ECOLE DES MÉTIERS DE LAUSANNE
ECOLE SUPÉRIEURE

GÉNIE ÉLECTRIQUE

SYSTÈME D'ENREGISTREMENT DE TRAJECTOIRES DE VOL

Boîte noire miniaturisée

Auteur
Ali ZOUBIR

Superviseur
Juan José MORENO

Mandataire
ASSOCIATION POUR LE MAINTIEN
DU PATRIMOINE AÉRONAUTIQUE

9 août 2023

Table des matières

Acronymes **4**

Glossaire **4**

1 Cahier des charges **5**
1.1 Introduction . . . 5
1.2 Aperçu . . . 5
1.3 Tâches à réaliser . . . 5
1.4 Schéma de principe . . . 6
1.5 Planification . . . 7
1.6 Livrable . . . 7

2 Pré-étude **8**
2.1 Fonctionnement du système . . . 8
2.2 Schéma bloc . . . 8
2.3 Description des blocs . . . 8
2.4 Choix des composants et technologies . . . 9
2.4.1 Microcontrôleur . . . 9
2.4.2 Centrale inertielle . . . 10
2.4.3 GPS / GNSS . . . 11
2.4.4 Carte SD . . . 12
2.5 Batterie, autonomie, charge et régulation . . . 13
2.6 Systèmes d'économie d'énergies . . . 15
2.7 Diagramme états du système . . . 15
2.8 Estimation des coûts . . . 16

3 Conclusion de la Pré-étude **16**

4 Développement de la schématique **17**
4.1 Dimensionnements . . . 17
4.1.1 Autonomie du système . . . 17
4.1.2 Adaptation mécanique . . . 17
4.1.3 Bus de communications . . . 17
4.1.4 Interface . . . 17
4.1.5 Périphériques . . . 17
4.1.6 Chargeur de batterie . . . 17
4.1.7 Synthèse et perspectives de l'étude . . . 17

5 Développement du PCB **17**
5.1 Bill of materials . . . 17
5.2 Mécanique du projet . . . 17
5.3 Placement des composants . . . 17
5.4 Mécanique du PCB . . . 17
5.5 Routage . . . 17

6 Développement firmware **17**

7 Validation du design **17**
7.1 Liste de matériel 17
7.2 Contrôle des alimentations 17
7.3 Communication UART 17
7.4 Communication SPI, carte SD 17

8 Caractéristiques du produit fini **18**

9 Conclusion **19**

10 Bibliographie **20**

11 Annexes **21**

Acronymes

MCU microcontrôleur.

PCB Circuit imprimé.

IMU centrale inertielle.

RF radio-fréquence.

GPS global Positioning System.

GNSS global navigation satellite systems.

Glossaire

Centrale inertielle Instrument utilisé en navigation, capable d'intégrer les mouvements d'un mobile (accélération et vitesse angulaire) pour estimer son orientation (angles de roulis, de tangage et de cap), sa vitesse linéaire et sa position.

Timestamp Enrengistrement de l'heure et/ou la date d'un événement.

Traceur de G Indique et enregistre les forces d'accélération grâce à un capteur de pression numérique de haute précision intégré et à une plate-forme inertielle.

GPS Le système de positionnement global (GPS) est un service public américain qui fournit aux utilisateurs des services de positionnement, de navigation et de synchronisation (PNT). Ce système se compose de trois segments : le segment spatial, le segment de contrôle et le segment utilisateur. L'U.S. Space Force développe, entretient et exploite les segments spatial et de contrôle.

GNSS Le système mondial de navigation par satellite (GNSS) est un terme général décrivant toute constellation de satellites qui fournit des services de positionnement, de navigation et de synchronisation (PNT) à l'échelle mondiale ou régionale.

PIC32 Famille de microcontrôleur 32-bits de Microchip.

FTDI Composant Future Technology Devices International. Ici sert de convertisseur USB to UART.

Harmony Configurateur graphique / générateur de code pour les microcontrôleurs de Microchip.

Boîte noire miniaturisée 2023, 1942B

1 Cahier des charges

1.1 Introduction

Ce projet vise à stocker les données de mesures et de localisation d'un avion en utilisant une centrale inertielle et un GPS/GNSS. En combinant ces technologies, nous pouvons enregistrer des informations précises sur les caractéristiques du vol et la trajectoire de l'avion. En cas d'accident, ces enregistrements permettent de déterminer les causes potentielles. En somme, ce système de collecte et de stockage de données fournit une compréhension approfondie des vols et des données essentielles. Le cahier des charges détaillé est disponible en annexe.

1.2 Aperçu

- Sauvegarde des données inertielles chaque 500ms par défaut.
- Sauvegarde des données de localisation chaque 5'000ms par défaut.
- Possibilité de configurer les temps de sauvegarde.
- Résistance aux chocs.
- Bonne autonomie / Low power.
- Global Positioning System. (GPS)
- Global navigation satellite systems. (GNSS).
- Timestamp par satellite.
- Centrale inertielle :
  - Accéléromètre 3-axes.
  - Gyroscope 3-axes.
- Charge, lecture et config. par USB-C.

1.3 Tâches à réaliser

Développement et intégration d'un PCB avec capteurs et logging sur carte SD dans un boitier compact.

- Développement schématique
  - Fonctionnement MCU.
  - Périphériques de mesures et de sauvegarde / Bus de communication.
  - Gestion batterie
- Routage pour intégration dans boitier résistant aux chocs.
- Programmation mesure et sauvegarde des données.
  - Configuration MCU.
  - Configuration du périphérique de mesure pour centrale inertielle. (IMU).
  - Configuration du périphérique de sauvegarde (Carte SD).
  - Configuration du périphérique de localisation GPS/GNSS.
  - Configuration et communication avec l'interface.
  - Communication et traitement des données mesurées.

1.4 Schéma de principe

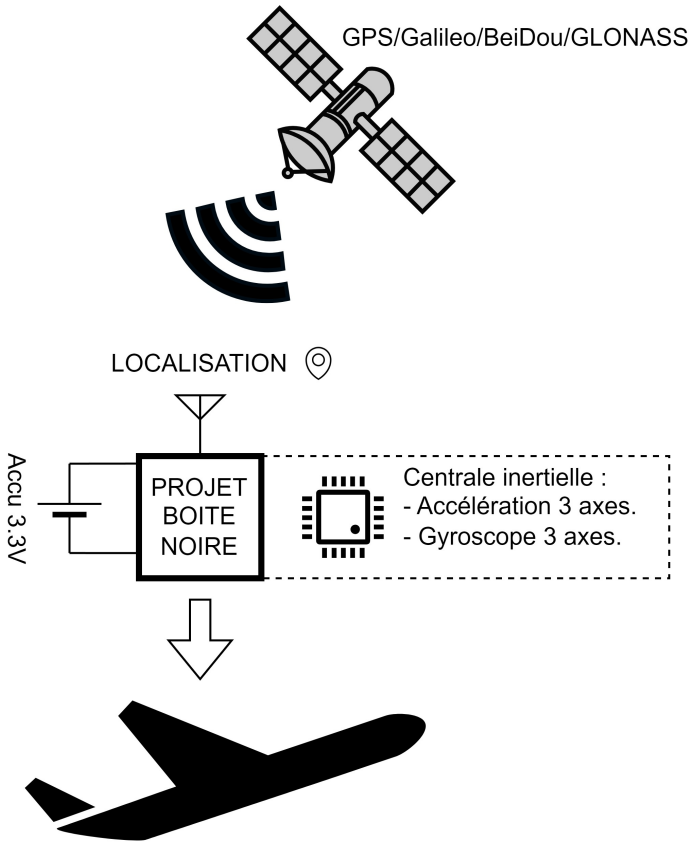


FIGURE 1 – Schéma de principe
Source: Auteur

Ce système électronique de mini boîte noire pour avion, serait capable d'enregistrer des informations récentes sur les données inertielle et la position d'un vol, dans une mémoire non volatile (carte microSD). Le dispositif, abrité dans un boîtier plastique pour assurer une réception optimale des données GPS et une installation compact. Celui-ci fournirait des données via un port USB pour l'extraction des mesures sur la carte microSD ou pour configurer des paramètres tels que les intervalles de mesures. Les mesures sur les trois axes d'accélération et de vitesse angulaire seraient recueillies par défaut toutes les 500 ms et les données de position GPS toutes les 5000 ms. Des intervalles d'enregistrement plus longs sont envisageables pour optimiser la durée de vie de la carte SD, selon la taille et l'organisation des données. Le dispositif sauvegarderait les données des 15 dernières minutes de vol (ou plus) dans un fichier CSV pour traitement ultérieur, selon le principe FIFO. L'objectif principal du prototype est de privilégier la compacité pour minimiser son encombrement à bord de l'avion.

1.5 Planification

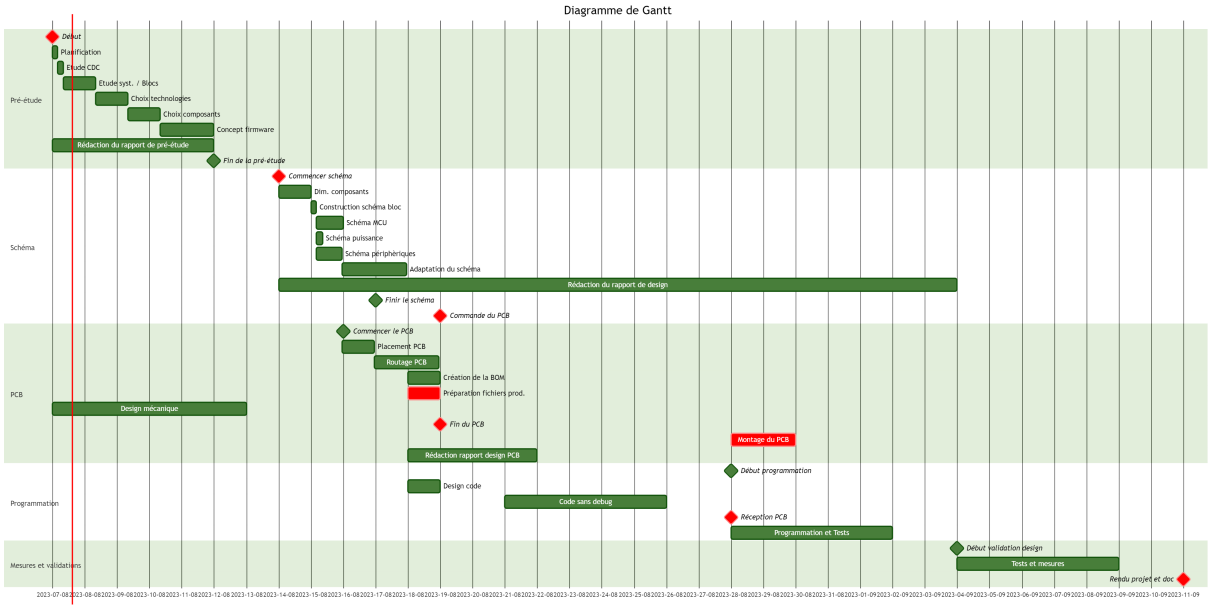


FIGURE 2 – Planification - Diagramme de gantt
Source: Auteur

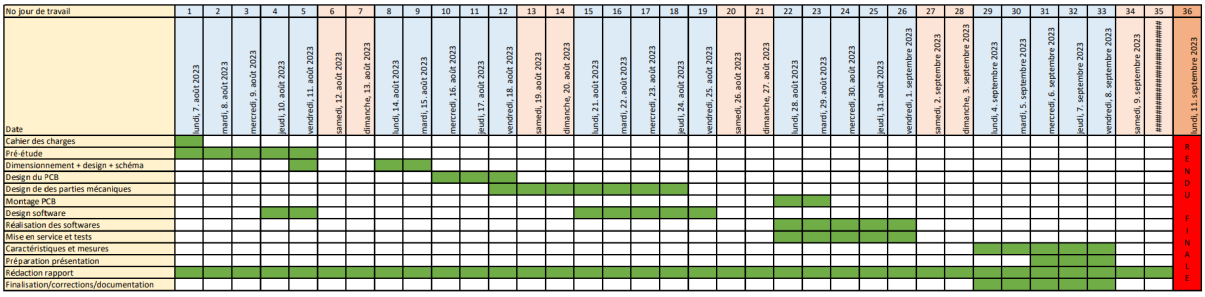


FIGURE 3 – Planification théorique

1.6 Livrable

- Les fichiers sources de CAO électronique des PCB réalisés
- Tout le nécessaire à fabriquer un exemplaire hardware de chaque :
- fichiers de fabrication (GERBER) / liste de pièces avec références pour commande / implantation
- Prototype fonctionnel
- Modifications / dessins mécaniques, etc
- Les fichiers sources de programmation microcontrôleur (.c / .h)
- Tout le nécessaire pour programmer les microcontrôleurs (logiciel ou fichier .hex)
- Un calcul / estimation des coûts
- Un rapport contenant les calculs - dimensionnement de composants - structogramme, etc.

2 Pré-étude

2.1 Fonctionnement du système

Le microcontrôleur interagît avec 4 périphériques principaux : Avec le GNSS, il partage une communication qui lui permet d'obtenir les informations de localisation par le biais de plusieurs systèmes de satellites. Il y a ensuite, la centrale inertielle qui lui donne accès de une multitude de mesures sur 9 axes, or, ici les mesures gyroscopiques et d'accélération sont exploitées. La carte SD, permet quant-à-elle, de stocker toutes ces données pour avoir minimum les information des 15 dernières minutes de vol. Le dernier périphériques principale FTDI, permet d'avoir une interface avec un ordinateur via connexion USB-C.

2.2 Schéma bloc

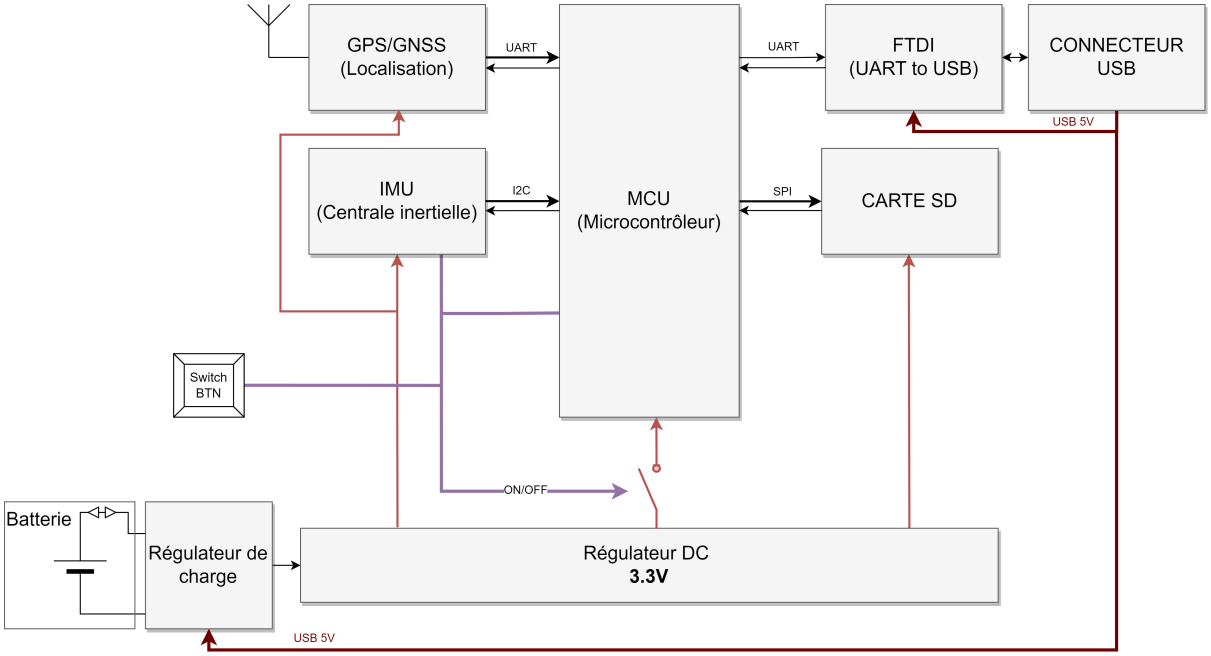


FIGURE 4 – Schéma bloc
Source: Auteur

2.3 Description des blocs

Bloc	Description
GNSS.	Récepteur Radio-fréquence. (RF) avec antenne interne/externe et communication UART.
Microcontrôleur. (MCU).	Microcontrôleur PIC32, intelligence du système, basse consommation.
IMU.	Centrale inertielle, accélération, gyroscope...
Carte SD	Stockage des données de vol.
FTDI.	Convertis la communication USB en série.
Régulateurs.	Le régulateur de charge gère la charge de l'accu. et un régulateur 3.3V le suit.
Batterie.	La batterie est un accu que l'on peut charger par USB et permet une bonne autonomie.

2.4 Choix des composants et technologies

L'objectif de la pré-étude consiste en grande partie à sélectionner méthodiquement les technologies et les composants du projet. Cette partie du travail est essentielle et critique.

2.4.1 Microcontrôleur

Le microcontrôleur nécessite au minimum les périphériques suivants :
2 UART | 1 SPI | 1 I2C
Il est préférable que le MCU dispose de différentes configurations de gestion de puissance, notamment des modes d'économie d'énergie, afin d'avoir une maîtrise de la consommation et de permettre une meilleure autonomie. Enfin, le standard de l'école veut que les familles de microcontrôleurs PIC32 (Microchip) sont préférées.

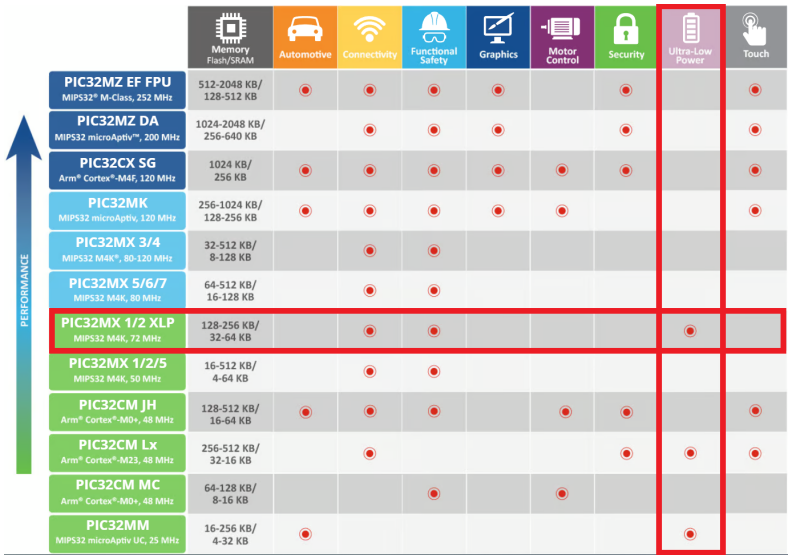
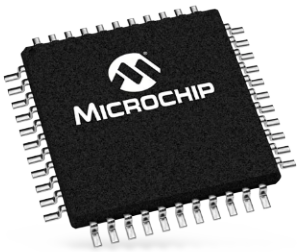


FIGURE 5 – Familles PIC32
Source: Microchip, familles

Sur la figure 5 le MCU sélectionné appartient à la gamme MX (Baseline performance-mémoire) et à la famille XLP qui offre notamment la fonctionnalité "Ultra low power" qui est celle qui nous intéresse.

PIC32MX274F256D



PINS : 44		Fsys : 72 MHZ	
UART : 2		Cons. : 25 mA	
SPI/i2C : 2			
Ext. Int. : 5			
Timers : 5			

FIGURE 6 – Caractéristiques du PIC32 choisi
Source: Auteur

2.4.2 Centrale inertielle

Pour la centrale inertielle, il existe un composant avec lequel j'ai déjà acquis une certaine expérience et eu l'occasion d'utiliser et de créer des librairies pour le firmware en C. Celui-ci est performant et très utilisé dans l'industrie. Il est hautement configurable et a le grand avantage de calculer déjà une fusion de capteurs ainsi qu'une compensation de la dérive par les mesures de température. Cela permet notamment d'accéder à des données plus poussées, telles que les quaternions et les angles d'Euler. Il s'agit du BNO055 de BOSCH.

Caractéristiques importantes :

Résolution gyroscope	:	16	[bits]
Résolution accéléromètre	:	14	[bits]
Résolution magnétomètre	:	∼0.3	[μT]
I_{DD}	:	12.3	[mA]
Dérive de température	:	± 0.03	[%/K]
Dérive accéléromètre	:	0.2	[%/V]
Dérive gyroscope	:	<0.4	[%/V]

Afin de simplifier l'implémentation de ce composant dans le projet, sachant qu'il s'agit d'un boîtier de composant difficile à souder ou à mettre au four, il est possible d'utiliser la carte miniature d'Adafruit, cette carte comprend tous les composants passifs requis. Cela facilite ainsi son montage sur le PCB.

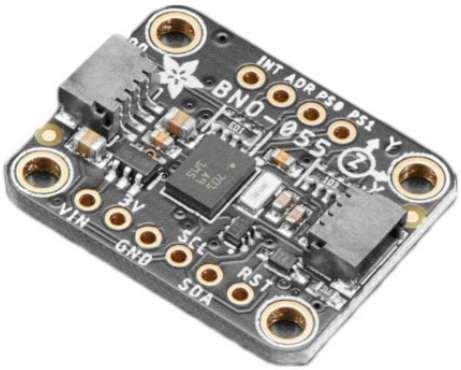


FIGURE 7 – Carte d'extension, centrale inertielle
Source: Digikey, 4646

Données disponibles :

Température	
Vecteur gravité	XYZ
Orientation compensées, quaternion	WXYZ
Orientation compensée, angle de Euler	HPR
Données gyroscopiques	XYZ
Intensité du champ magnétique	XYZ
Accélération	XYZ

TABLE 1 – Liste des données accessibles

2.4.3 GPS / GNSS

Pour le GPS/GNSS, différents critères entrent en jeu dans le cadre de ce projet : le prix, la facilité d'implémentation, la complexité (par complexité, nous entendons le nombre de fonctionnalités), la consommation et la performance.

Il existe un très grand nombre de récepteurs RF pour la navigation. Parmi les plus utilisés dans l'industrie, dont l'implémentation est la plus simple et la documentation la plus complète, il y a plusieurs gammes chez le fabricant ublox. Deux composants ont principalement été pris en considération : Le **CAM-M8C-0** (BeiDou, GLONASS, GNSS, GPS, QZSS) avec une antenne omnidirectionnelle interne au composant et différents modes de puissance, ainsi que le **MAX-M10M-00B** (BeiDou, Galileo, GLONASS, GNSS, GPS) sans antenne interne mais avec une consommation de base plus faible.

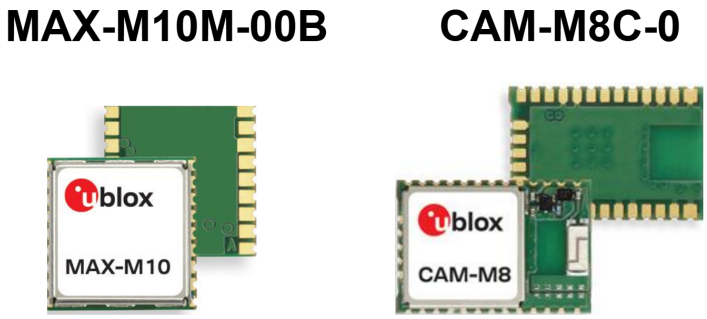


FIGURE 8 – Illustration des deux GNSS
Source: Digikey

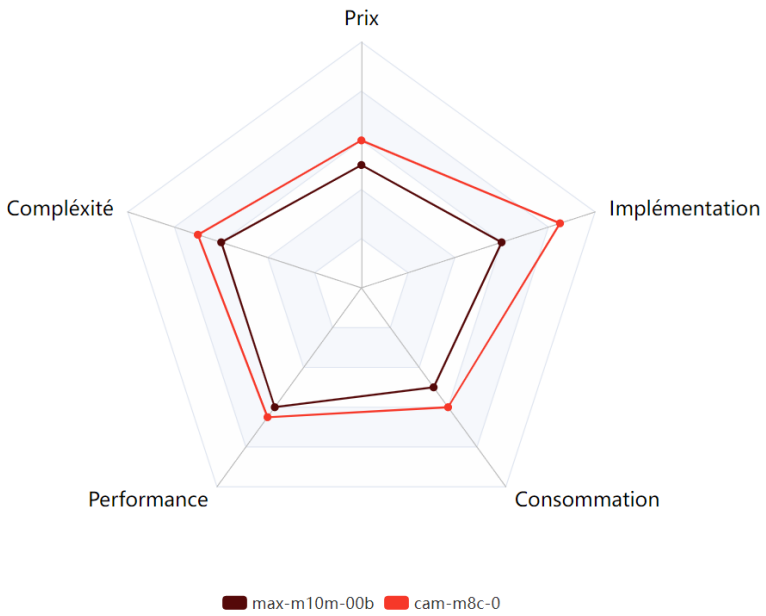


FIGURE 9 – Comparaison GNSS
Source: Auteur

Malgré les différents avantages que présente le MAX-M10M-00B sur la figure 9, le choix s'est porté sur CAM-M8C-0 grâce à sa facilitée d'implémentation et à la garantie du fabricant sur son antenne omnidirectionnelle de qualité.

2.4.4 Carte SD

Les pilotes de carte SD disponibles dans Harmony ne permettent pas une gestion des capacités de stockage trop importantes. Cela signifie, que nous ne pouvons pas avoir des cartes SD de trop grandes capacités, c'est pour cela que nous allons baser nos dimensionnements sur une carte de **256MB**.

FIGURE 10 – Illustration carte SD
Source: https://www.oempcworld.com/OEMPCworld-com/017045.html

Estimation de la capacité Admettons les paramètres suivants où S représente une taille de données et T un temps :

S_{SD}	256	$[KB]$
S_{gyro}	16	$[Bytes]$
S_{accel}	16	$[Bytes]$
S_{gnss}	~ 100	$[Bytes]$
$T_{inertiel}$	0.5	$[s]$
T_{gnss}	5	$[s]$
T_{mesMin}	900	$[s]$

Nous pouvons déduire la taille mémoire que prendra 5 secondes d'enregistrement avec les paramètres par défaut du système :

$$S_{single} = \frac{T_{gnss}}{T_{inertiel}}(S_{gyro} + S_{accel}) + S_{gnss} = \frac{5}{0.5}(16+16) + 100 = 420\ [Bytes]$$

Nous pouvons enfin calculer à partir de cela, la taille mémoire que prendra 15 minutes d'enregistrement :

$$S_{mesures} = \frac{S_{single}}{T_{gnss}} * T_{mesMin} = \frac{420}{5} * 900 = 75'600\ [Bytes] = 75.6\ [KB]$$

Nous pouvons déduire avec cette estimation qu'une carte SD de 256MB est largement suffisante et permet de mesurer jusqu'à un temps calculable de cette façon :

$$T_{mesures} = \frac{S_{SD} * T_{gnss}}{S_{single}} = \frac{256'000 * 5}{420} =\sim 508\ Minutes =\sim 8.5\ Heures$$

Nous estimons donc, que les données de vol des 8.5 dernières heures sont enregistrées dans la carte SD.

2.5 Batterie, autonomie, charge et régulation

Afin de dimensionner une batterie pour le projet, il faut considérer les différentes consommation :

Liste des consommations principales

Microcontrôleur	24	[mA]	Typ.
Carte-SD	100	[mA]	Max.
Carte-SD	60	[mA]	Moyenne
IMU	12.3	[mA]	Typ.
GNSS	71	[mA]	Max.
GNSS	29	[mA]	Typ.
Totale max	207.3	[mA]	Max.
Totale moyennes	125.3	[mA]	Moyenne

TABLE 2 – Tableau des consommations de courant

En examinant les consommations typiques et moyennes du tableau 2 à régime constant, et en visant une autonomie de **10 heures**, nous aurions besoin d'une batterie d'une capacité de **1253 mAh**.

Technologies Concernant la technologie de la batterie, notre objectif, dans un souci d'ergonomie, est de permettre son chargement via un connecteur USB. La technologie offrant actuellement la meilleure densité d'énergie est le Lithium Ion [1]. Elle présente cependant des inconvénients, énumérés dans le tableau 3.

Avantages	Inconvénient
Haute densité d'énergie	Risque d'éclatement
Poids léger	Risque d'enflammement avec l'eau
Haute durée de vie	Sensible a la température
Charge rapide	Décharge complète altérante

TABLE 3 – Tableau avantages/inconvénient LI-ION

Les inconvénients listés dans le tableau 3 posent un risque pour l'intégrité des données de la carte-SD. C'est pourquoi il est essentiel de bien dimensionner le boîtier ainsi que l'intégration du circuit et de la batterie pour pallier ces dangers. Malgré les risques du Li-Ion, il s'agit d'une technologie très utilisée, y compris dans des domaines sensibles.

1. https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html

Choix de la batterie La batterie doit avoir une capacité d'au moins **1260 mAh** et être suffisamment compacte pour être intégrée dans un boîtier de petite taille. Une batterie répond à ces critères : il s'agit de la **PICPAL36** de chez Farnell[2]. Les dimensions et caractéristiques de cette batterie sont visibles sur les figures 11 et 12.

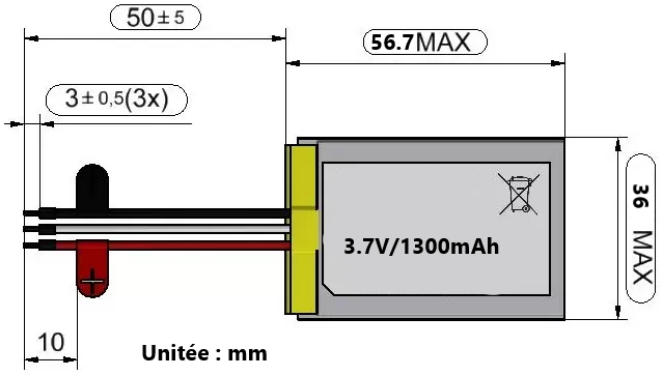


FIGURE 11 – Dimension de la batterie
Source: Auteur

Battery Voltage:	3.7V	External Width:	6.5mm
Battery Technology:	Lithium Ion	Pack Quantity:	1
Battery Capacity:	1.3Ah	External Depth:	35mm
Battery Terminals:	Connector	Weight:	27g
Battery Size Code:	-	Battery IEC Code:	-
External Diameter:	-	Battery NEDA Code:	-
External Height:	55.7mm	Product Range:	-

FIGURE 12 – Caractéristiques de la batterie

Régulateur de charge Le choix du régulateur de charge s'est orienté vers un composant déjà utilisé par l'école, dont les caractéristiques et le montage sont bien connus. C'est un composant performant et fréquemment employé. De plus, il est disponible dans le stock de composants de l'école. Il s'agit du **MCP73871T-2CCI/ML**. Il est configurable et permet la charge des batteries Li-ion et Li-po.

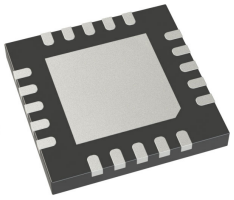


FIGURE 13 – MCP73871T-2CCI/ML
Source: Digikey IC BATT CHG LI-ION 1CELL 20QFN

2. Distributeur de composants électroniques.

2.6 Systèmes d'économie d'énergies

Au-delà des 10 heures d'autonomie estimées, il est envisageable, pour maximiser le temps de logging, d'adopter des mécanismes d'économie d'énergie. Ces mécanismes pourraient être :

• **Modes de puissance du PIC32** Le microcontrôleur peut basculer entre différents modes de puissance où il réduit à la fois sa consommation et ses fonctionnalités. On pourrait envisager de passer en mode d'énergie restreinte entre les périodes d'enregistrement ou de limiter l'utilisation de certains périphériques.

• **Modes de puissance du GNSS** À l'instar du MCU, le composant de navigation dispose de plusieurs modes de fonctionnement qui permettent d'économiser de l'énergie. Un mode particulièrement utile permet de limiter sa cadence de données à 1Hz, étant donné qu'il n'est pas nécessaire qu'il fournisse des informations de localisation aussi fréquemment.

• **Alimentation du GNSS** On pourrait également envisager de ne pas alimenter le GNSS lorsqu'il n'est pas en service, afin de supprimer complètement sa consommation entre chaque mesure.

• **Modes de puissance IMU** La centrale inertielle dispose également de différents modes. Ces modes permettent, par exemple, de limiter les mesures à certains axes ou de la mettre en veille. Elle se met d'ailleurs automatiquement en veille après un certain temps entre les mesures. Ces modes peuvent être utilisés efficacement.

○ **Alimentation de la carte SD** Il est envisageable d'éteindre entièrement la carte SD entre les écritures. Cependant, étant donné que les écritures seront fréquentes, l'intérêt de cette démarche est limité.

• **Mise en veille automatique du système** Si aucun mouvement n'est détecté après un certain délai, il est envisageable que le système s'éteigne entièrement.

2.7 Diagramme des états du système

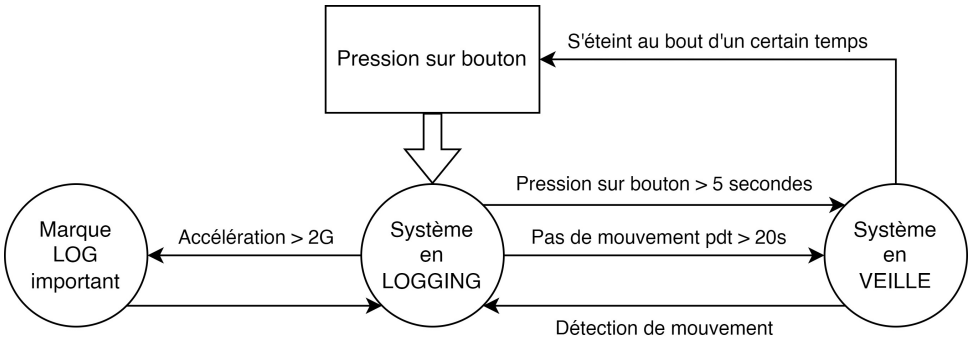


FIGURE 14 – Diagrammes des états (Sans USB)
Source: Auteur

Sur la figure 14 les états de communication par le port USB ne sont pas représentés, il s'agit des modes principaux.

2.8 Estimation des coûts

À partir des composants et des technologies définis lors de la pré-étude, nous pouvons estimer un coût pour le projet. Cette estimation est présentée dans le tableau 4.

Estimation des coût

Élément	Prix estimé
Circuit imprimé. (PCB)	60.-
Batterie	36.-
IMU	26.-
GNSS	24.-
Boîtier	20.-
Composants divers	15.-
MCU	6.-
Régulateurs	6.-
USB & FTDI	3.-
Total	196.-

TABLE 4

Cette estimation est relativement élevée. Il est à noter que le coût du PCB pourrait être réduit en cas de commande groupée dans un panel [3]. Par ailleurs, les prix du boîtier et des composants semblent également être assez élevés.

3 Conclusion de la Pré-étude

Fonctionnement du système : La conception du système semble possible, le microcontrôleur s'interface avec quatre périphériques essentiels : un GNSS pour la localisation, une centrale inertielle pour des mesures sur 9 axes (priorisant les mesures gyroscopiques et d'accélération), une carte SD pour le stockage (conservant au moins 15 minutes de données de vol), et un périphérique FTDI pour l'interface avec un ordinateur via USB-C.

Choix des composants et technologies :

— *Microcontrôleur* : Requiert au moins 2 UART, 1 SPI, et 1 I2C. Le PIC32MX274F256D est privilégié car il offre divers modes d'économie d'énergie.

— *Centrale inertielle* : Le BNO055 de BOSCH a été choisi, car il offre une variété de mesures avancées et une facilité d'implémentation grâce à la carte Adafruit.

— *GPS/GNSS* : Le CAM-M8C-0 d'ublox a été retenu pour sa facilité d'implémentation et son antenne interne omnidirectionnelle.

— *Carte SD* : Une capacité de 256MB a été choisie à cause des limites du pilote. Une telle carte permettrait d'enregistrer jusqu'à 8,5 heures de données de vol.

— *Batterie, charge, et régulation* : Une capacité de 1253 mAh est nécessaire pour atteindre l'autonomie souhaitée de 10 heures. Une batterie compact de 1300 mAh a été retenue.

Estimation des coûts : L'estimation totale pour le projet s'élève à environ 196 CHF. Néanmoins, il existe des possibilités d'économie, en particulier par une commande groupée du PCB.

En conclusion, cette pré-étude a décortiqué le projet de façon méthodique pour sélectionner les composants et technologies appropriés. Elle a également fourni des estimations de coûts et identifié des mécanismes d'économie d'énergie potentiels. La prochaine étape consistera à entamer la phase de conception en utilisant ces informations utiles.

3. Regroupement de plusieurs circuits imprimés en un seul, pour diminuer le coût.

4 Développement de la schématique

4.1 Dimensionnements

4.1.1 Autonomie du système

4.1.2 Adaptation mécanique

4.1.3 Bus de communications

4.1.4 Interface

4.1.5 Périphériques

4.1.6 Chargeur de batterie

4.1.7 Synthèse et perspectives de l'étude

5 Développement du PCB

5.1 Bill of materials

5.2 Mécanique du projet

5.3 Placement des composants

5.4 Mécanique du PCB

5.5 Routage

6 Développement firmware

7 Validation du design

7.1 Liste de matériel

7.2 Contrôle des alimentations

Méthode de mesure

Mesures

7.3 Communication UART

Méthode de mesure

Mesures

7.4 Communication SPI, carte SD

Méthode de mesure

Mesures

8 Caractéristiques du produit fini

9 Conclusion

10 Bibliographie

Références

[1] P. Kordowski, Z. Jakielaszek, M. Nowakowski, and A. Panas, "Miniaturized flight data recorder for unmanned aerial vehicles and ultralight aircrafts," in *2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, pp. 484–488, 2018.

11 Annexes