

1924B Mini Boîte Noire

Enregistreur de données de vol

Ali Zoubir

5 octobre 2023

ETML-ES



Sommaire

Introduction

Pré-étude

Développement schématique

Développement du PCB

Développement du firmware

Validation du design

Conclusion

Introduction

Introduction

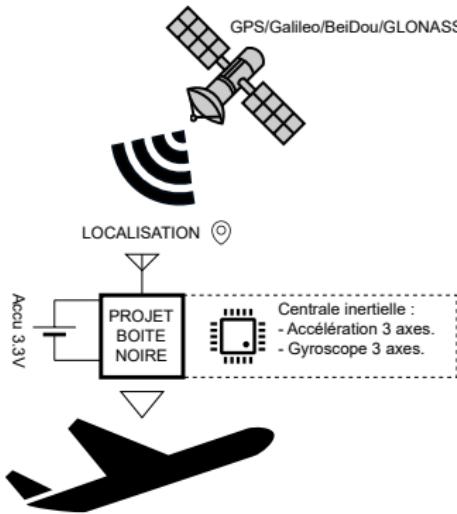


Figure 1 – Boîte noire

Les enregistreurs de données de vol jouent un rôle crucial dans la sécurité aérienne et la compréhension des phénomènes aéronautiques en capturant de manière inaltérable des informations vitales.

Ce projet a pour but la collecte et le stockage des données de mesures et de **localisation** d'un aéronef au moyen d'une centrale **inertielle** et d'un système de positionnement GPS/GNSS.

Principe



- Données de localisation, trajectoire.
- Accéléromètre et Gyroscope.
- Miniaturisation.
- Bonne autonomie / Low power.
- Configuration des temps de sauvegardes.
- Charge, lecture et configuration par USB-C.

Figure 2 – Schéma de principe.

Pré-étude

Schéma bloc

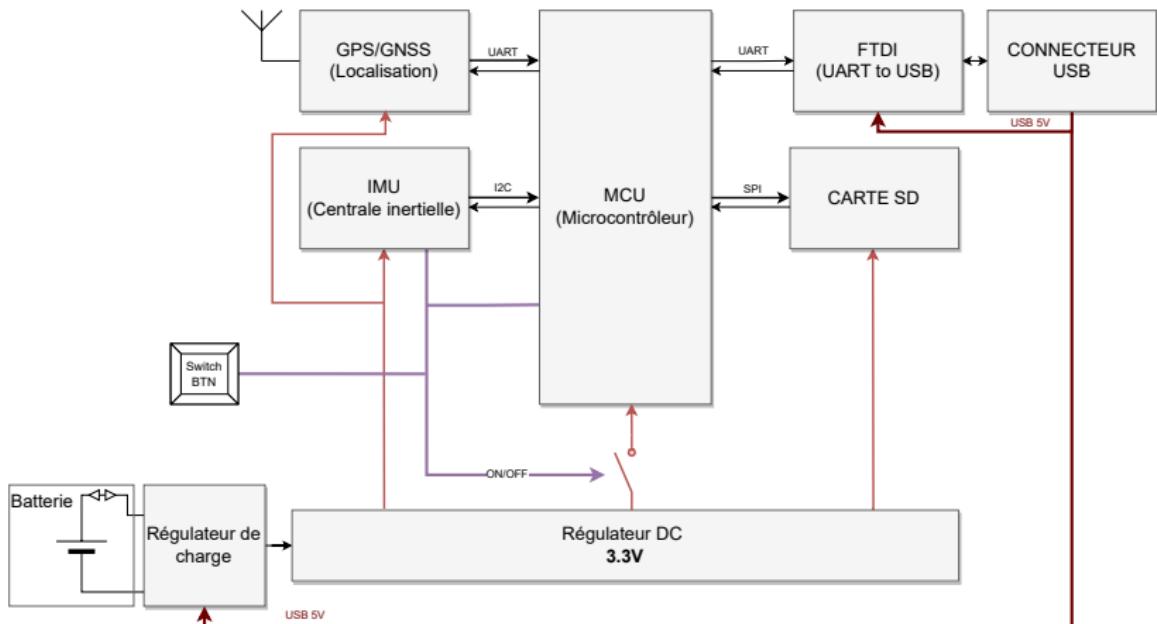


Figure 3 – Schéma bloc.

Choix des composants clés

Microcontrôleur : PIC32MX274F256D
Centrale inertielle : BNO055
GNSS : CAM-M8C-0
Carte SD : 256MB
Batterie : LI-ION 1600mAh
Régulateur : MCP73871T-2CCI/ML

Microcontrôleur

PIC32MX274F256D

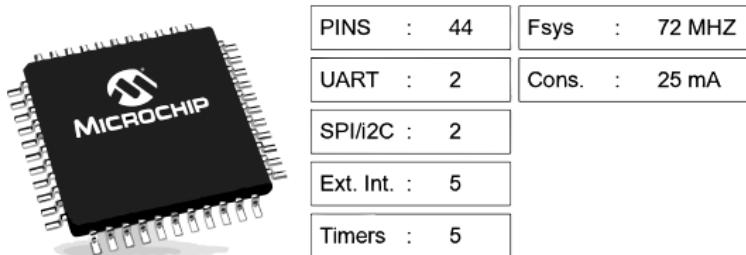


Figure 4 – Caractéristiques PIC32.

Le MCU choisis dispose de différentes configurations de gestion de puissance, notamment des modes d'économie d'énergie, afin de permettre une meilleure autonomie.

Centrale inertielle



Figure 5 – Illustration BNO055.

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]

CAM-M8C-0



Model	Category	GNSS		Supply	Interfaces	Features		Grade
	Standard Precision GNSS							
	High Precision GNSS							
CAM-M8Q	•	GPS / QZSS						
	Dead Reckoning	•	•					
	Timing	•	•					
CAM-M8C	•	GLONASS						
	Galileo	•	•					
	BeiDou	•	•					
				Number of Concurrent GNSS				
				3	1.65 V – 3.6 V			
					2.7 V – 3.6 V			
						UART		
						USB		
						SPI		
						DDC (I²C compliant)		
						Programmable (Flash)		
						Data logging		
						Additional SAW		
						• Additional LNA		
						RTC crystal		
						Oscillator		
						Built-in antenna		
						Built-in antenna supply		
						and supervisor		
						Timepulse		
						•	1	Standard
						•	1	Professional
						◆		Automotive

Figure 6 – Caractéristiques du GNSS.

Carte SD

S_{SD}	256	[MB]
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]

$$S_{single} = \frac{T_{gnss}}{T_{inertiel}} S_{accel} + S_{gnss} = \frac{5}{0.5} 16 + 100 = 260 \text{ [Bytes]}$$

$$S_{mesures} = \frac{S_{single}}{T_{gnss}} * T_{mesMin} = \frac{260}{5} * 900 = 46'800 \text{ [Bytes]} = 49.8 \text{ [KB]}$$

$$T_{mesures} = \frac{S_{SD} * T_{gnss}}{S_{single}} = \frac{256 * 10^6 * 5}{260} = \sim 82'051 \text{ Minutes} = \sim 1368 \text{ H.}$$

Batterie

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	<u>207.3</u>	[mA]	Max.
Totale moyennes	<u>125.3</u>	[mA]	Moyenne

Table 1 – Tableau des consommations de courant.

Temps minimum avec tolérance désiré : $10h \Rightarrow \text{min} \sim 1300mAh$

Synthèse pré-étude

Choix des composants et technologies :

- **Microcontrôleur** : PIC32MX274F256D privilégié, 2 UART, 1 SPI, 1 I2C, économie d'énergie.
- **Centrale inertielle** : BNO055 de BOSCH, mesures avancées, facile à implémenter.
- **GPS/GNSS** : CAM-M8C-0 d'ublox, antenne interne omnidirectionnelle, facile à implémenter.
- **Carte SD** : Capacité de 256MB, suffisante pour données de vol.
- **Batterie** : Nécessité de 1253 mAh pour autonomie minimale.

Développement schématique

Blocs du systèmes

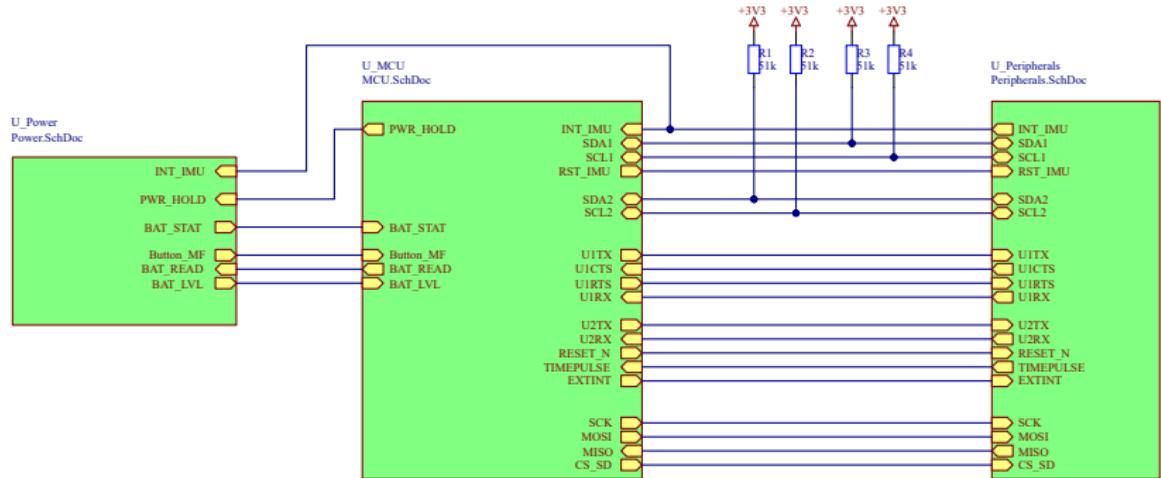


Figure 7 – Blocs du système.

MCU - Microcontrôleur

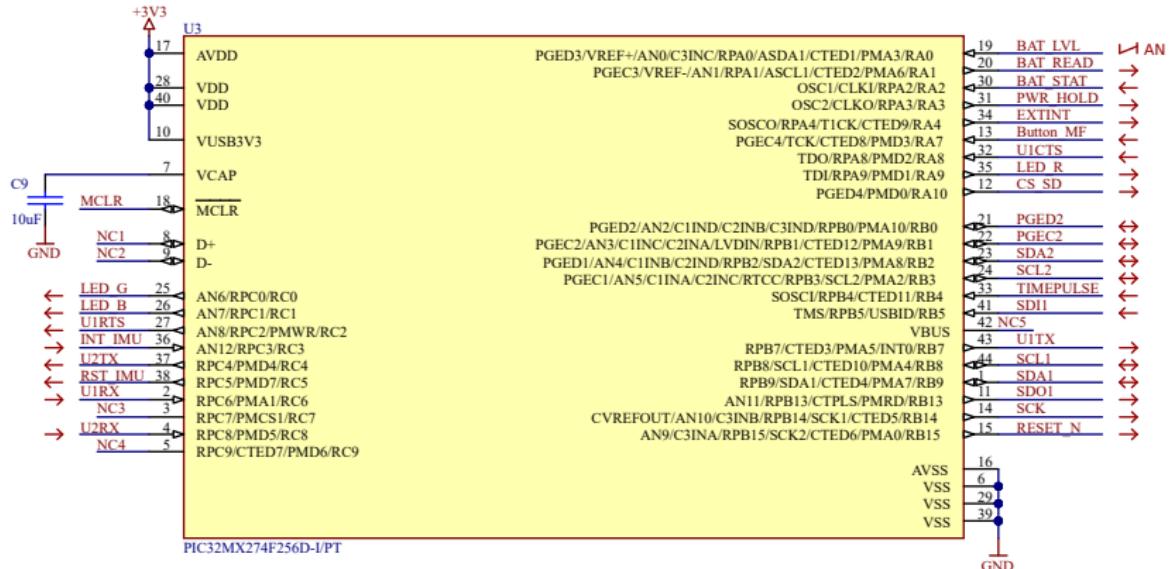


Figure 8 – Connexions du microcontrôleur

Peripherals - Carte SD

Micro-SD

CONS: 100mA max

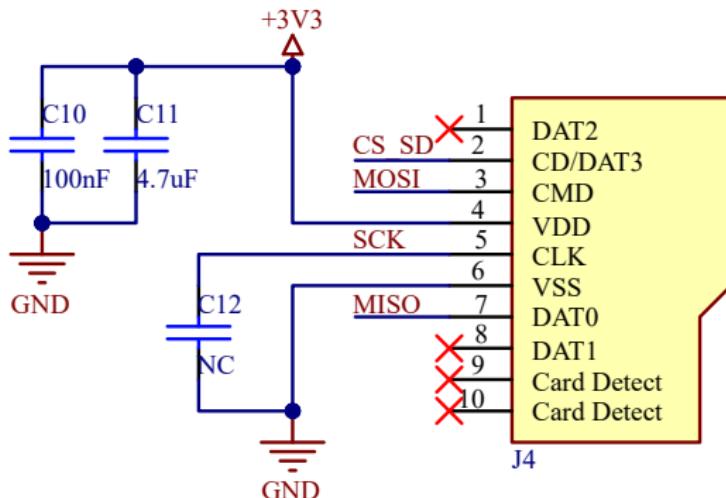


Figure 9 – Branchement carte SD.

Peripherals - Centrale inertie

Centrale Inertielle

CONS: 12.3mA

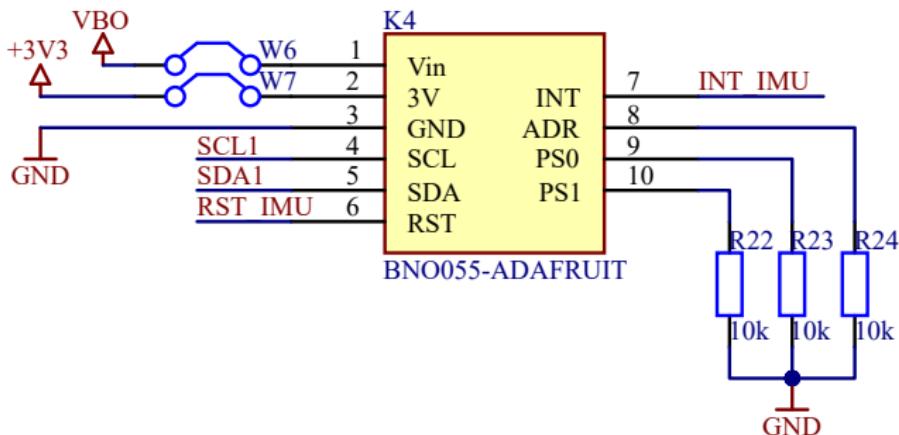


Figure 10 – Schéma centrale inertie.

Peripherals - GNSS

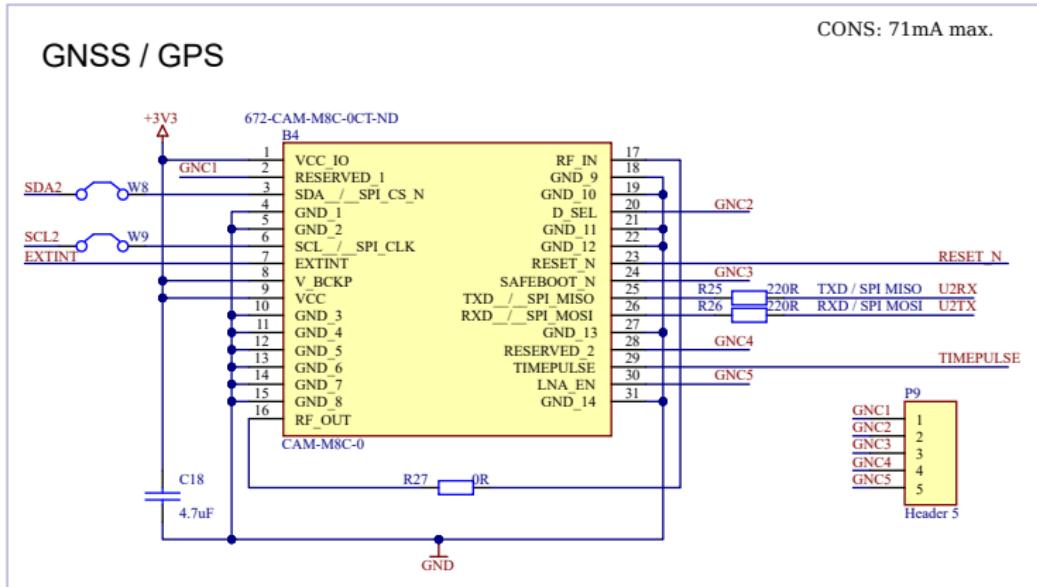


Figure 11 – Schéma du GNSS.

Peripherals - USB-FTDI

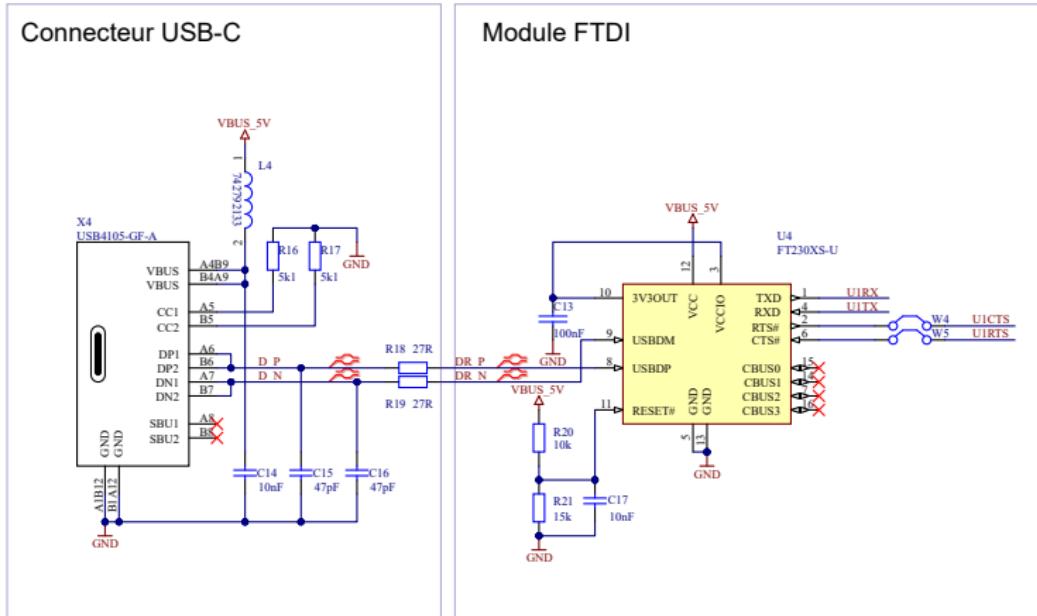


Figure 12 – Schéma connecteur USB et FTDI.

Power - Chargeur de batterie

Régulateur de charge

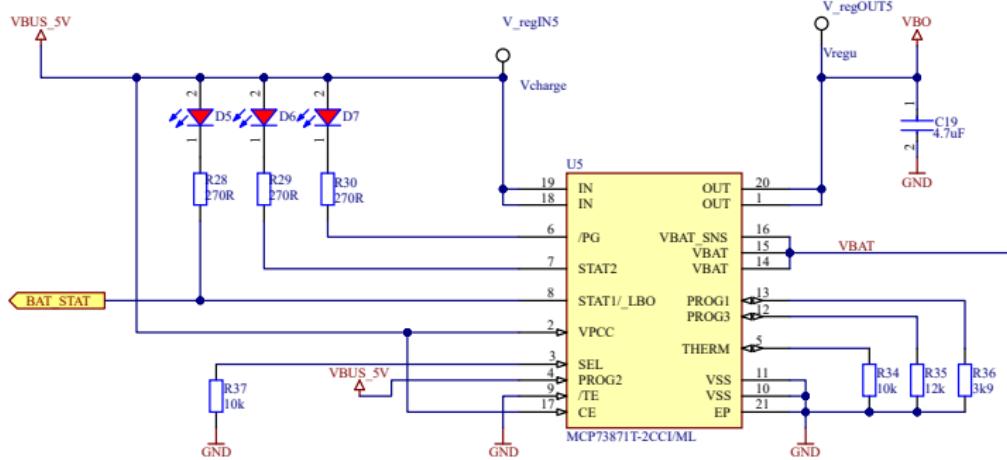


Figure 13 – Schéma chargeur de batterie.

Power - Encinement

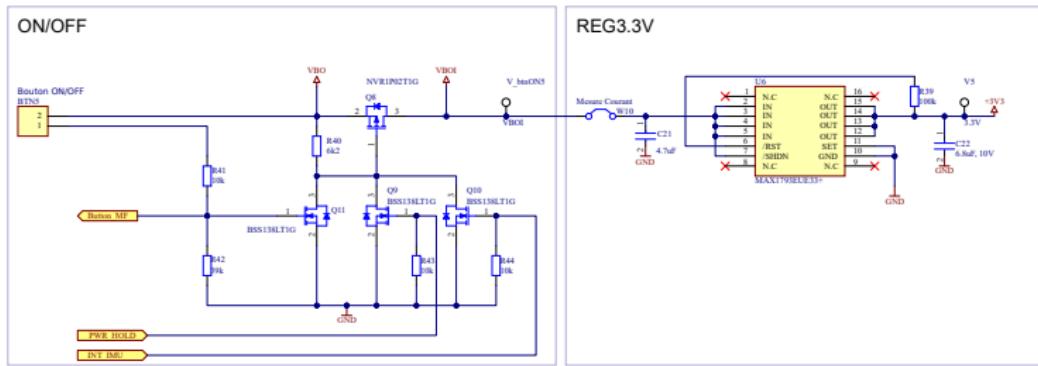


Figure 14 – Schéma allumage du système.

Développement du PCB

Choix du boîtier

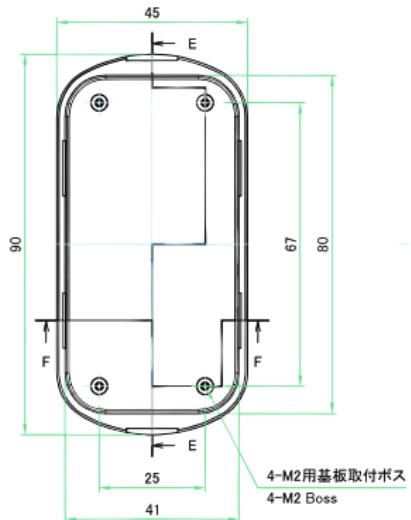
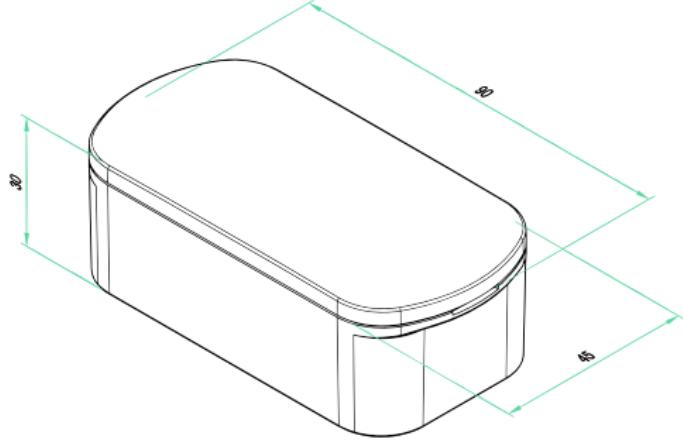


Figure 15 – Dimensions du SIC5-9-3B TAKACHI.

Placement des composants

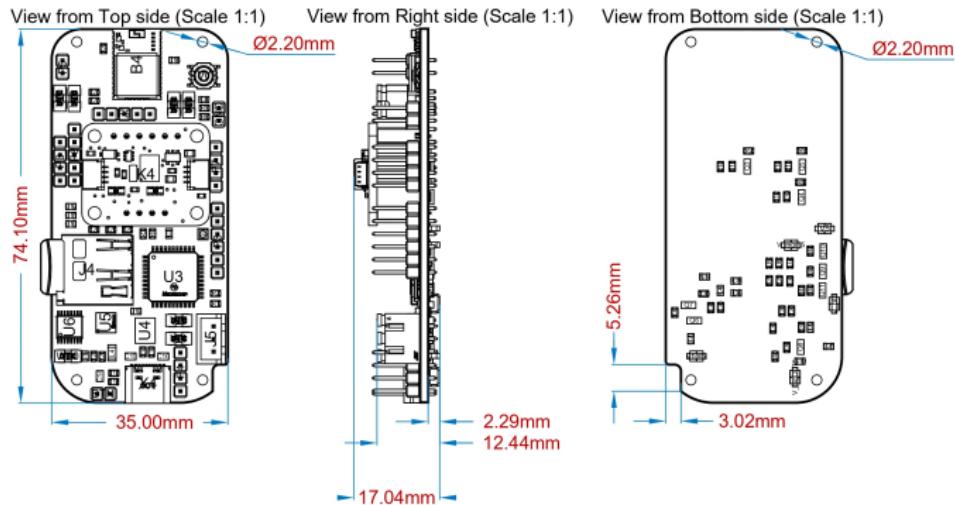
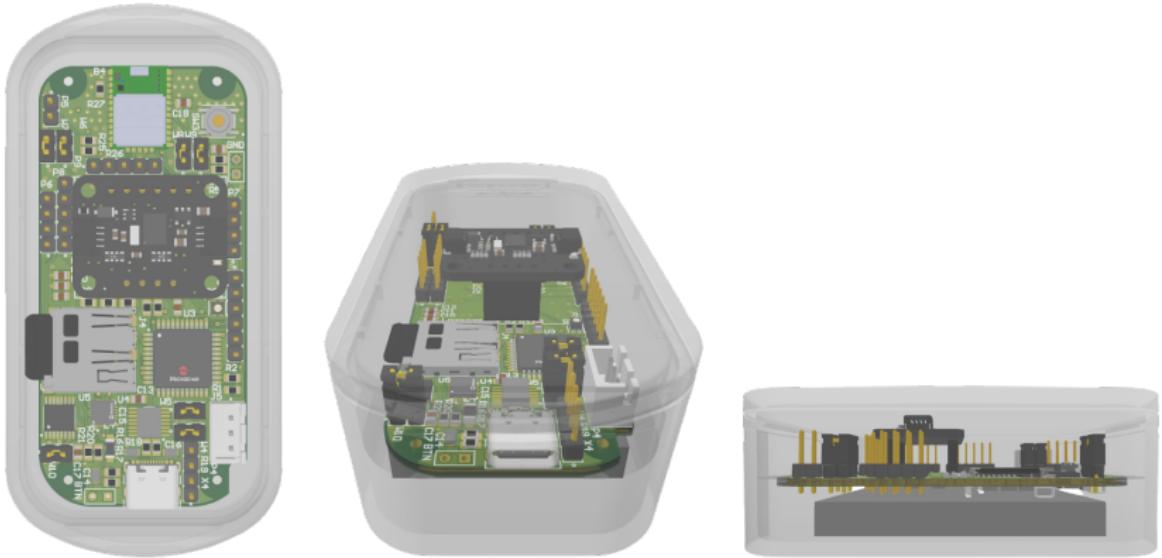


Figure 16 – Placement des composant et dimensions de la carte.

Intégration



(a) Vue 3D, 1

(b) Vue 3D, 2

(c) Vue 3D, 3

Figure 17 – Vues 3d de l’assemblage.

Routage

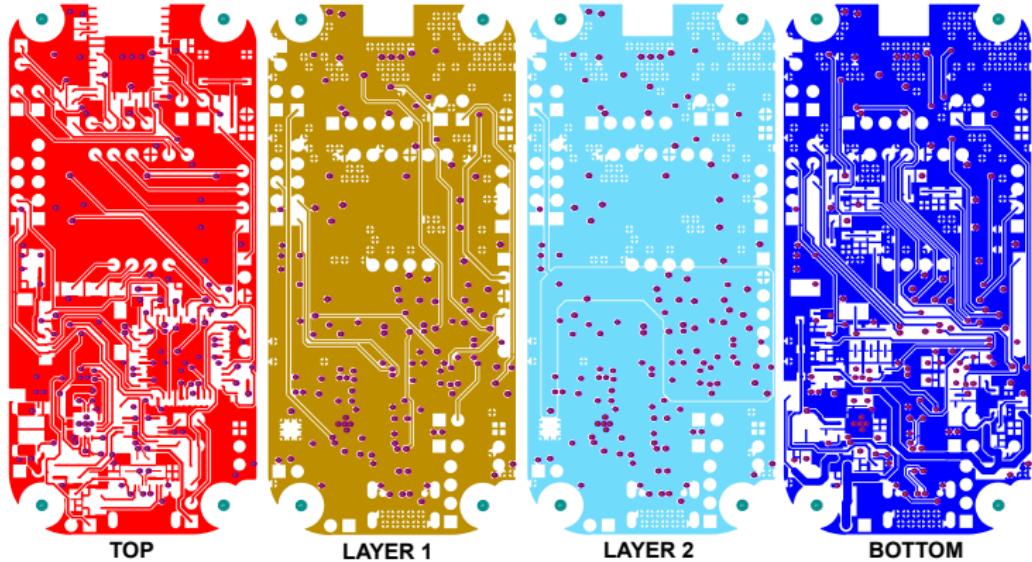


Figure 18 – Routage des différentes couches.

Développement du firmware

Configuration des périphériques

ID du timer	Description	Période
Timer 1	sert pour les attentes bloquantes précises.	1 [ms]
Timer 2	gère les délais entre les mesures et l'affichage des LEDs.	10 [ms]

ID du BUS	Utilité	Fréquence	Interruption	Trame	Parité
UART ID1	Réceptions commandes USB.	9600 [Baud]	Priorité 1	8bits + 1stop	Non
UART ID2	Communication avec le GNSS.	9600 [Baud]	Non	8bits + 1stop	Non
SPI	Communication avec la carte SD en FAT32.	12'000 [MHz]	Priorité 1	-	-
I2C	Communication avec la centrale inertuelle.	400 [kbit/s]			

Table 2

Diagramme application principale

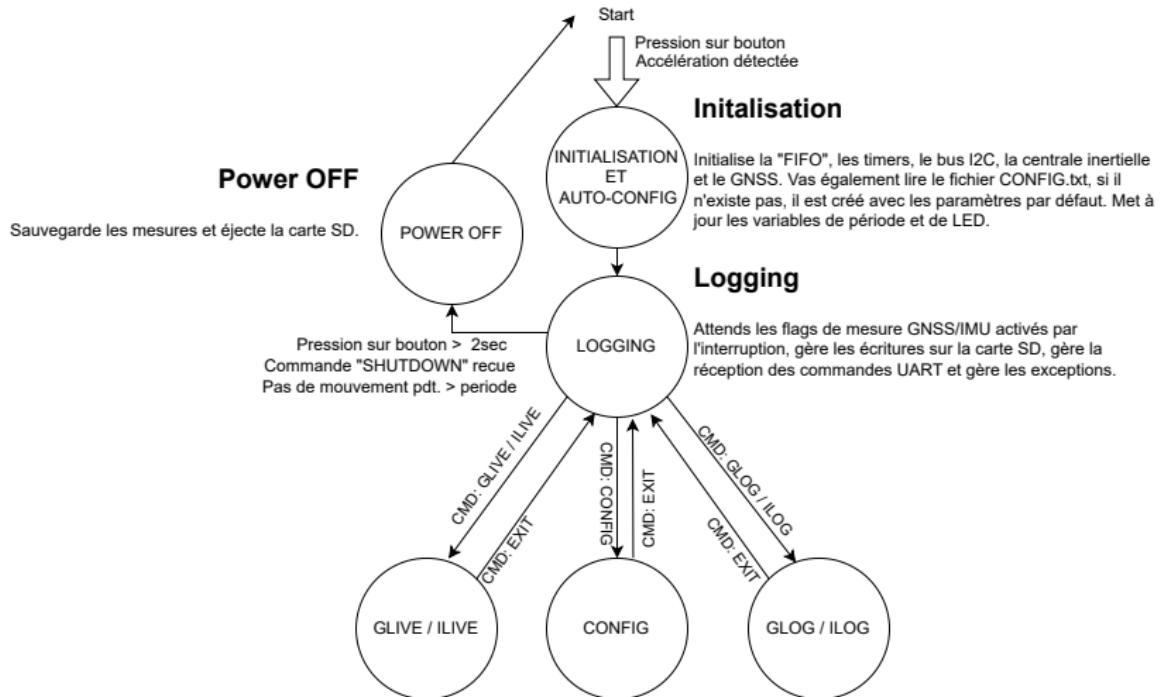
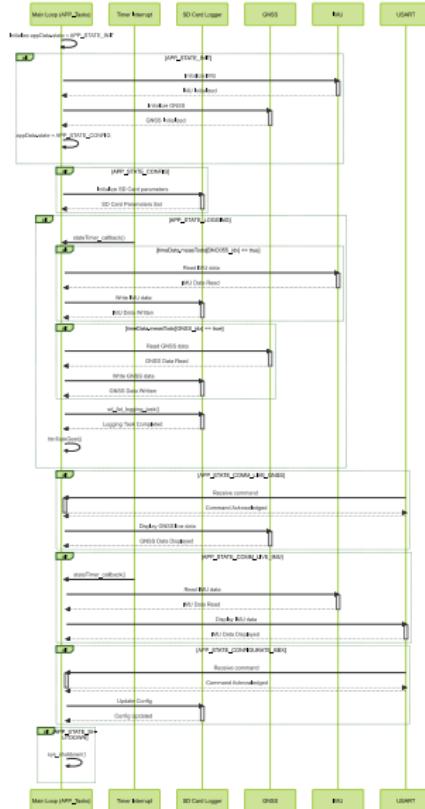
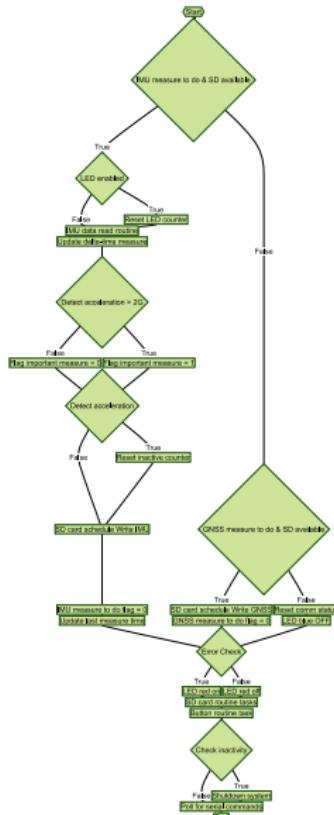


Figure 19 – Diagramme d'état principal.

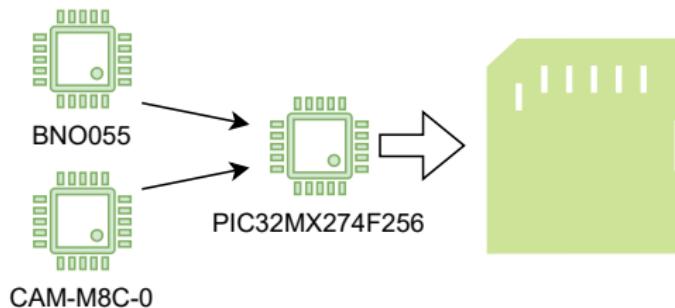
Diagramme de séquence principale



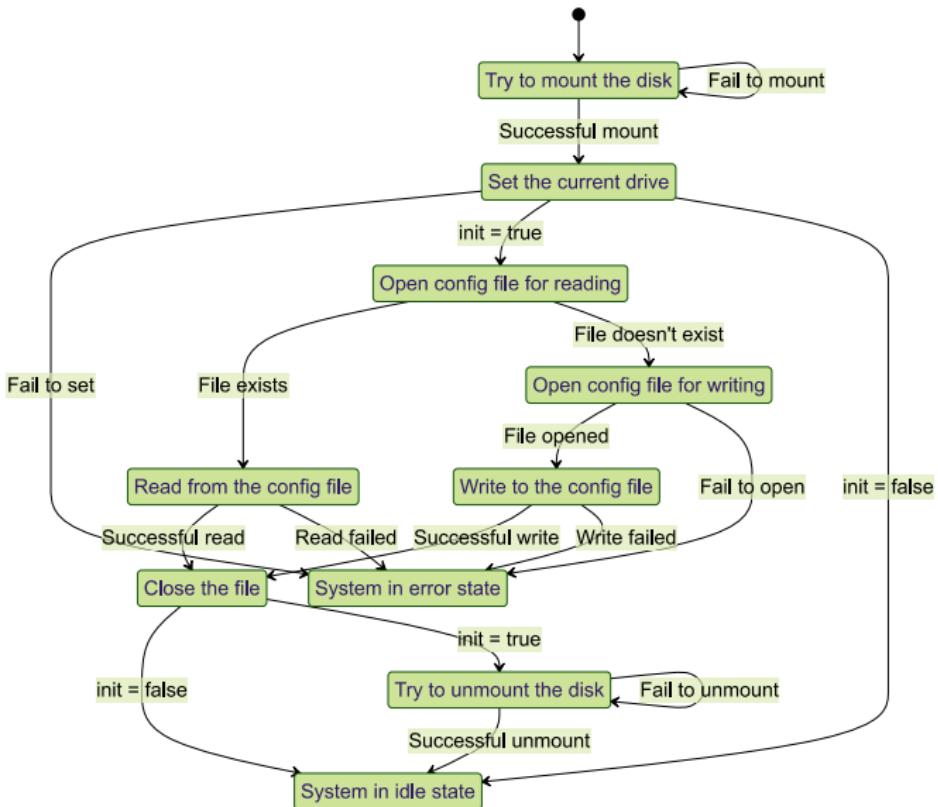
Flowchart Logging



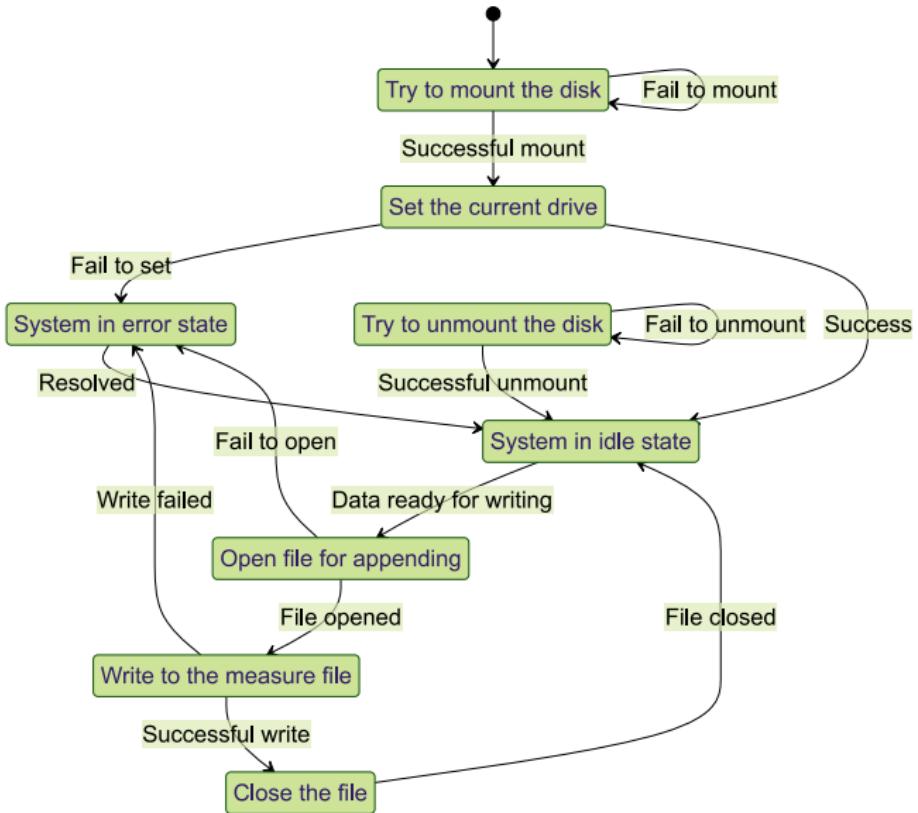
Carte SD



Machine d'état carte SD - Initialisation



Machine d'état carte SD - Logging



Enregistrement des données

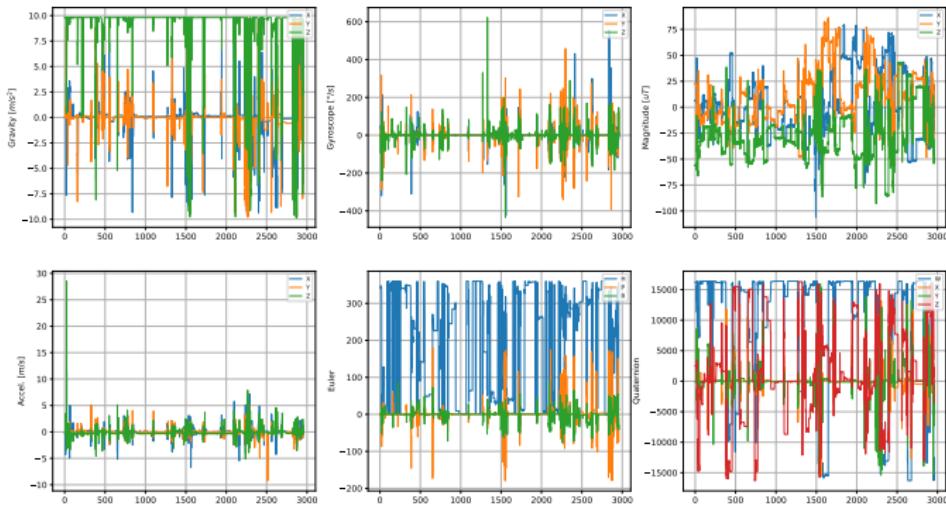


CONFIG.txt	05/10/2023 10:43	Document texte	1 KB
LOG_GNSS.txt	13/09/2023 20:22	Document texte	1,282 KB
LOG_IMU.csv	13/09/2023 20:22	Microsoft Excel C...	1,075 KB

Données CSV - Centrale inertielle

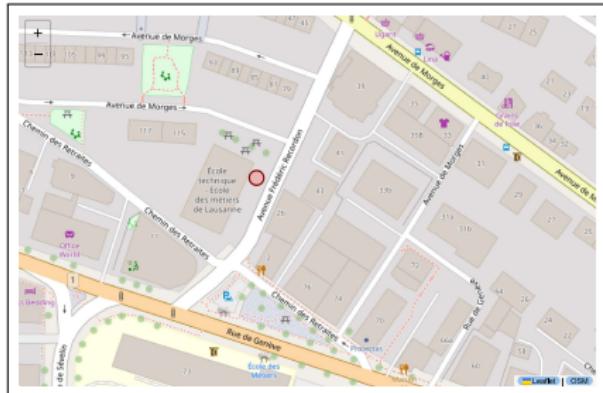
0;500;-3.5900;-3.9900;8.2000;17.3750;141.6875;20.0625;-0.8750;28.3750;-17.8750;0.9700;-0.0300;-0.4700;19.4375;25.9375;-21.4375;15475;-2902;3674;-2655;
0;500;-9.1700;-3.4500;-0.2200;6.0625;184.1250;-153.9375;21.0000;26.7500;-9.3750;0.0200;-1.0300;-0.3300;35.1875;93.6875;-69.3125;11140;-521;11538;-3308;
0;500;-0.7300;-2.2000;-9.5200;-26.1875;26.6250;1.5625;12.2500;26.7500;19.5000;0.3500;0.5500;0.0000;21.0625;166.9375;-4.3125;272.2977;15992;-1936;
0;500;-9.1600;-2.9400;1.8500;21.7500;-80.5000;-52.6875;22.0000;24.1875;-14.5625;1.6800;-0.9300;-0.2700;45.2500;57.7500;-69.1875;11613;936;10478;-4787;
0;500;2.4100;-2.6900;9.1100;32.1250;-58.6875;-29.3750;14.3750;28.2500;-19.5625;1.2500;0.6500;-1.1100;24.1250;16.1875;13.6250;15752;-2619;-1450;-3367;
0;500;9.6700;-0.1800;-1.5900;18.1875;-87.3125;-61.8750;-26.8750;26.1875;6.5000;-0.5400;0.2900;-0.3300;10.6250;173.3125;80.5000;10648;-1472;-12328;-958;
0;500;5.2100;-2.8900;7.7800;-2.2500;129.8125;-21.5625;-24.0625;25.2500;-7.7500;0.5000;0.5100;-0.8700;26.8125;20.3750;32.0625;15093;-3554;-3876;-3605;

Mesures IMU



Données NMEA - GNSS

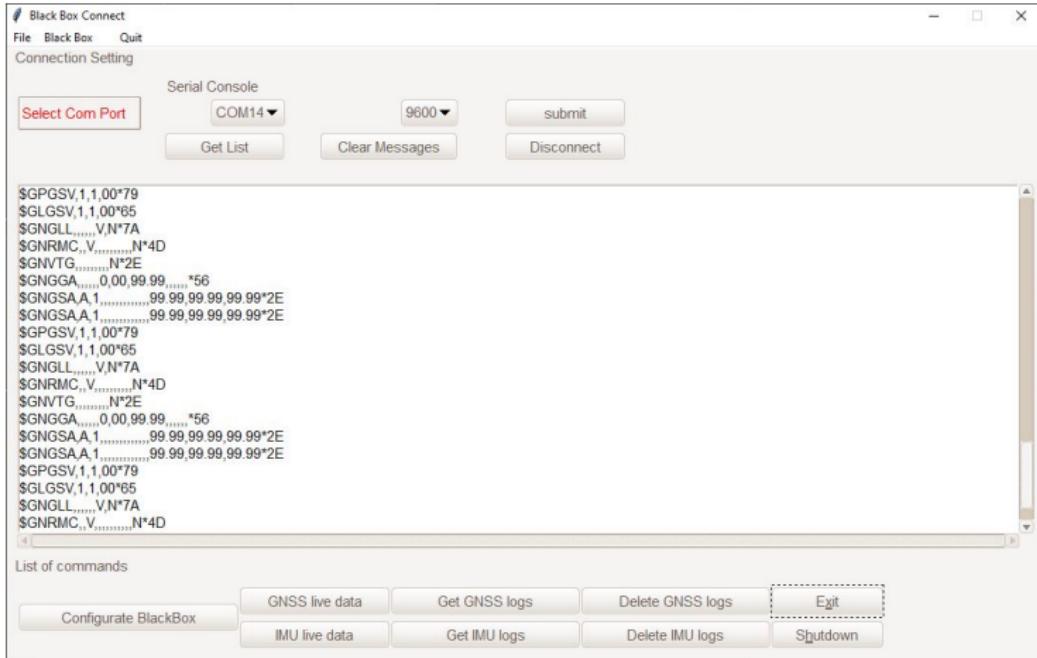
\$GNVTG,,T,,M,0.120,N,0.221,K,D*3A
\$GNGGA,103925.00,4631.50777,N,00636.99253,E,2,07,2.85,474.2,M,47.2,M,,0000*44
\$GNGSA,A,3,28,02,04,03,31,,,,,,,3.75,2.85,2.44*1D
\$GNGSA,A,3,85,70,,,,,,,3.75,2.85,2.44*1A
\$GPGSV,3,1,**12**,02,21,142,**28**,03,66,056,**39**,04,69,181,**25**,06,28,310,*74
\$GPGSV,3,2,**12**,09,42,211,,17,40,250,**18**,19,40,280,,21,14,141,*7E
\$GPGSV,3,3,**12**,28,16,041,**27**,31,26,068,**39**,36,34,157,,49,36,182,**32***76
\$GLGSV,2,1,**08**,70,34,044,**26**,71,77,325,**18**,72,37,244,,79,09,017,*63
\$GLGSV,2,2,**08**,80,11,067,,**85**,26,163,22,**86**,73,202,22,87,40,323,*6A
\$GNGLL,4631.50777,N,00636.99253,E,103925.00,A,D*7B
\$GNRMC,103926.00,A,4631.50778,N,00636.99255,E,0.088,,110923,,D*60



Fichier de configuration

```
$LOG INTERVAL GNSS [ms] : 2000
$LOG INTERVAL IMU [ms] : 500
$LED ENABLE [1/0] : 1
$INACTIVE PERIOD [s] : 60
```

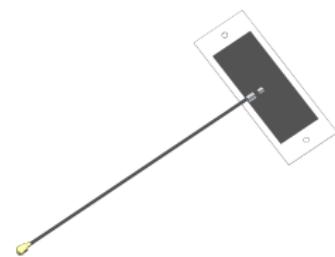
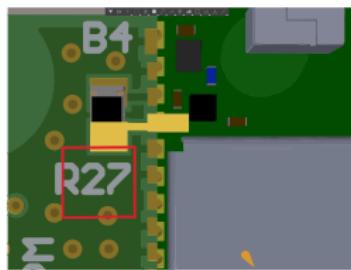
Application



Validation du design

Modifications effectuées

Ajout d'un connecteur MHF1 et antenne externe flexible "strip" indépendante du plan de masse.



Consommations

Index	Etat du système	Condition	Courant [mA]	Symbol
[1]	Eteint.	Mode auto-enclenchement OFF.	0.02	I_{off}
[2]	Veille.	Est passé par l'état SHUTDOWN.	4.4	I_{sleep}
[3]	Veille brutale. ¹	Pas passé par l'état SHUTDOWN.	9.56	I_{ws}
[4]	Initialisation.	-	90	I_{init}
[5]	Logging.	-	100	I_{log}
[6]	Shutdown.	-	83	I_{sh}
[7]	Communication.	USB branché.	0	I_{usb}

Table 3 – Mesure des consommations

- Temps de logging (Table 3-[5]) : $T_l = \frac{C}{I_{log}} = 16h.$
- Temps épuisement batterie en veille (Table 3-[2]) : $T_l = \frac{C}{I_{sleep}} = 364h = 15J.$
- Temps épuisement en veille brutale (Table 3-[3]) : $T_l = \frac{C}{I_{ws}} = 167h = 7J.$

Bus de communications

• I2C	Temps set de mesure IMU	2.275	[ms]
• UART1	Temps set de mesure GNSS	234.4	[ms]
• UART1	Intervalle entre messages NMEA	1	[s]
• UART2	Temps réaction cmd en mode CONFIG	120	[μs]
• UART2	Temps réaction cmd en mode LOG.	2.7	[ms]
• SPI	Mesure fréquence carte SD	12.0192	[MHz]

Caractéristiques finales

Caractéristique	Attribut	
Axes de mesures	9	[axes]
Mesures IMU	Temps, Gravité, Gyro, Magnitude, Accél. linéaire, Angle de Euler, Quaternions	
Intervalles mesure GNSS (par défaut)	5000	[ms]
Intervalles mesure IMU (par défaut)	500	[ms]
Capacité carte SD	256	[MB]
Nombre de mesures possibles	$1.11 * 10^6$	
Vitesse MCU	72	[MHz]
Capacité batterie	1600	[mAh]
Autonomie logging	16	[h]
Autonomie veille	2	[semaines]
Interface	USB et LED RGB	
Communications	I2C, SPI, UART(2), USB	
Vitesse SPI	12	[MHz]
Vitesse UART 1 et 2	9600	[Bd]
Détection accélération > 2G	Oui	
Données satellites	Date et heure	
Compensation température (Mesures IMU)	Oui	
Enclenchement automatique	Oui	
Système d'économie d'énergie	Oui	
Application software développée	Oui, "BBX-Connect"	

Conclusion

Conclusion



- Enregistrement périodique des données avec stratégie de sauvegarde pour préserver la mémoire non volatile.
Comme cité plus haut, les données peuvent à intervalles assez longs ou lors d'une accélération supérieure à 2g (cas d'un choc potentiel)
- Suivant la taille de mémoire nécessaire, l'étudiant peut choisir si un ou plusieurs vols sont gardés dans la mémoire.
- Envisager des techniques de mode 'Sleep' pour limiter la consommation.
- La Led de vie s'allumera à chaque prise de données d'accéléromètre pour une durée de 50ms.
- Un fichier de configuration au format texte permettra de paramétriser les intervalles d'enregistrement, ainsi que l'activation de la led de vie.

Optionnel (bonus) :

- Envoi des données d'une session par liaison USB en mode terminal, format csv, sur une commande simple d'interrogation. Ceci permet d'éviter de retirer la carte microSD.
- Les intervalles de prises de mesures (accélération, GPS), et d'enregistrement seront paramétrables par une ou plusieurs commandes passées par la liaison USB. Ceci met à jour le fichier de configuration.
- La led de vie est activable par une commande. Ceci met à jour le fichier de configuration.
- Possibilité de mettre à jour le Firmware par le port USB ou par carte microSD.

Questions?