

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

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
2.4.5 Batterie, charge et régulation	13
2.5 Systèmes d'économies d'énergie	13
2.6 Estimation des coûts	13
3 Développement de la schématique	13
3.1 Dimensionnements	13
3.1.1 Autonomie du système	13
3.1.2 Adaptation mécanique	13
3.1.3 Bus de communications	13
3.1.4 Interface	13
3.1.5 Périphériques	13
3.1.6 Chargeur de batterie	13
3.1.7 Synthèse et perspectives de l'étude	13
4 Développement du PCB	13
4.1 Bill of materials	13
4.2 Mécanique du projet	13
4.3 Placement des composants	13
4.4 Mécanique du PCB	13
4.5 Routage	13
5 Développement firmware	13

6	Validation du design	13
6.1	Liste de matériel	13
6.2	Contrôle des alimentations	13
6.3	Communication UART	14
6.4	Communication SPI, carte SD	14
7	Caractéristiques du produit fini	14
8	Conclusion	15
9	Bibliographie	16
10	Annexes	17

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.

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 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

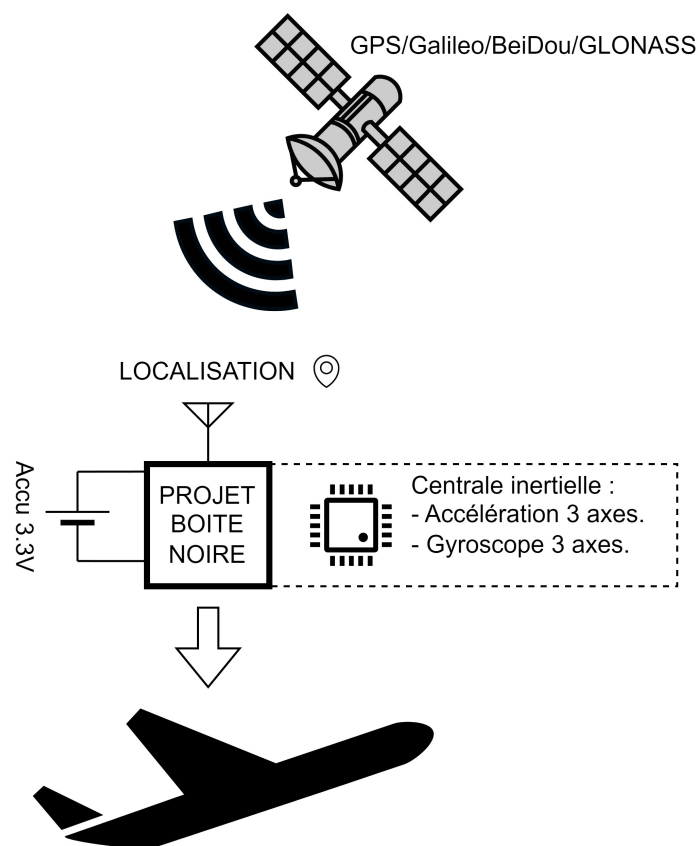


FIGURE 1 – Schéma de principe

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

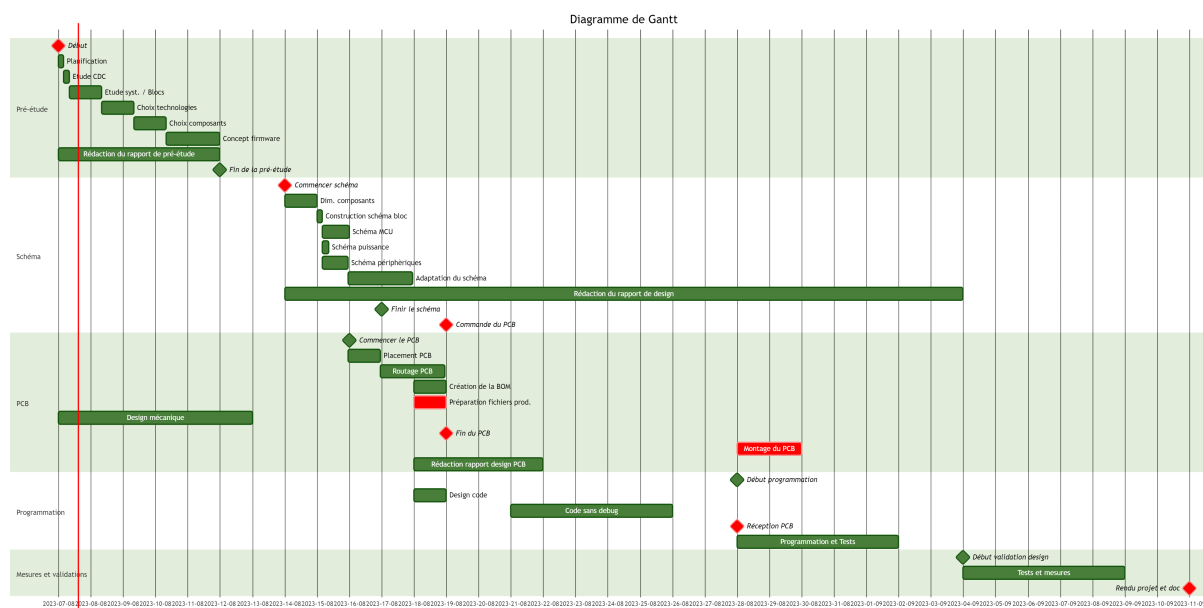


FIGURE 2 – Planification - Diagramme de gantt

Source: Auteur

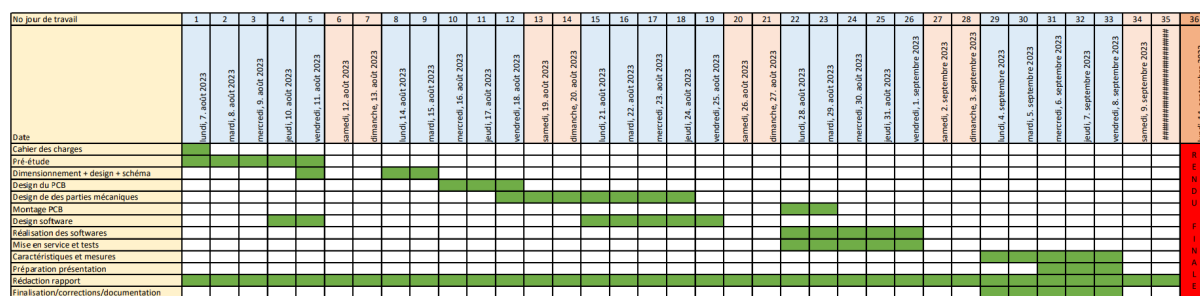


FIGURE 3 – Planification théorique

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

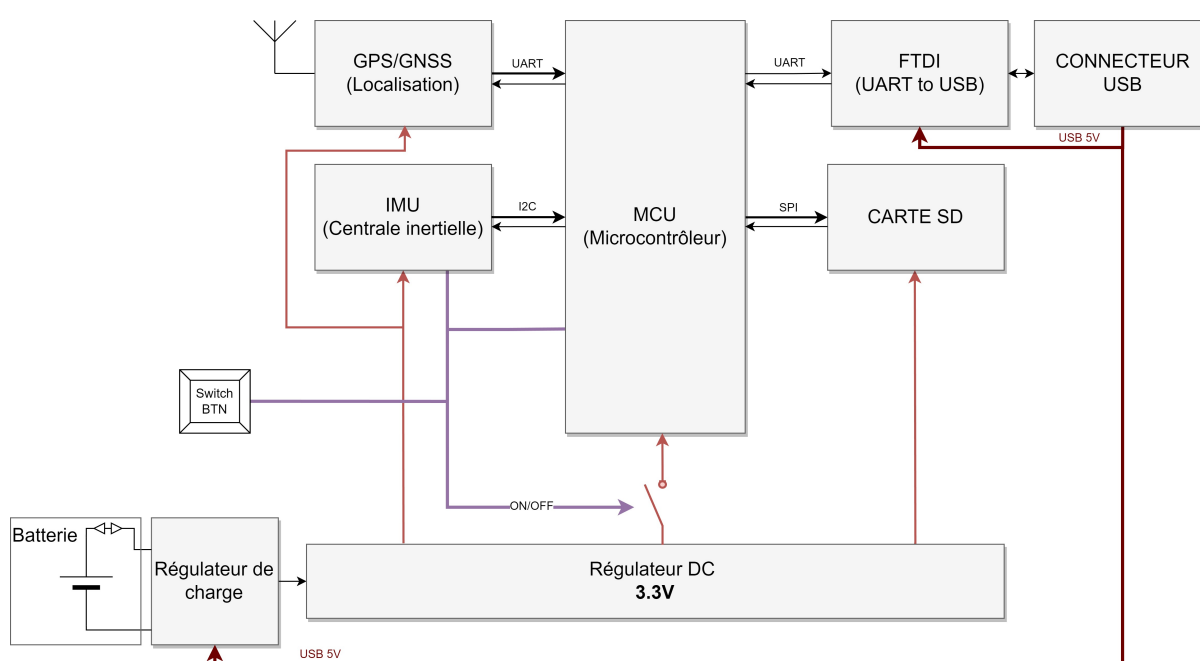


FIGURE 4 – Schéma bloc

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.

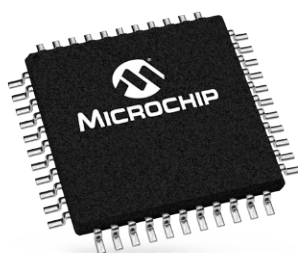
	Memory Flash/SRAM	Automotive	Connectivity	Functional Safety	Graphics	Motor Control	Security	Ultra-Low Power	Touch
PIC32MZ EF FPU MIPS32* M-Class, 252 MHz	512-2048 KB/ 128-512 KB								
PIC32MZ DA MIPS32 microAptiv™, 200 MHz	1024-2048 KB/ 256-640 KB								
PIC32CX SG Arm® Cortex®-M4F, 120 MHz	1024 KB/ 256 KB								
PIC32MK MIPS32 microAptiv, 120 MHz	256-1024 KB/ 128-256 KB								
PIC32MX 3/4 MIPS32 M4K®, 80-120 MHz	32-512 KB/ 8-128 KB								
PIC32MX 5/6/7 MIPS32 M4K, 80 MHz	64-512 KB/ 16-128 KB								
PIC32MX 1/2 XLP MIPS32 M4K, 72 MHz	128-256 KB/ 32-64 KB								
PIC32MX 1/2/5 MIPS32 M4K, 50 MHz	16-512 KB/ 4-64 KB								
PIC32CM JH Arm® Cortex®-M0+, 48 MHz	128-512 KB/ 16-64 KB								
PIC32CM Lx Arm® Cortex®-M23, 48 MHz	256-512 KB/ 32-16 KB								
PIC32CM MC Arm® Cortex®-M0+, 48 MHz	64-128 KB/ 8-16 KB								
PIC32MM 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	: ~ 0.3	[μ T]
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.

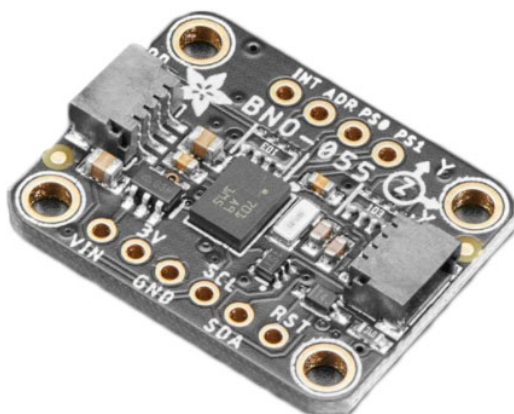


FIGURE 7 – Carte d'extension, centrale inertielle

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

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.

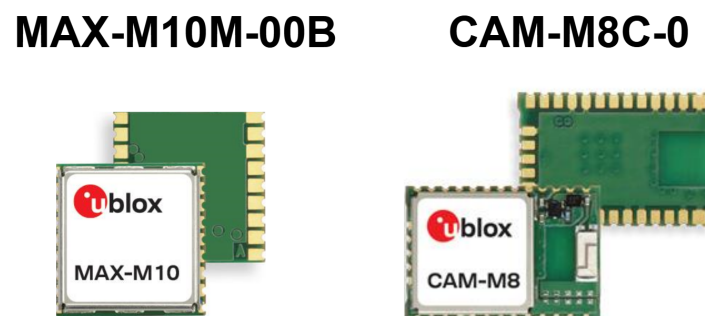


FIGURE 8 – Illustration des deux GNSS

Source: Digikey

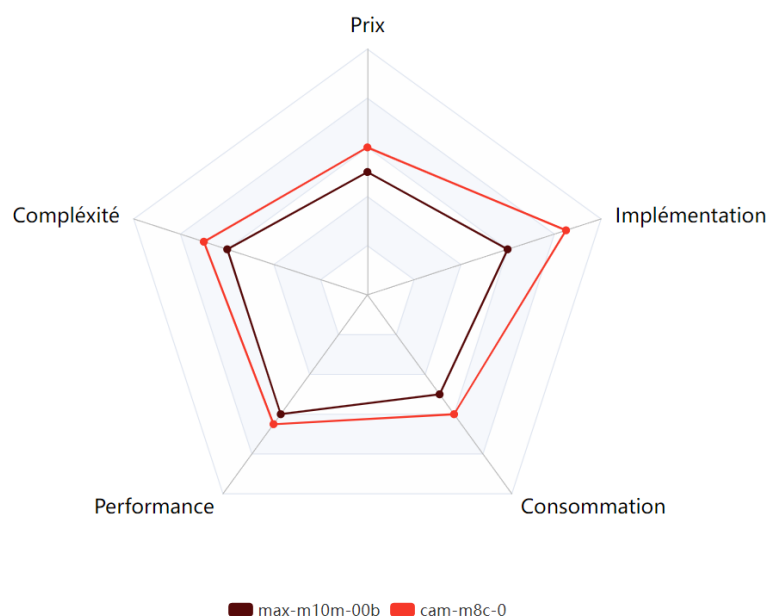


FIGURE 9 – Comparaison GNSS

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}	~ 16	[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 :

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

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

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

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 :

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

Nous pouvons estimer que les 8.5 dernières heures de vols sont enregistrées dans la carte SD.

2.4.5 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