

ÉCOLE DES MÉTIERS DE LAUSANNE  
ÉCOLE 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

8 août 2023



# Table des matières

<b>Acronymes</b>	<b>4</b>
<b>Glossaire</b>	<b>4</b>
<b>1 Cahier des charges</b>	<b>5</b>
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
<b>2 Pré-étude</b>	<b>8</b>
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
2.5 Systèmes d'économies d'énergie . . . . .	12
2.6 Estimation des coûts . . . . .	12
<b>3 Développement de la schématique</b>	<b>12</b>
3.1 Dimensionnements . . . . .	12
3.1.1 Autonomie du système . . . . .	12
3.1.2 Adaptation mécanique . . . . .	12
3.1.3 Bus de communications . . . . .	12
3.1.4 Interface . . . . .	12
3.1.5 Périphériques . . . . .	12
3.1.6 Chargeur de batterie . . . . .	12
3.1.7 Synthèse et perspectives de l'étude . . . . .	12
<b>4 Développement du PCB</b>	<b>12</b>
4.1 Bill of materials . . . . .	12
4.2 Mécanique du projet . . . . .	12
4.3 Placement des composants . . . . .	12
4.4 Mécanique du PCB . . . . .	12
4.5 Routage . . . . .	12
<b>5 Développement firmware</b>	<b>12</b>
<b>6 Validation du design</b>	<b>12</b>
6.1 Liste de matériel . . . . .	12
6.2 Contrôle des alimentations . . . . .	12
6.3 Communication UART . . . . .	12
6.4 Communication SPI, carte SD . . . . .	13

<b>7</b>	<b>Caractéristiques du produit fini</b>	<b>13</b>
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>14</b>
<b>9</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>15</b>
<b>10</b>	<b>Annexes</b>	<b>16</b>

## Acronymes

**MCU** microcontrôleur.

**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** Enregistrement 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.



# 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 boîtier compact.

- Développement schématique
  - Fonctionnement MCU.
  - Périphériques de mesures et de sauvegarde / Bus de communication.
  - Gestion batterie
- Routage pour intégration dans boîtier 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

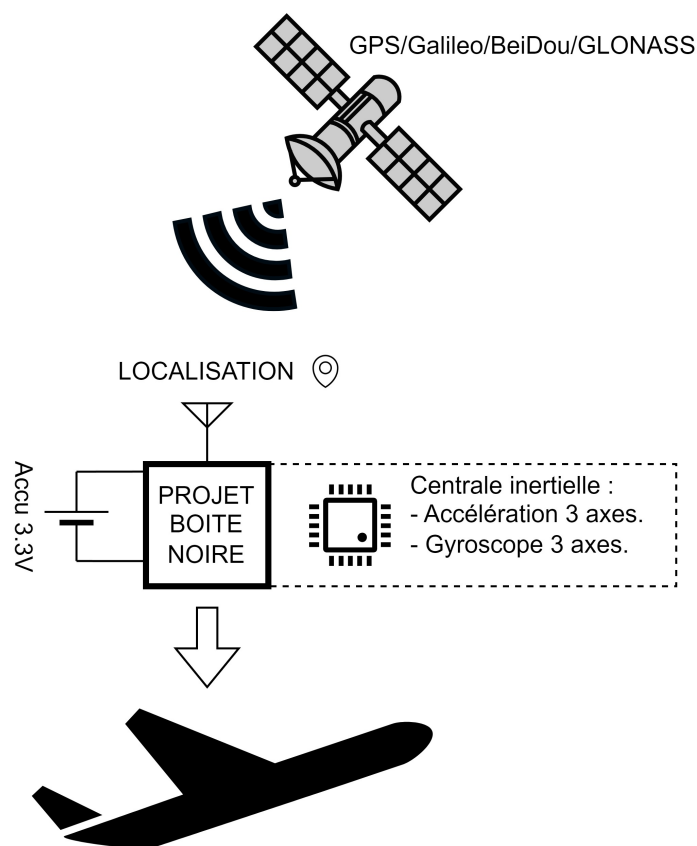


FIGURE 1 – Schéma de principe

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

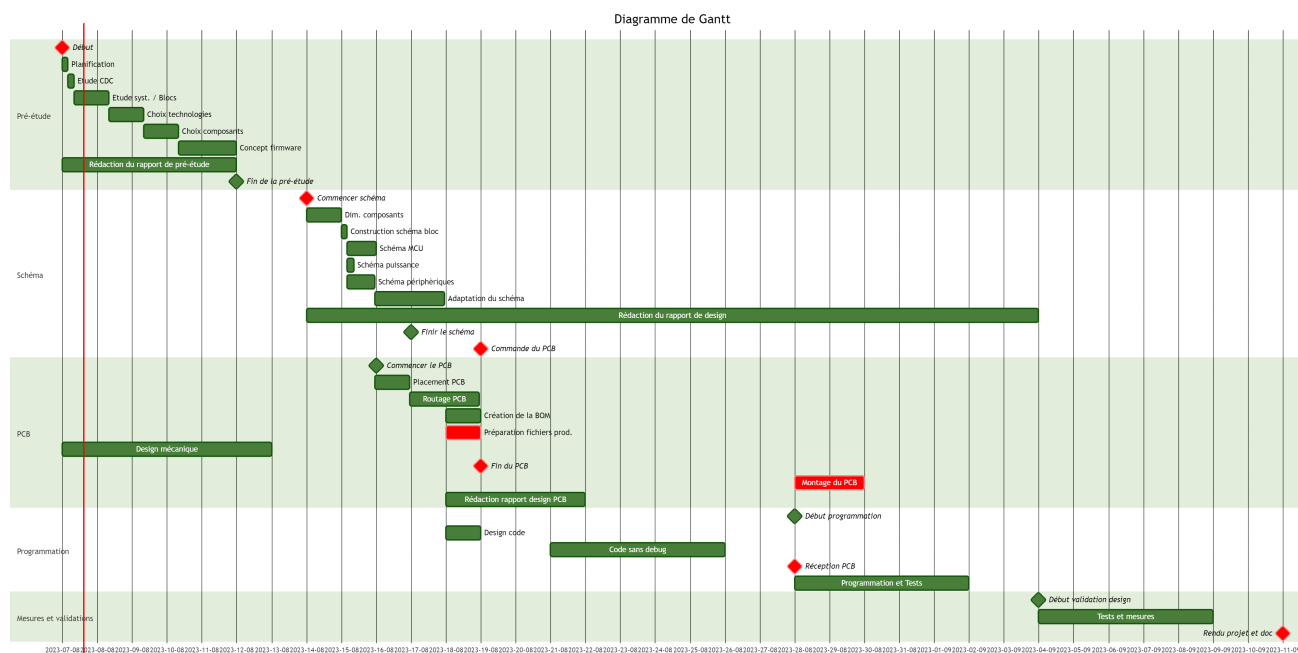


FIGURE 2 – Planification - Diagramme de gantt

Source: Auteur

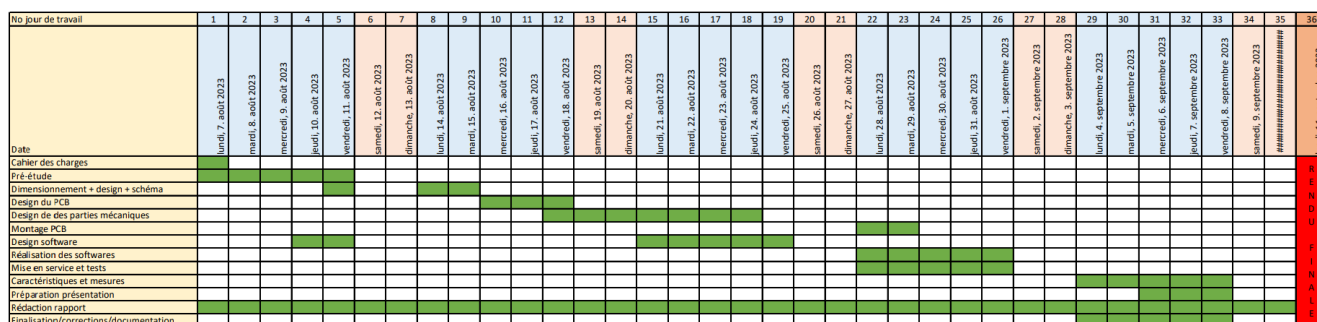


FIGURE 3 – Planification théorique

## 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

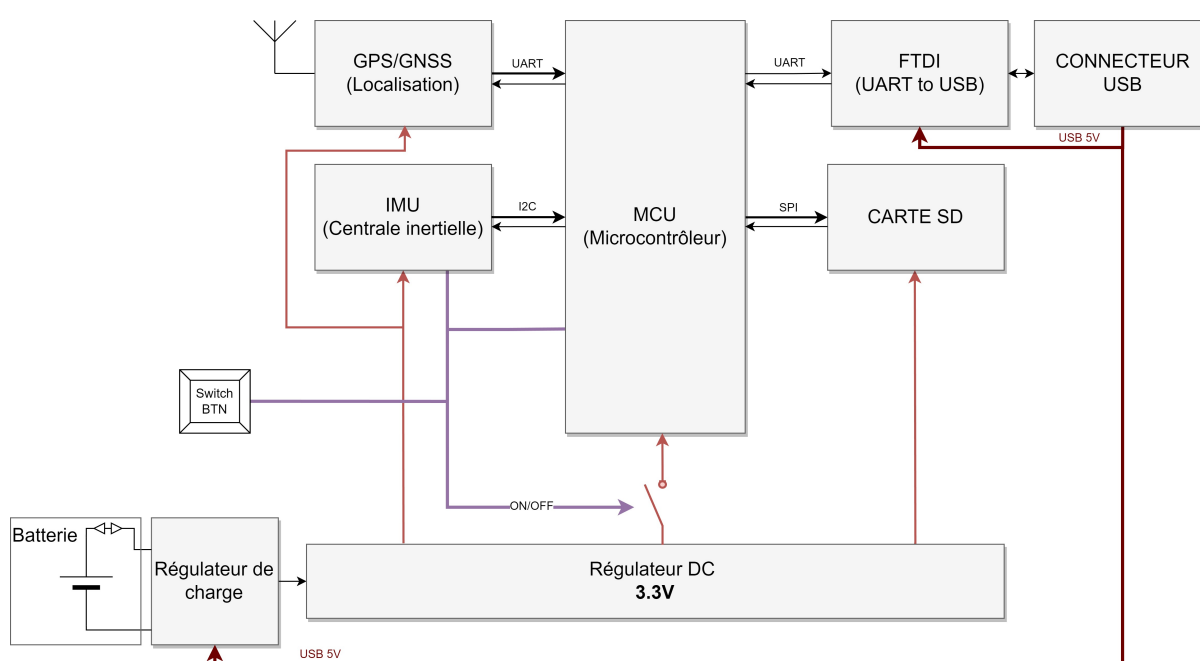


FIGURE 4 – Schéma bloc

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.

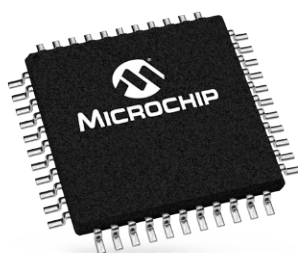
	Memory Flash/SRAM	Automotive	Connectivity	Functional Safety	Graphics	Motor Control	Security	Ultra-Low Power	Touch
<b>PIC32MZ EF FPU</b> MIPS32* M-Class, 252 MHz	512-2048 KB/ 128-512 KB								
<b>PIC32MZ DA</b> MIPS32 microAptiv™, 200 MHz	1024-2048 KB/ 256-640 KB								
<b>PIC32CX SG</b> Arm® Cortex®-M4F, 120 MHz	1024 KB/ 256 KB								
<b>PIC32MK</b> MIPS32 microAptiv, 120 MHz	256-1024 KB/ 128-256 KB								
<b>PIC32MX 3/4</b> MIPS32 M4K®, 80-120 MHz	32-512 KB/ 8-128 KB								
<b>PIC32MX 5/6/7</b> MIPS32 M4K, 80 MHz	64-512 KB/ 16-128 KB								
<b>PIC32MX 1/2 XLP</b> MIPS32 M4K, 72 MHz	128-256 KB/ 32-64 KB								
<b>PIC32MX 1/2/5</b> MIPS32 M4K, 50 MHz	16-512 KB/ 4-64 KB								
<b>PIC32CM JH</b> Arm® Cortex®-M0+, 48 MHz	128-512 KB/ 16-64 KB								
<b>PIC32CM Lx</b> Arm® Cortex®-M23, 48 MHz	256-512 KB/ 32-16 KB								
<b>PIC32CM MC</b> Arm® Cortex®-M0+, 48 MHz	64-128 KB/ 8-16 KB								
<b>PIC32MM</b> MIPS32 microAptiv UC, 25 MHz	16-256 KB/ 4-32 KB								

FIGURE 5 – Familles PIC32

Source: <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/32-bit-mcus/pic32-32-bit-mcus>

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 bibliothèques 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	: $\sim 0.3$	[ $\mu$ T]
$I_{DD}$	: 12.3	[mA]
Dérive de température	: $\pm 0.03$	[%/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.

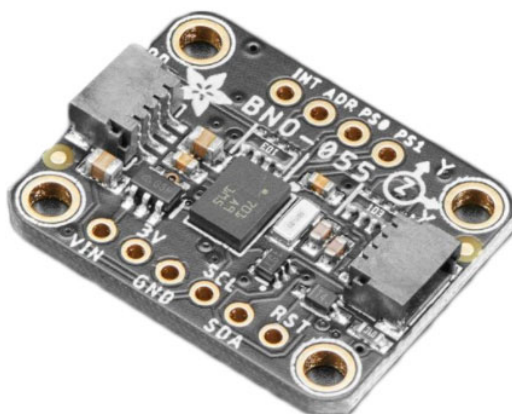


FIGURE 7 – Carte d'extension, centrale inertielle

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

### 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, on entend le nombre de fonctionnalités), la consommation et la performance.

Il existe de très nombreux 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 existe plusieurs gammes chez le fabricant [ublox](#). Deux sont principalement entrés en considérations : Le **CAM-M8C-0** (BeiDou, GLONASS, GNSS, GPS, QZSS) avec antenne omnidirectionnelle interne au composant et différents mode de puissance. Ainsi que le **MAX-M10M-00B** (BeiDou, Galileo, GLONASS, GNSS, GPS) sans antenne interne mais plus faible consommation de base.

#### MAX-M10M-00B

#### CAM-M8C-0

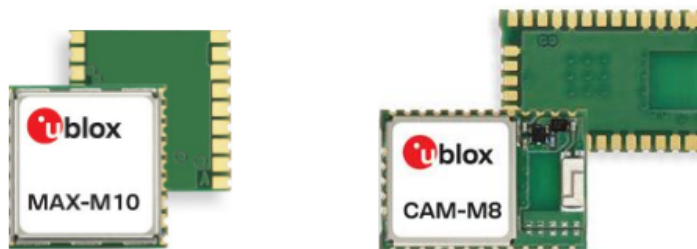


FIGURE 8 – Illustration des deux GNSS

Source: Digikey

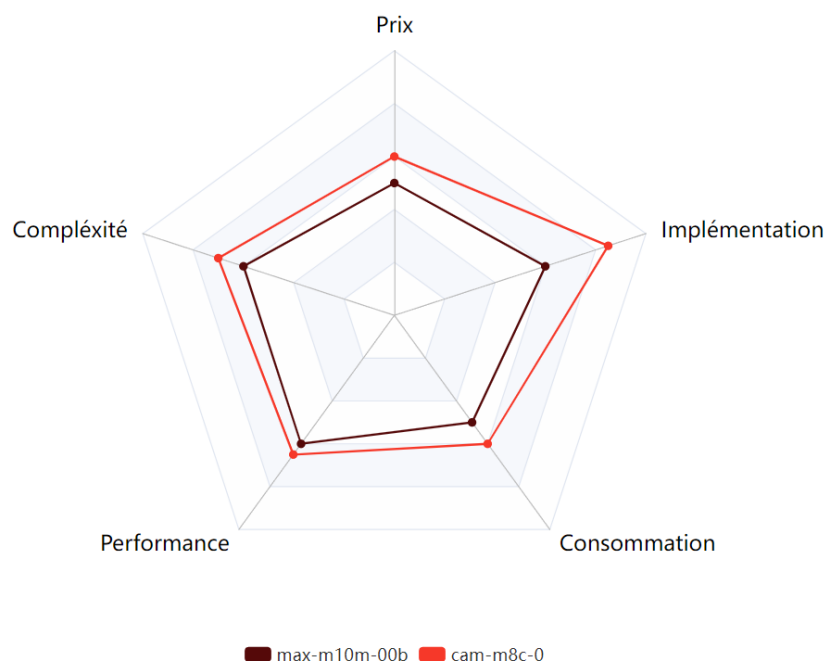


FIGURE 9 – Comparaison GNSS

Source: Auteur

### Batterie, charge et régulation

## **2.5 Systèmes d'économies d'énergie**

Dans le but de maximiser le temps de logging, des mécanismes d'économies d'énergie doivent être mis en place.

## **2.6 Estimation des coûts**

# **3 Développement de la schématique**

## **3.1 Dimensionnements**

### **3.1.1 Autonomie du système**

### **3.1.2 Adaptation mécanique**

### **3.1.3 Bus de communications**

### **3.1.4 Interface**

### **3.1.5 Périphériques**

### **3.1.6 Chargeur de batterie**

### **3.1.7 Synthèse et perspectives de l'étude**

# **4 Développement du PCB**

## **4.1 Bill of materials**

## **4.2 Mécanique du projet**

## **4.3 Placement des composants**

## **4.4 Mécanique du PCB**

## **4.5 Routage**

# **5 Développement firmware**

# **6 Validation du design**

## **6.1 Liste de matériel**

## **6.2 Contrôle des alimentations**

Méthode de mesure

Mesures

## **6.3 Communication UART**

Méthode de mesure

Mesures

## **6.4 Communication SPI, carte SD**

Méthode de mesure

Mesures

## **7 Caractéristiques du produit fini**

## **8 Conclusion**

## 9 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.



## **10 Annexes**