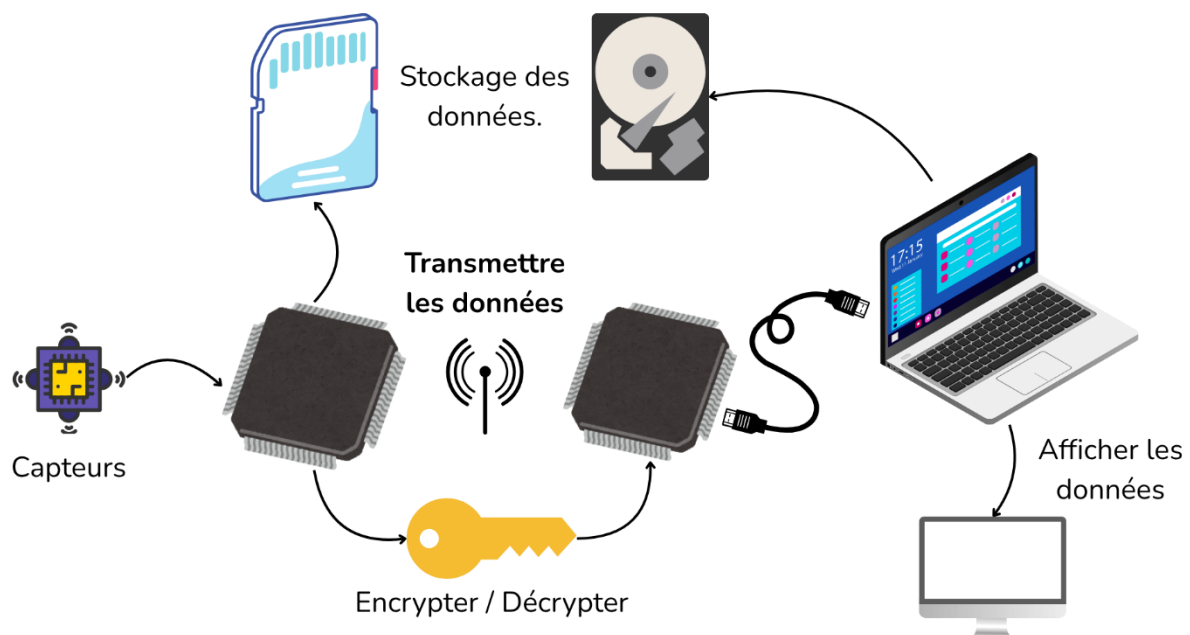
*Figure 1 : ESP32 LoRa V3 de chez Heltec Automation®*

### 3. Architecture du système

#### 3.1. Architecture Générale

Dans notre fusée, l'architecture générale est concentrée autour de deux cartes électroniques complètement isolé l'une de l'autre. On retrouve donc la carte dite séquenceur qui permet de gérer les systèmes vitaux de la fusée (déclenchement de l'ouverture du parachute) et la carte expérience (IHM + télémétrie), qui s'occupe de la partie expérimentale de la fusée. Notre expérience est de confronter un tube de Pitot à des vitesses supersoniques. On ne se concentrera que sur l'architecture de la carte expérience et plus précisément de la partie télémétrique dans ce rapport. Ainsi, après le choix initial de la carte, le but était d'avoir deux ESP32, Le premier s'occupera de lire les capteurs tandis que le deuxième se chargera de transmettre les données au sol.

Cependant, en poursuivant nos tests, nous avons décidé de fusionner ces 2 ESP32 en un seul car la puissance de l'ESP32 LoRa suffit largement à couvrir nos besoins en calculs et en gestion de données grâce à son processeur Xtensa LX7 à deux cœurs et cadencé à 240 MHz. La carte expérience et l'ensemble télémétrique s'articulent donc autour d'une ESP32 LoRa V3.1 de chez Heltec.



*Figure 2 : Schéma du fonctionnement du système*

### 3.2. Capteurs du système

Le contrôleur est ensuite connecté à plusieurs thermorésistances afin de mesurer l'échauffement sur la fusée en vitesse supersonique. Ici la lecture se fait via les convertisseurs analogiques numériques de l'ESP32. Un capteur différentiel de pression relié au tube de Pitot sera aussi essentiel pour l'expérience. À tous ces capteurs s'ajoutent un module GPS pour connaître l'emplacement de la fusée ainsi qu'un accéléromètre. Notre dispositif de test, lui, est uniquement composé d'un accéléromètre MPU6050 provisoire et d'un ESP32 LoRa car nous ne possédons pas encore les capteurs définitifs.

### 3.3. Système d'émission

Le système d'émission est composé d'un module ESP32 LoRa V3.1 de chez Heltec. Pour transmettre convenablement et de façon robuste notre signal, nous avons dû simuler la force du signal avec le modèle de perte en espace libre associé à l'équation de Friis (Free Space Path Loss - FSPL).

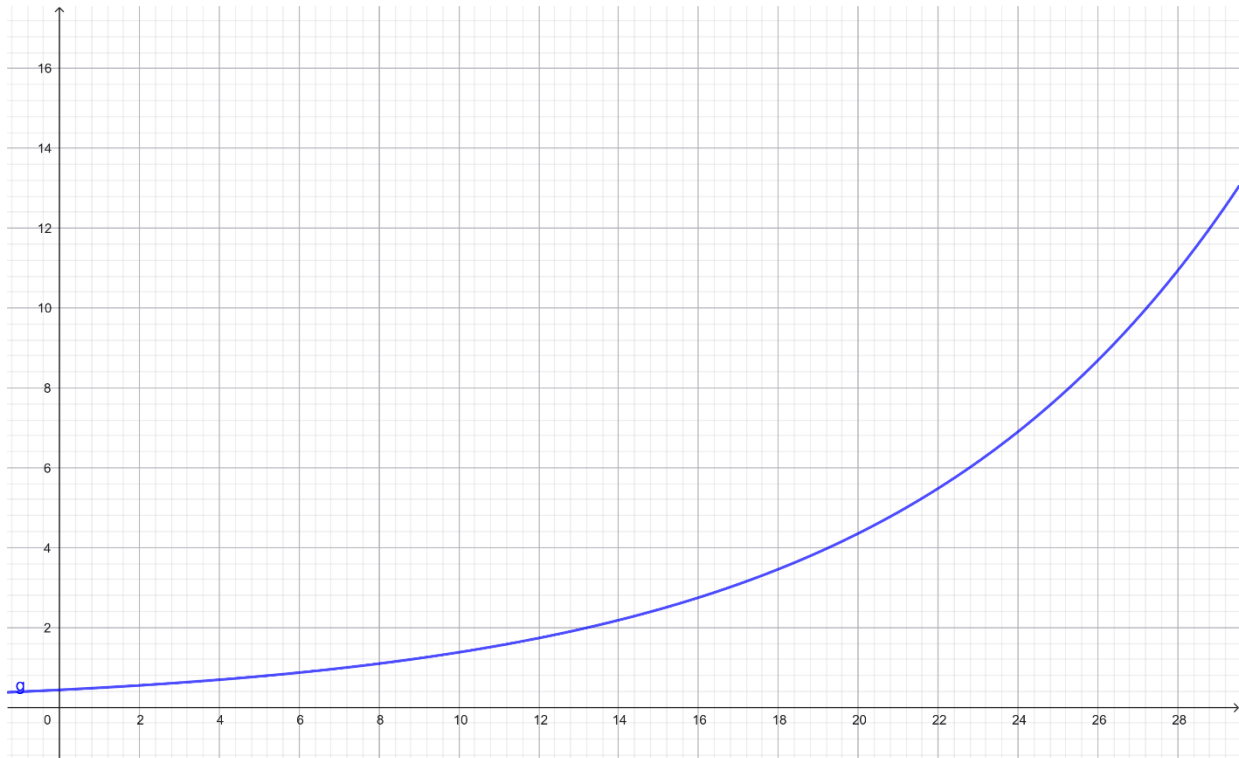
Avec la formule suivante :

$$d = \frac{10^{\left(\frac{P_t + G_t + G_r - S - 32,45}{20}\right)}}{f}$$

>-50 dBm	Excellent	>-60 dBm	Très bon	>-70 dBm	Bon
>-80 dBm	Faible	>-90 dBm	Très faible	<-100 dBm	Pas de signal

*Tableau 4 : Qualité du signal en fonction du RSSI*

Nous avons décidé que la sensibilité minimum acceptée serait de -80dB pour éviter toute perte de données critiques. Après avoir tracé le graphique de la portée en fonction de la puissance d'émission, nous avons déduit que -19dB était une valeur acceptable pour pouvoir atteindre les 4km demandés par le cahier des charges.



*Figure 3 : courbe de la distance en fonction de la puissance d'émission de la LoRa*

De plus la consommation électrique à 19dB est estimée selon la datasheet du constructeur à environ 210mAh (150mAh de LoRa et 60mAh pour l'ESP32). Le système de transmission sera alimenté soit par une batterie Li-Po soit par une batterie Lithium. Ce choix sera fait dans une phase ultérieure du projet. Concernant la réglementation, le passage en bande 869MHz nous permet légalement de monter jusqu'à 27dB de puissance d'émission et nous avons actuellement 21dB en sortie d'émetteur (19dB de la LoRa et 2dB de l'antenne omnidirectionnelle).

### 3.4. Système de réception

Au sol, il nous faut un autre module LoRa pour la réception des données transmises à la fusée. Dans cette optique, nous avons d'abord pensé à utiliser un module LoRa FireBeetle connecté à un ESP32 classique car nous disposons d'ores et déjà du composant, cependant, nous nous sommes rendu compte que les modules SX1276 présente dans les FireBeetle ne sont pas compatibles avec les SX1262 présente dans les ESP32 LoRa V3.1. Nous avons donc eu besoin d'une deuxième ESP32 LoRa V3.1 pour la réception des données, celui-ci est simplement liée via une connexion série à un ordinateur et l'IDE Arduino nous permet d'afficher les données transmises par la carte

télémetrique faisons office de transmetteur. Cet ESP32 est ainsi connecté à une antenne qui permet un gain de 2dB en réception.

### 3.5 Système de stockage des données

Le système de stockage des données repose sur une double stratégie, obligatoire pour une supersonique. À bord de la fusée, les données issues des capteurs seront enregistrées à leur résolution maximale sur une carte microSD directement reliée à l'ESP32. Ce stockage local permet de conserver l'intégralité des mesures, sans compression ni perte, tout au long du vol, même en cas de défaillance de la transmission radio. En parallèle, les données transmises par le système de télémetrie LoRa vers la station au sol seront envoyées avec une résolution réduite, optimisée pour garantir la fiabilité et la continuité de la transmission en temps réel. Ces données, bien que moins précises, restent exploitables pour le suivi du vol et seront stockées sur un disque dur solide (Solid Drive) dédié à l'analyse post-vol.

De plus, les données stockées auront été préalablement interprétées par la carte embarquée, ce qui permettra une structuration cohérente des informations et une compression plus facile pour la transmission sol. Une fois transmises au sol via la télémetrie, elles pourront être rapidement décryptées et exploitées grâce à la puissance de calcul des modules ESP utilisés en réception.

### 3.6 Gestion et affichage des données

À ce stade du projet, la gestion et l'affichage des données n'ont pas encore été développés. Pour l'instant, nous utilisons principalement le moniteur série de l'IDE Arduino pour visualiser les données en temps réel, ainsi que l'écran OLED embarqué pour afficher ponctuellement certaines.

Dans une phase ultérieure, nous prévoyons de concevoir et de déployer un logiciel dédié permettant une visualisation graphique en temps réel des données télémetriques. Ce logiciel offrira également la possibilité d'exporter les mesures au format CSV, afin de faciliter leur exploitation. Cette interface contribuera à améliorer l'analyse post-vol et à renforcer la traçabilité des données collectées.



### 3.7 Cahier des charges technique

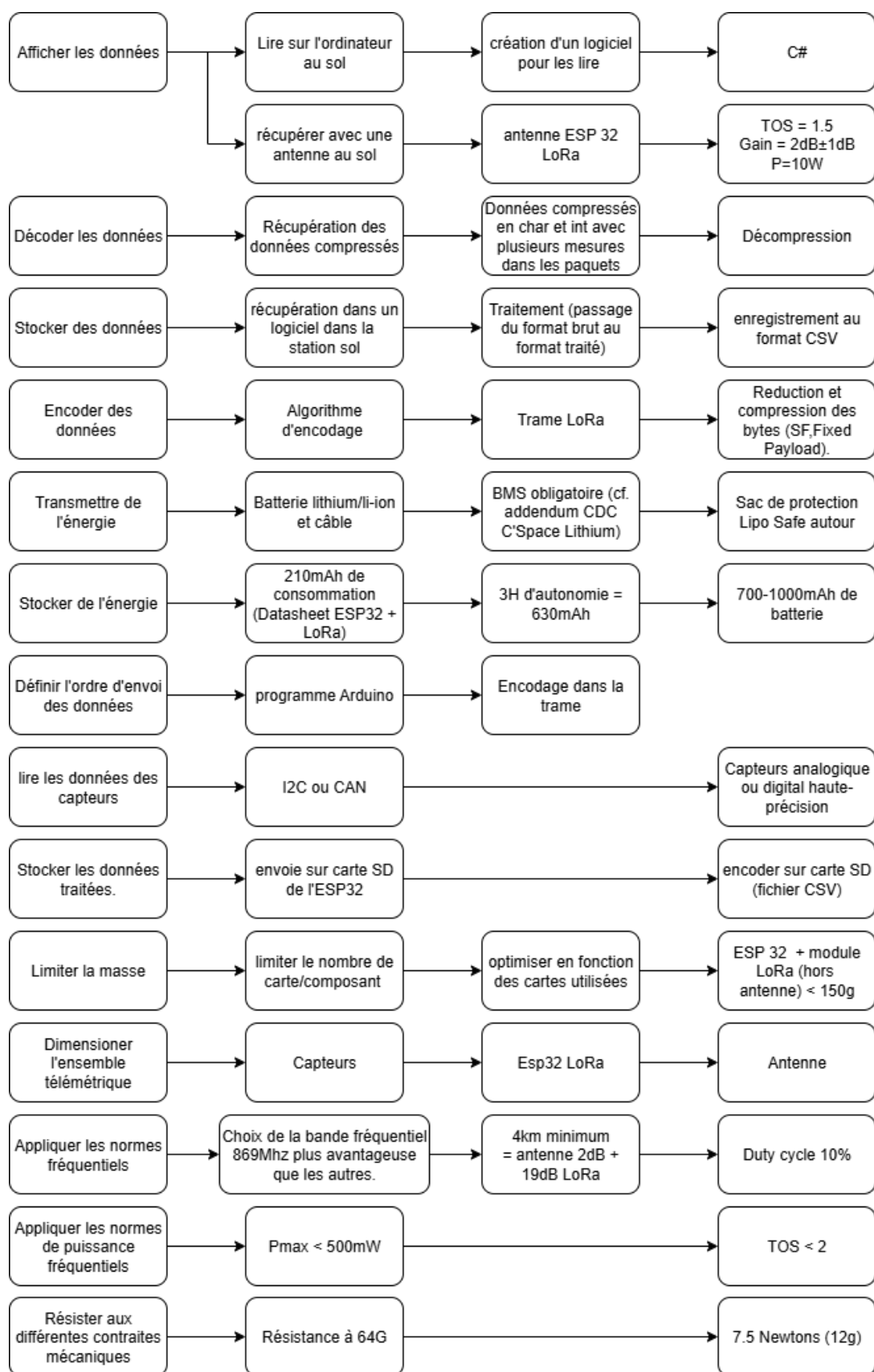


Tableau 5 : CDC technique du projet

BLONDEAU Killian et SAVATIER-DUPRÉ Charly

## 4. Sécurité et fiabilité

### 4.1. Protocole de tests

Pour vérifier que nos composants correspondaient aux contraintes de notre cahier des charges, nous avons élaboré différents protocoles de test qui sont les suivants :

#### **Test de portée :**

- Trouver un endroit dégagé sur plus de 1km.
- Placer un émetteur d'un côté et un récepteur de l'autre avec, pour chacun, un opérateur pour en vérifier le bon fonctionnement.
- Approcher le récepteur progressivement jusqu'à recevoir les premiers signaux clair et peu saccadé.
- Relever la distance finale entre l'émetteur et le récepteur.

#### **Test de continuité des paquets :**

- Placer l'émetteur et le récepteur a une distance raisonnable (environ 100m) sans obstacle.
- Numéroté chaque paquet de l'émetteur.
- Vérifier que tous les paquets ont été reçu par l'émetteur.

#### **Test de fréquence d'émission de paquets :**

- Programmer la carte ESP32 LoRa V3.1 avec une fréquence d'émission faible avec des paquets (2 à 4Hz) ayant une taille similaire à ceux du système télémétrique finale attendu.
- Augmenter la fréquence d'émissions de paquets graduellement (+1Hz a chaque itérations).
- Relever la fréquence réelle d'émission, et détecter quand on atteint la limite de la carte.
- Calculer les imprécisions de mesures que nous aurons si nous utilisons cette fréquence.

#### **Test de résistance à l'accélération :**

- Placer le PCB sur son support final.
- Allumer de dispositif de télémétrie et les capteurs associé.

- Placer une masse en acier équivalente au poids ressenti par les composants à une accélération de  $330\text{m/s}^2$ .
- Constater la quantité de paquet perdu et l'état des composants mécanique comme électronique.

#### **Test de résistance aux vibrations :**

- Fixer le PCB et son support final sur une plaque vibrante (plaque relier mécaniquement à un moteur tournant avec une masse décentrée)
- Allumer le dispositif de télémétrie et ses capteurs.
- Constater la quantité de paquet perdu et l'état des composants mécanique comme électronique.

## **4.2. Résultats des tests**

Certains des tests cités précédemment n'ont pas pu être réalisés car la conception des PCB et des pièces mécaniques n'est pas encore terminée. Cependant les tests de portée, de continuité et de fréquence d'émission des paquets ont pu être réalisés au cours de ce projet.

En effet, nous avons par exemple pu effectuer le test de portée dans l'avenue du président Kennedy, proche de Polytech Galilée. Les résultats de ce test ont été plutôt décevants et éloignés de nos attentes mais s'expliquent par de nombreuses causes. Nous avons donc mesuré une distance de portée maximale de 500m. Néanmoins, l'avenue utilisée lors du test était vallonnée et sujette à un trafic dense pendant la campagne de test. De plus, des interférences et obstacles (arbres, véhicule de grandes envergures...) étaient présents en abondance. Malgré cela, le système a tout de même démontré une robustesse de signal plus forte que celle qui pouvait être espérée de façon réaliste. Il faudra donc vérifier par la suite les performances du signal dans un milieu comme un chemin ou un parc avec moins de perturbation et de dénivelé ou bien surélever l'antenne d'émission comme ce sera le cas en pratique.

### Vitesse en fonction du temps

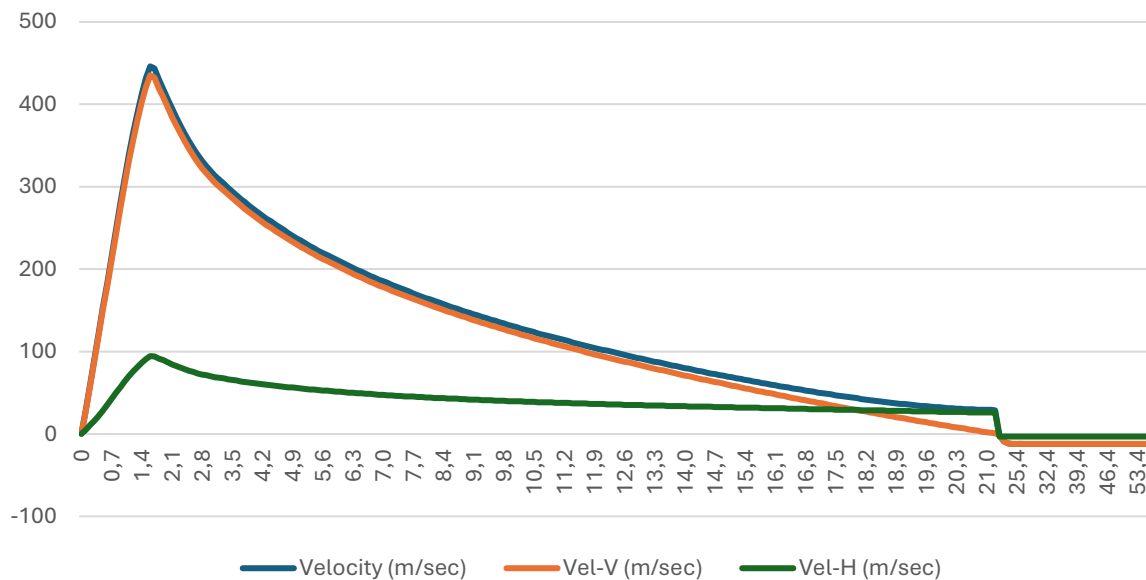


Figure 4 : simulation de l'accélération de la fusée en fonction du temps

De plus, nous avons effectué un test de fréquence d'émission de paquets. En théorie, l'ESP32 LoRa V3.1 devait nous proposer une fréquence d'émission d'environ 900Hz pour atteindre une précision escomptée de 0.5m (450m/s en vitesse maximale). En revanche, nos tests ont montré qu'avec notre trame de données, la fréquence d'émission de paquets maximal était d'environ 10Hz à cause du Time-On-Air.

Calcul théorique du bitrate ainsi que simulation pour notre configuration :

### Durée d'un symbole :

$$T_s = 2^{SF} BW$$

### Débit brut :

$$R_b = \frac{SF}{T_s} \times CR$$

$$R_b = \frac{SF \times BW}{2^{SF}} \times CR$$

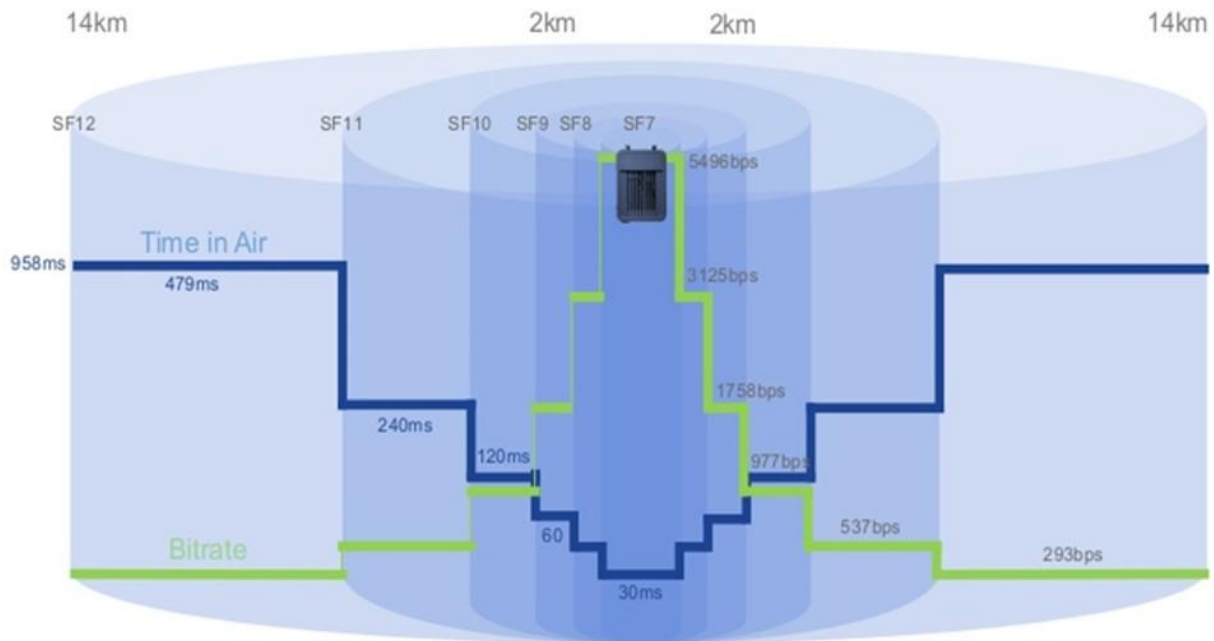
- ↑ Si SF ↑ →  $T_s$  ↑  
(symbole plus long)
- ↑ Si BW ↑ →  $T_s$  ↓  
(symbole plus court)
- ↑ Si CR ↓  
(moins de redondance)  
→  $R_b$  ↑ mais moins robuste

Figure 5 : débit brut en fonction du Spreading factor, du Bandwidth et du code rate

$$R_b = \frac{SF * BW}{2^{SF}} * CR = \frac{7 * 250\,000}{2^7} * 0.8 = 10\,937.5 \text{ bit/s} \cong 1367 \text{ octet/s}$$

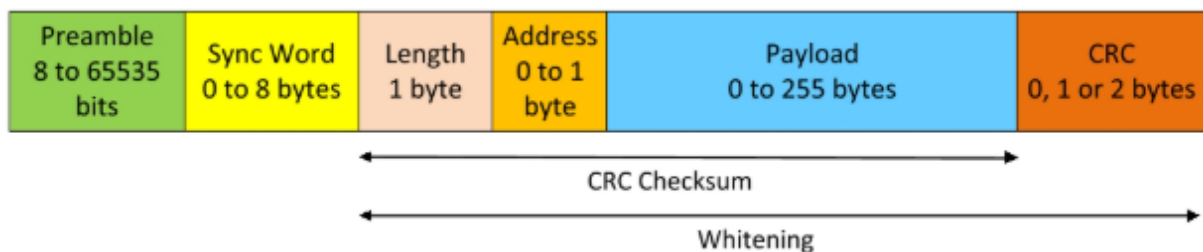
En vérité Le débit utile (throughput) est plus faible car :

- overhead du préambule, en-tête (header LoRa), CRC, etc.
- Temps de garde entre symboles.
- Distance entre deux points
- Obstacles etc...



*Figure 6 : Diminution du débit en fonction de la distance*

Cette fréquence peut malgré tout être augmentée en compressant les données ou en envoyant plusieurs paquets en un seul car les bits de début et de fins de paquets représentent en l'état, près de 40% de la taille du paquet.



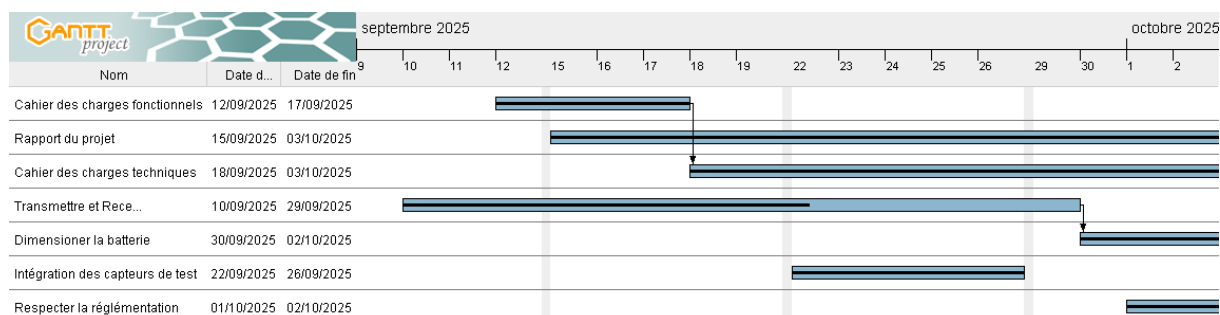
*Tableau 6 : Caractérisation de la trame par la librairie Heltec*

Enfin, la continuité des paquets a été mesurer au cours de nos tests de portée. Nous avons ainsi mesuré que notre RSSI ne devait pas passer en dessous de -100 dB pour avoir une continuité parfaite des paquets.

## 5. Gestion du projet

### 5.1. Organisation générale

Afin d'assurer un suivi rigoureux de l'avancement du projet, nous avons mis en place une gestion structurée basée sur un diagramme de Gantt. Cet outil nous a permis de visualiser l'ensemble des tâches à réaliser, d'identifier les dépendances critiques entre les différentes étapes, et d'anticiper les éventuels retards ou points de blocage. Grâce à cette planification, nous avons pu répartir efficacement les responsabilités au sein de



l'équipe, tout en maintenant une vision claire sur les livrables prioritaires. Bien que certaines tâches secondaires n'aient pas pu être approfondies dans les délais impartis, cette approche nous a permis de concentrer nos efforts sur les éléments essentiels à la réussite du prototype. Le Gantt a également servi de repère temporel tout au long du projet, facilitant les ajustements en fonction des imprévus techniques ou logistiques.

## 5.2. Difficultés rencontrées

Malgré cette organisation, plusieurs difficultés ont accompagné notre parcours et ont nécessité des ajustements réguliers et quelques sacrifices. L'un des premiers obstacles a été le problème d'approvisionnement des cartes électroniques, qui a retardé le démarrage des tests matériels. Ce contretemps nous a contraints à revoir certaines échéances du Gantt et à réorganiser les priorités, en avançant les phases de rédaction du rapport et des autres tâches techniques normalement prévu pour la fin du projet. Nous avons également rencontré des difficultés d'organisation en début de projet, liées à la répartition des rôles et à la coordination des tâches. Nous avons réussi durant les deux dernières semaines à bien nous répartir les tâches, ce qui nous a permis de finir le projet dans les temps.

De plus, certains composants initiaux se sont révélés non compatibles entre eux, ce qui a nécessité des recherches supplémentaires et des adaptations techniques. Enfin, le développement du système de télémétrie constituait une première pour notre équipe, ce qui a impliqué une phase d'apprentissage importante de certains logiciel et process, notamment sur les protocoles LoRa, la structuration des paquets et la gestion des interruptions.

Ces défis, ont renforcé notre capacité à travailler ensemble sur un projet, à anticiper les risques et à adapter notre planification en fonction des réalités du terrain. Ils ont également permis de consolider les bases techniques nécessaires à la réussite du système embarqué.

## 6. Limites actuelles et perspectives d'améliorations

### 6.1. Limites du projet

En l'état actuel, le système est fonctionnel pour transmettre des informations à distance. Bien qu'il soit connecté à un capteur provisoire, il est capable de lire les données via le protocole I2C et de les transmettre à une fréquence de 10 Hz, soit 10 envois par seconde. Cependant, dans sa forme actuelle, le dispositif ne peut pas être intégré tel quel dans une fusée, et encore moins dans une fusée supersonique. Pour répondre aux exigences de ce type d'environnement, il sera nécessaire de concevoir un PCB sur mesure, capable de connecter proprement l'ensemble des capteurs embarqués, tout en garantissant robustesse et fiabilité.

Par ailleurs, la fréquence d'émission actuelle de 10 Hz s'avère insuffisante pour notre cas d'usage, notamment en phase de vol rapide, où une résolution temporelle plus fine est requise. Enfin, la portée mesurée lors de nos tests, environ 500 mètres (en ville), reste largement inférieure à l'altitude maximale estimée de la fusée, soit 3000 mètres. Il est donc indispensable de mener une étude approfondie sur les performances radio du système, afin de déterminer la portée réelle dans des conditions proches de l'environnement de vol.



## 6.2. Perspectives d'améliorations

Malgré les critiques formulées précédemment, il serait prématuré de conclure que le projet ne pourra pas être utilisé dans le cadre de F.E.U.R. Au contraire, de nombreuses perspectives d'amélioration existent et permettront d'atteindre un fonctionnement fiable d'ici le jour du décollage. En effet, les problématiques identifiées peuvent être résolues par des solutions relativement simples à mettre en œuvre.

Par exemple, la fréquence d'envoi des paquets peut être augmentée, ou optimisée en regroupant davantage de données dans chaque paquet. Cela permettrait de réduire la fréquence d'émission tout en augmentant la densité d'information transmise, avec pour objectif de doubler le volume de données reçues par seconde.

La conception d'un PCB sur mesure est également une étape incontournable, déjà prévue à la suite de ce projet, et basée sur les schémas électriques réalisés jusqu'ici. Une fois les cartes conçues, nous pourrions procéder aux tests de résistance mécanique, comme évoqué dans la partie 4.1 du rapport.

Enfin, plusieurs tests complémentaires seront nécessaires, notamment l'étude de la propagation des ondes radio à travers la fibre de carbone, ainsi qu'une analyse de la consommation électrique du système, afin de déterminer la batterie la plus adaptée aux contraintes du vol.

## Conclusion

Porté par SpaceTech dans le cadre du programme F.E.U.R, ce premier projet de développement d'un système de télémétrie embarqué dans une fusée supersonique représente pour nous une étape ambitieuse.

Malgré les (nombreuses) contraintes techniques rencontrées, qu'il s'agisse de l'approvisionnement matériel, des limites de fréquence d'émission ou des performances radio décevante que ce soit en vitesse et en portée, les résultats obtenus sont prometteurs si l'on prend du recul sur le travail accompli, et constituent une base solide pour la continuité du projet tout au long de l'année.

Les tests réalisés ont permis de valider plusieurs aspects importants et essentiels du système, notamment la continuité des paquets, la robustesse du signal et la capacité d'émission dans des conditions hostiles. Les limites identifiées ont été analysées, et des pistes d'amélioration concrètes ont été proposées par nous-même ainsi que par les membres travaillant sur la partie électronique de F.E.U.R depuis l'année passée, telles que la compression des données, ou l'optimisation des trames.

Ce rapport documente l'ensemble des choix techniques, des protocoles de test et des résultats obtenus, tout en ouvrant la voie à une version plus aboutie du système, capable de répondre aux exigences du CNES pour les vols supersoniques. La suite du projet consistera à finaliser l'intégration matérielle, à renforcer la fiabilité du système, et à valider ses performances en conditions extrêmes, afin de garantir la qualité des données collectées et le succès du vol.

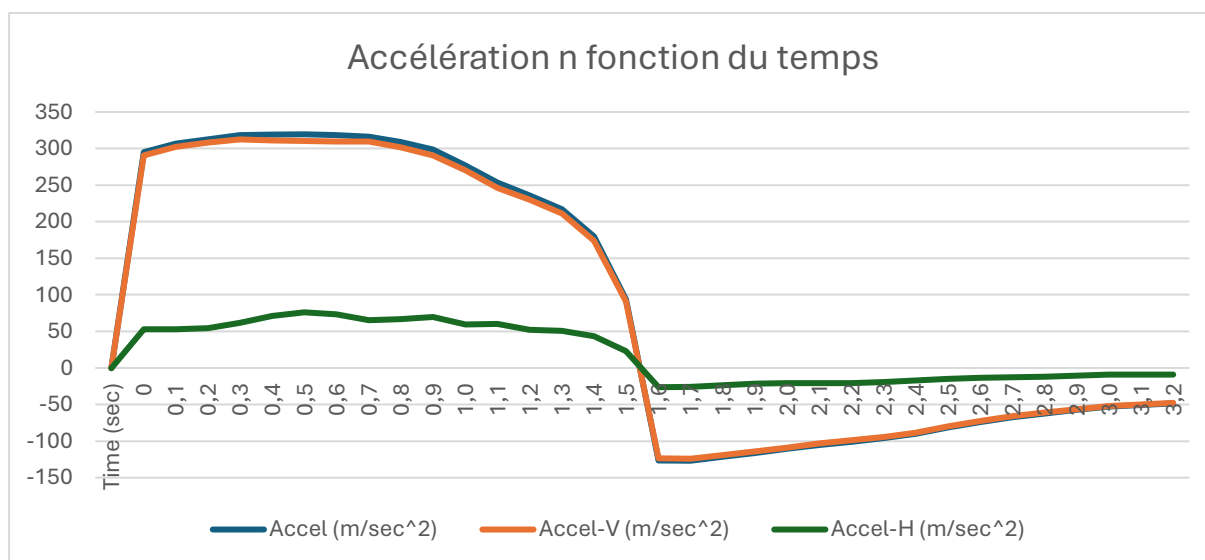
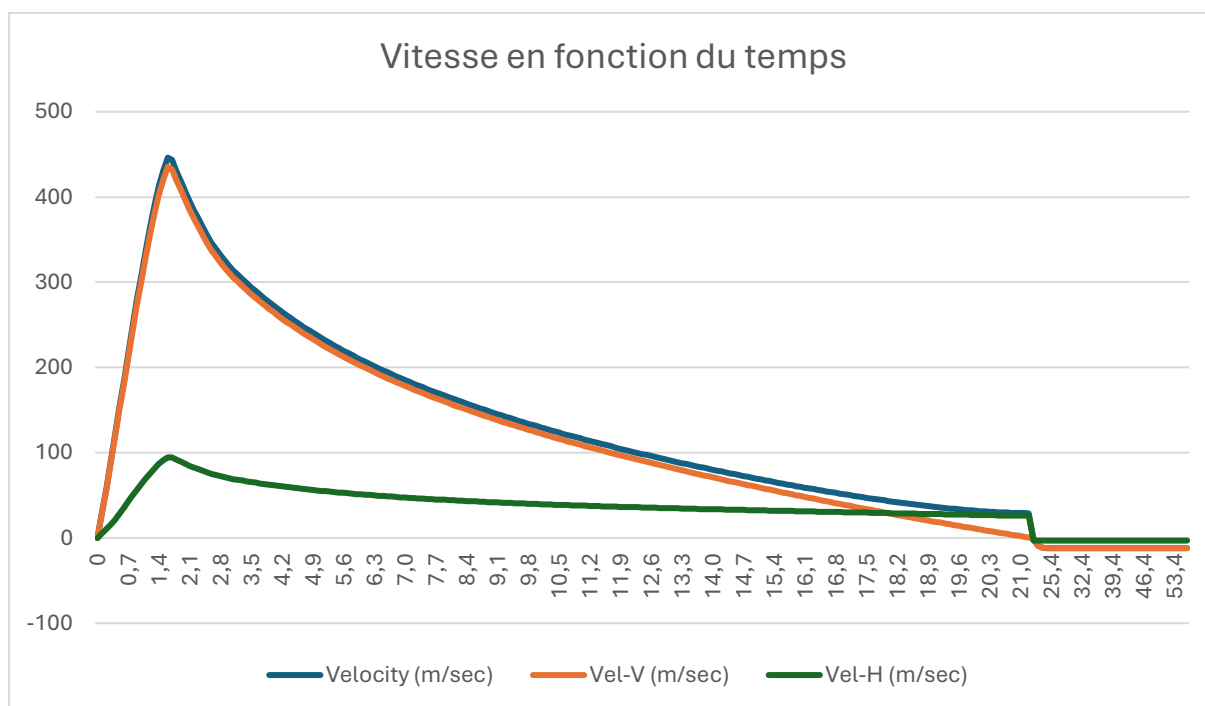
## Table des annexes

Annexe n°1 – Extrait du document « Trajectory FEUR »

Annexe n°2 - Sitographie complète

# Annexe n°1 – Extrait du document « Trajectory FEUR »

Ce document est disponible dans son intégralité pour les membres de l'université d'Orléans à cette adresse : [Trajectory\\_FEUR.xlsb](#)



## Annexe n°2 – Sitographie complète

### Documents institutionnels

- **Cahier des charges FusEx – Planète Sciences**  
[https://www.planete-sciences.org/espace/IMG/pdf/cdc\\_fusex.pdf](https://www.planete-sciences.org/espace/IMG/pdf/cdc_fusex.pdf)
- **Page officielle des fusées éducatives – CNES**  
<https://cnes.fr/education/fusees>
- **Planète Sciences – Espace et Fusées expérimentales**  
<https://www.planete-sciences.org/espace/>
- **Documentation technique sur la télémétrie**  
<https://www.planete-sciences.org/espace/Documentation-technique/Telemesure?recherche=telem>

### Fiches techniques et composants

- **SX1262 – Datasheet officiel Semtech**  
<https://semtech.my.salesforce-sites.com/documents?id=a1ut0000000q7f3AAA>
- **ESP32 LoRa Heltec V3 – Documentation officielle**  
[https://docs.heltec.cn/#/esp32/esp32\\_lora\\_v3/](https://docs.heltec.cn/#/esp32/esp32_lora_v3/)
- **ESP32 – Fiche technique Espressif**  
[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)