

# **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

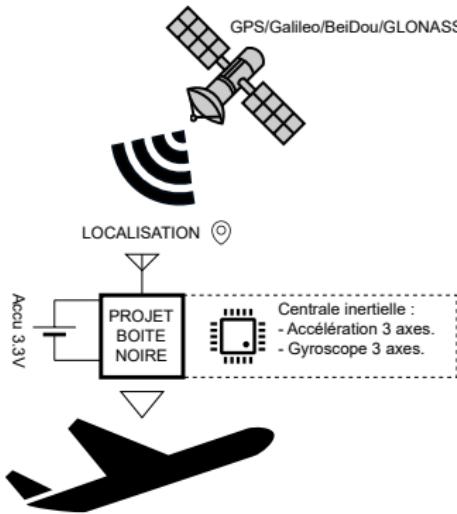


**Figure 1 – Boîte noire**

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



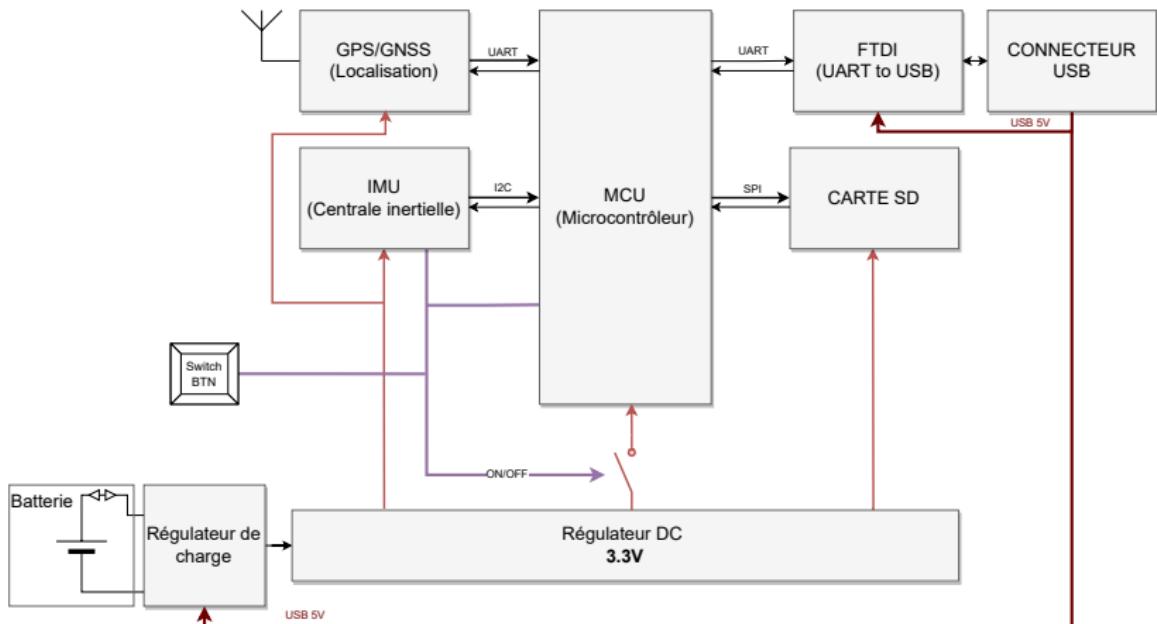
- Données de localisation, trajectoire.
- Accéléromètre et Gyroscope.
- Miniaturisation.
- Bonne autonomie / Low power.
- Configuration des temps de sauvegardes.
- Charge, lecture et configuration par USB-C.

**Figure 2 – Schéma de principe.**

# **Pré-étude**

---

# Schéma bloc



**Figure 3 – Schéma bloc.**

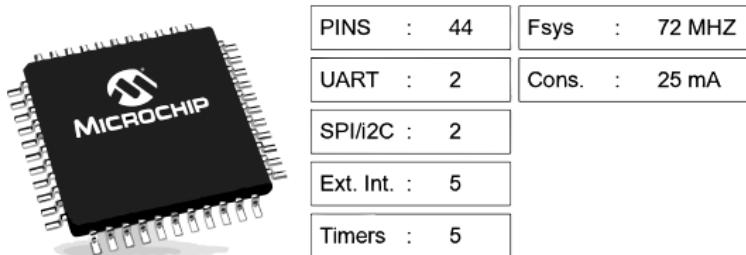
# Choix des composants clés

---

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	[ $\mu$ T]
$I_{DD}$	:	12.3	[mA]
Dérive de température	:	$\pm 0.03$	[%/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]
$S_{gnss}$	$\sim 100$	[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

---

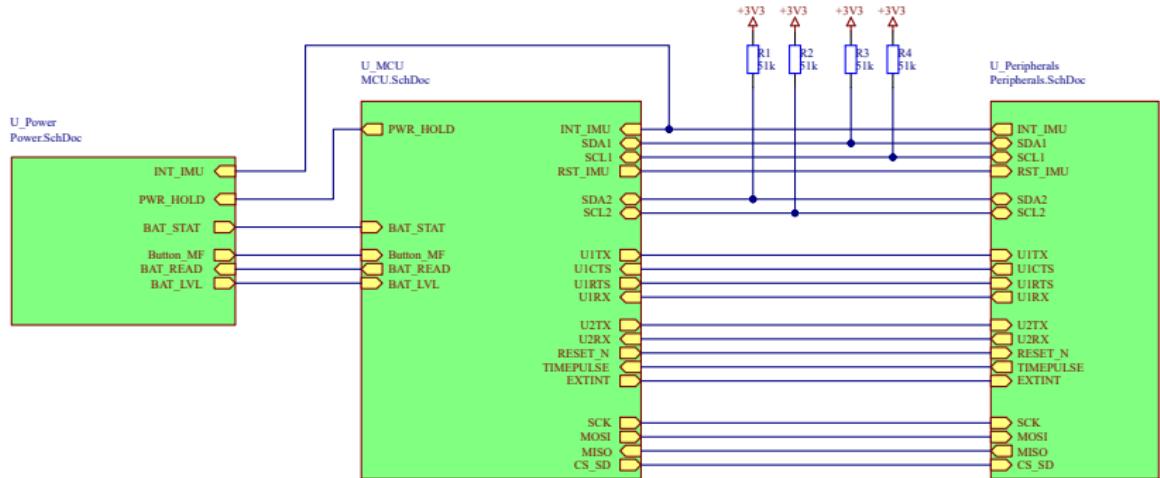
## Choix des composants et technologies :

- **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

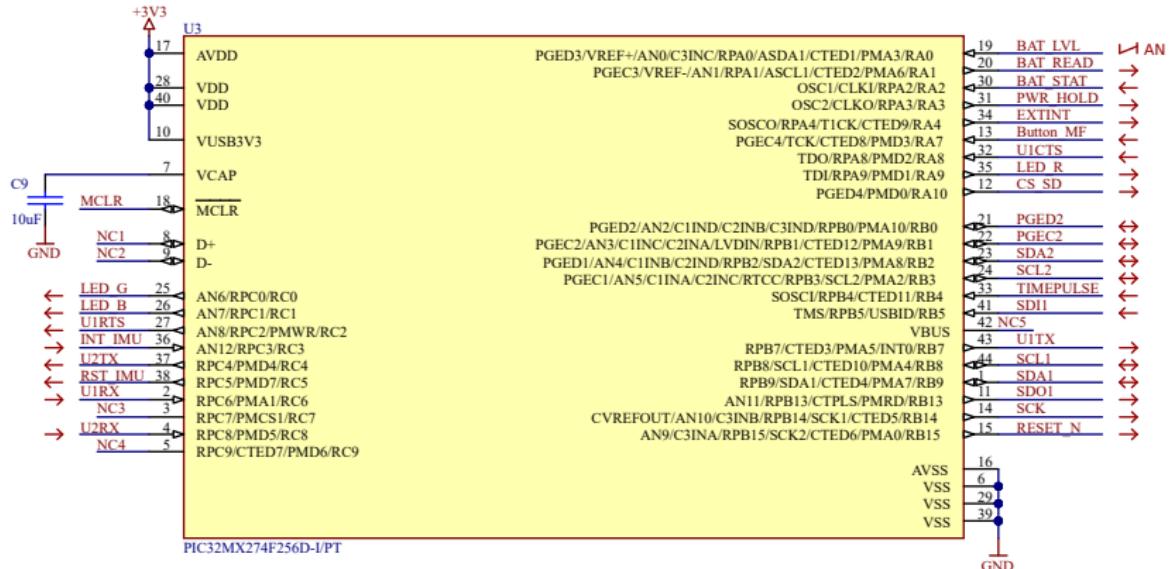
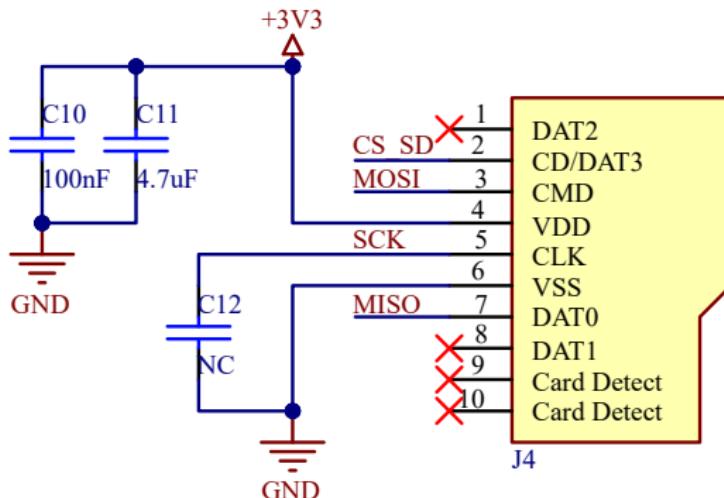


Figure 8 – Connexions du microcontrôleur

# Peripherals - Carte SD

## Micro-SD

CONS: 100mA max



**Figure 9 – Branchement carte SD.**

# Peripherals - Centrale inertie

## Centrale Inertielle

CONS: 12.3mA

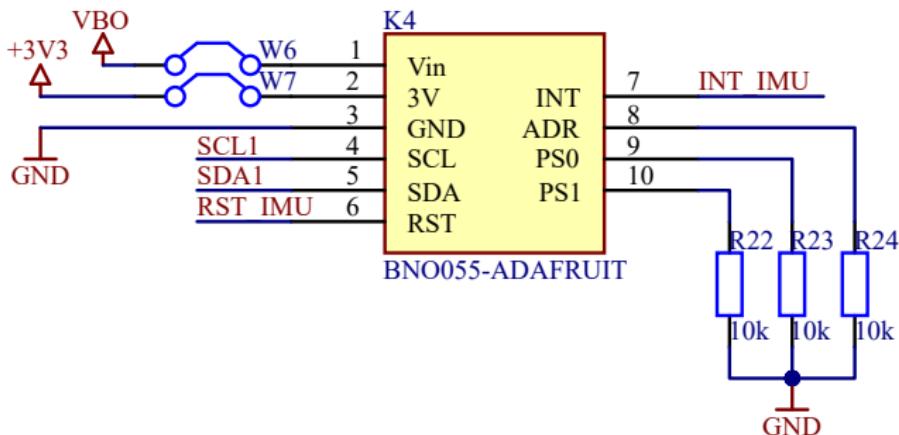
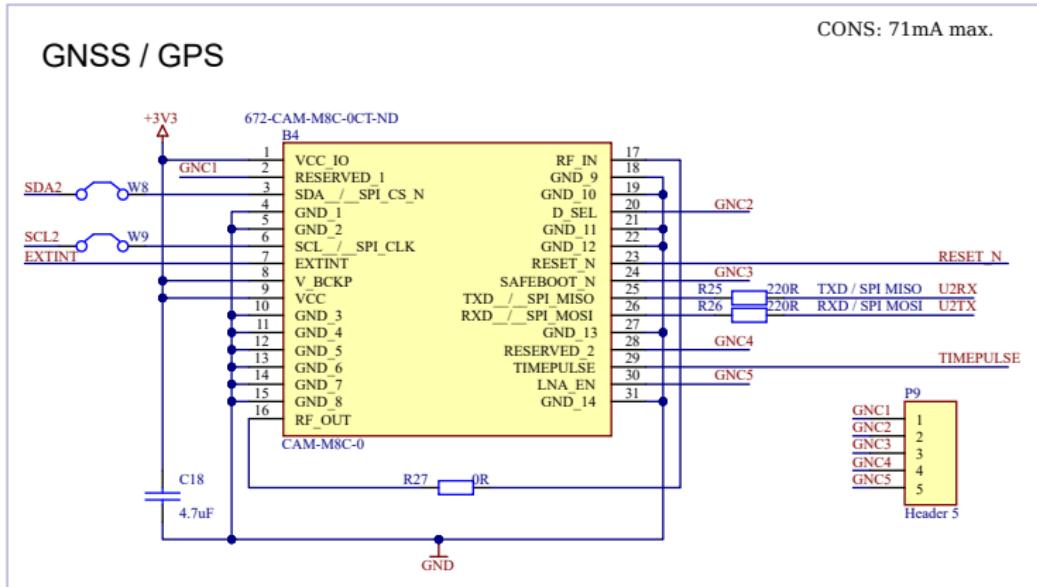


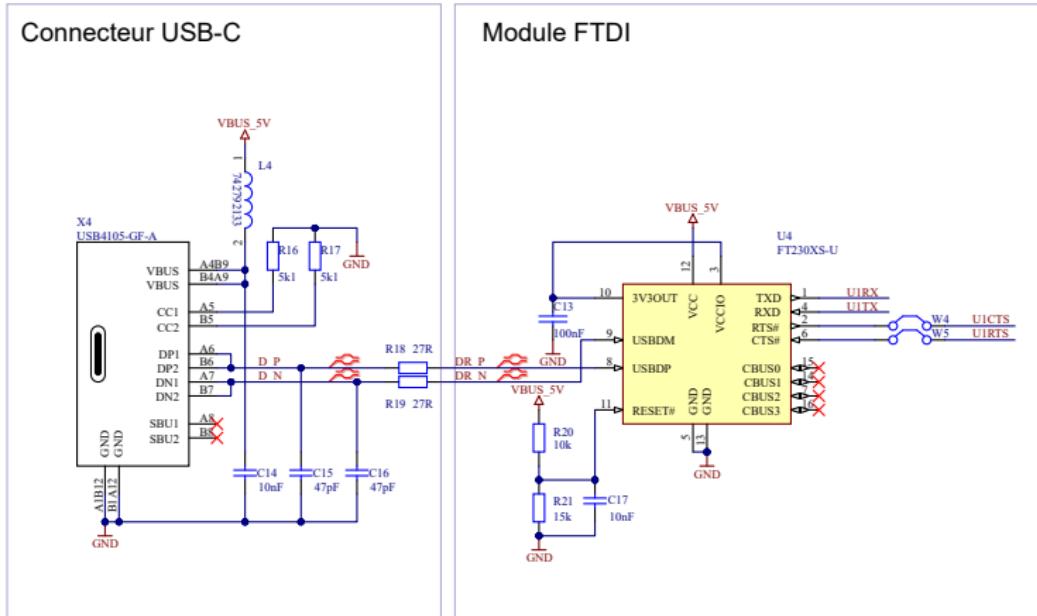
Figure 10 – Schéma centrale inertie.

## Peripherals - GNSS



## **Figure 11 – Schéma du GNSS.**

# Peripherals - USB-FTDI



**Figure 12 – Schéma connecteur USB et FTDI.**

# Power - Chargeur de batterie

## Régulateur de charge

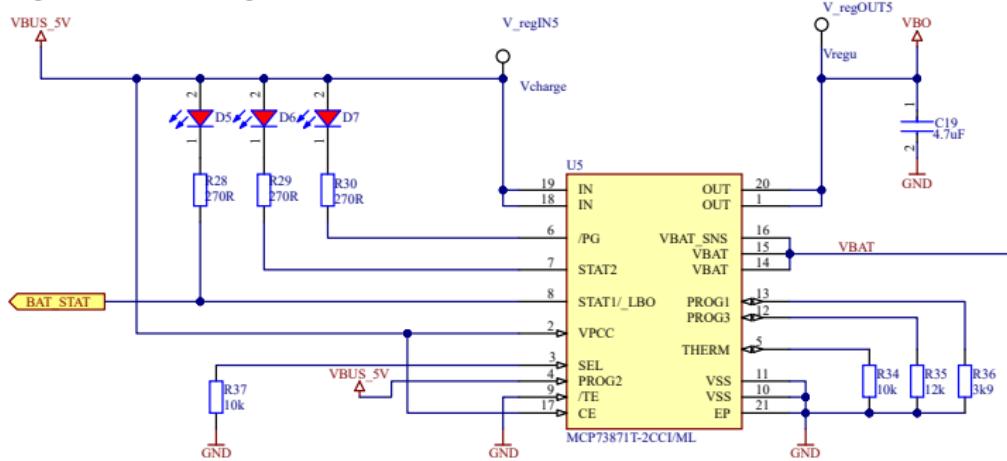
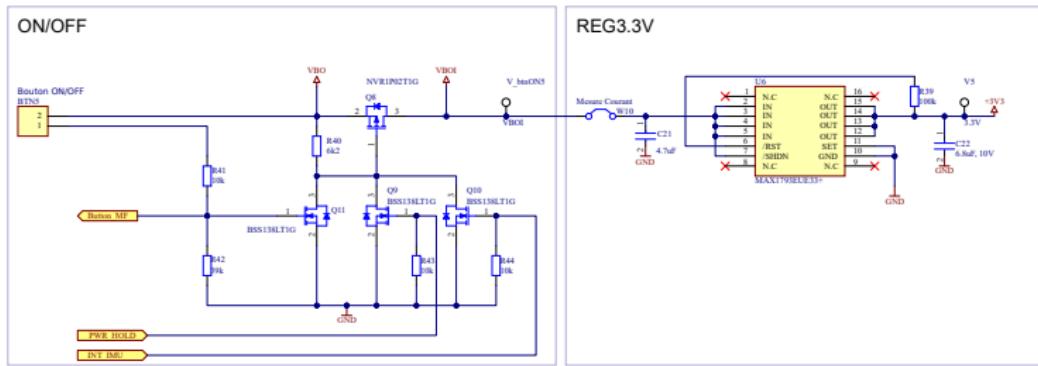


Figure 13 – Schéma chargeur de batterie.

## **Power - Encinement**

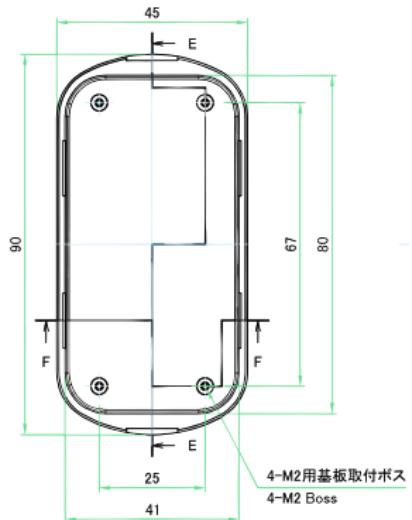
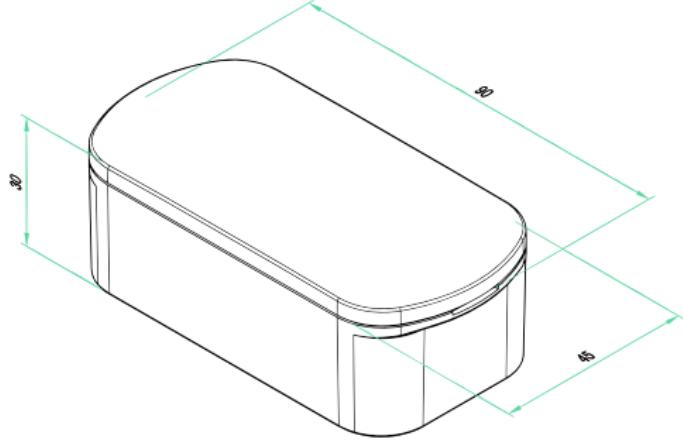


**Figure 14** – Schéma allumage du système.

## **Développement du PCB**

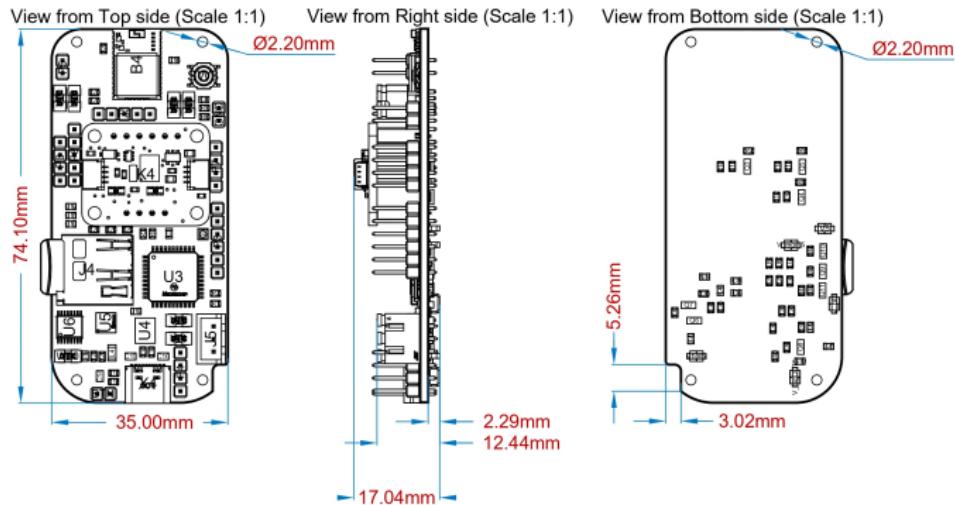
---

# Choix du boîtier



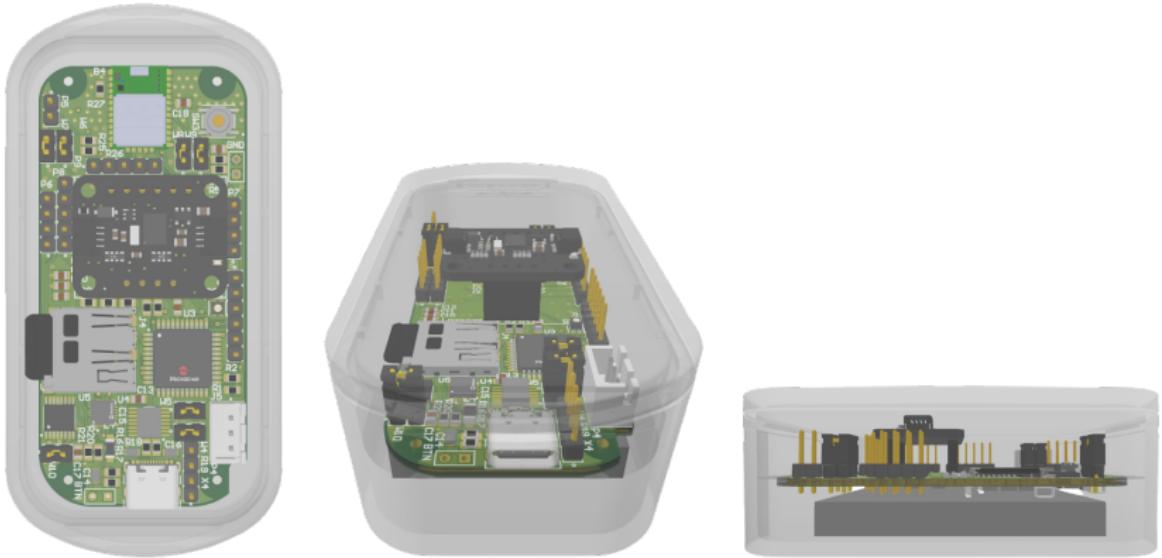
**Figure 15 – Dimensions du SIC5-9-3B TAKACHI.**

# Placement des composants



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

# Intégration



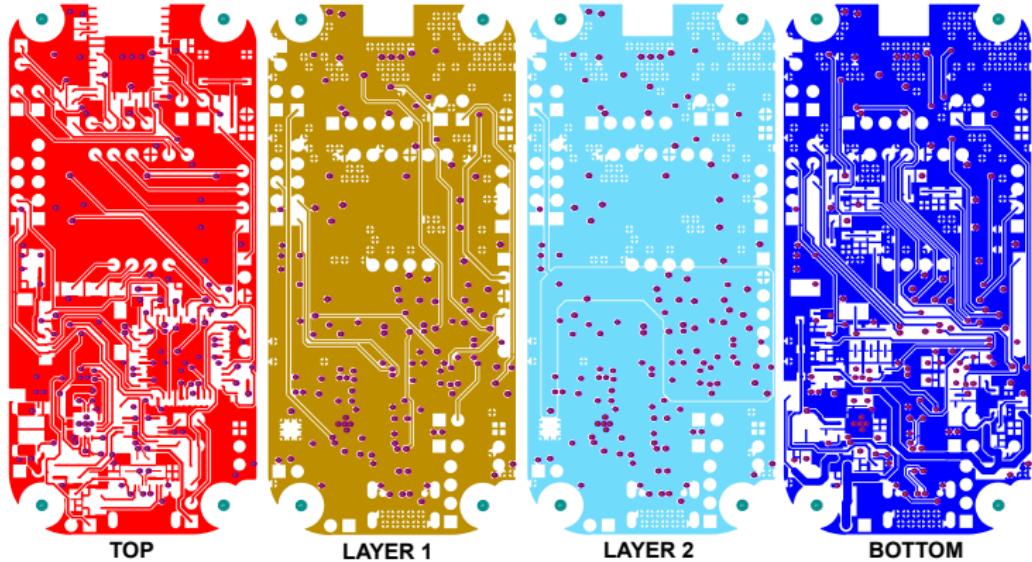
(a) Vue 3D, 1

**(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

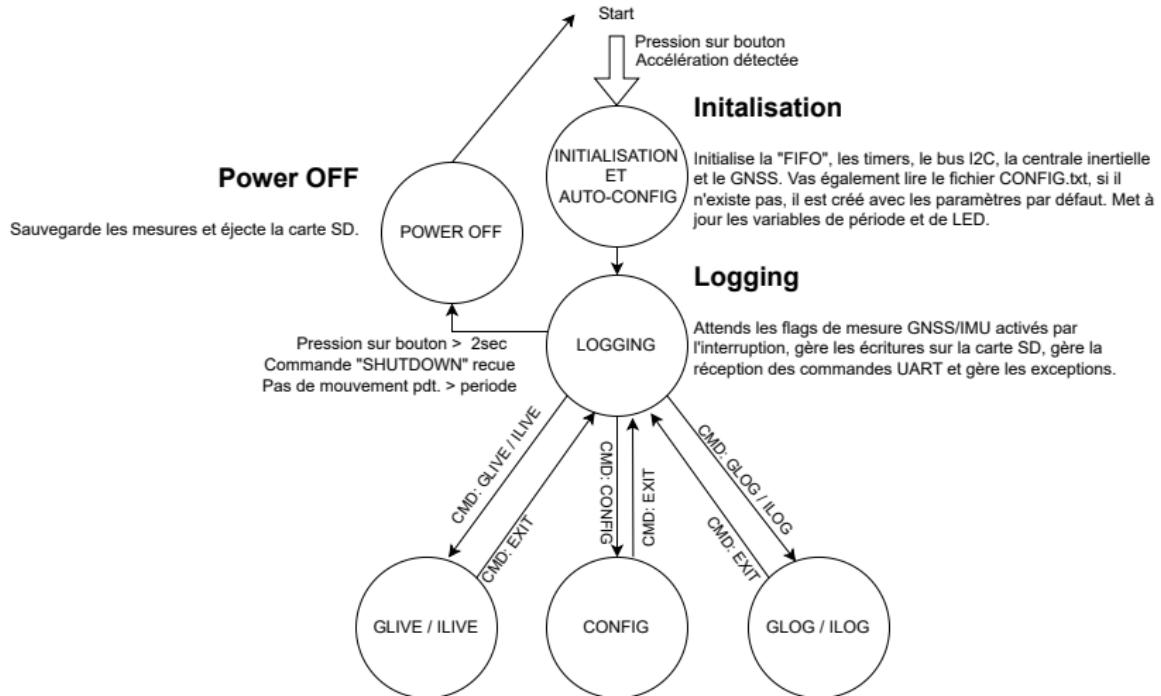
---

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

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

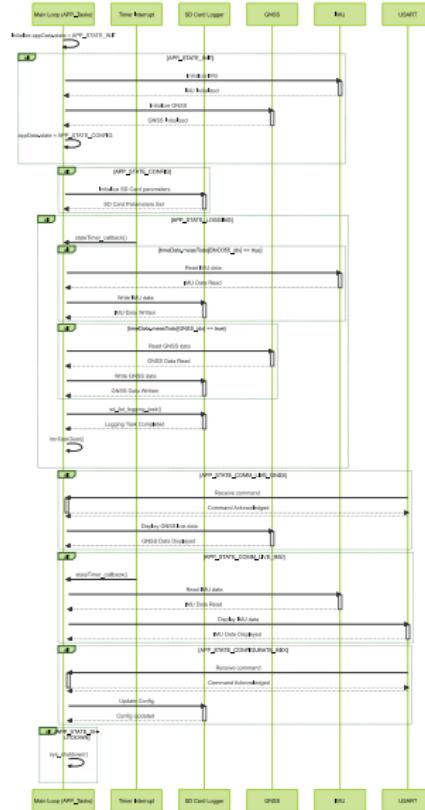
**Table 2**

# Diagramme application principale

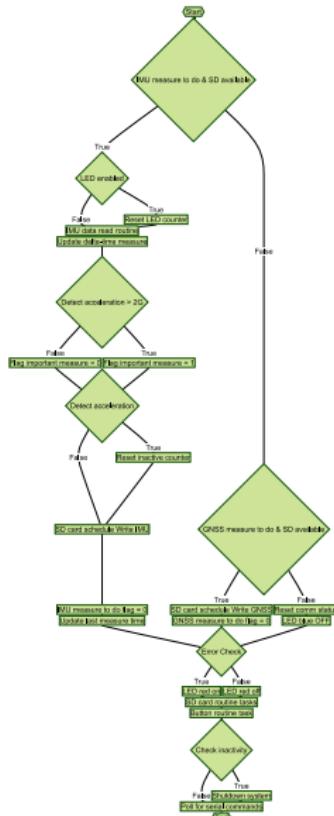


**Figure 19 – Diagramme d'état principal.**

# Diagramme de séquence principale

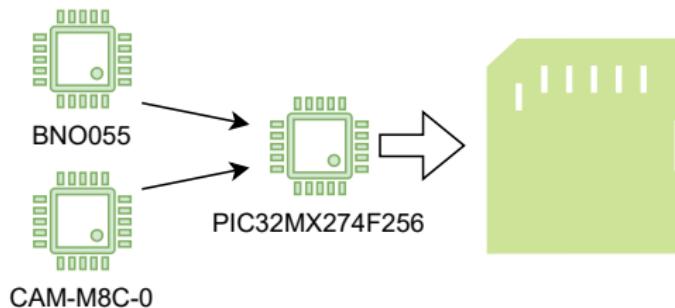


# Flowchart Logging

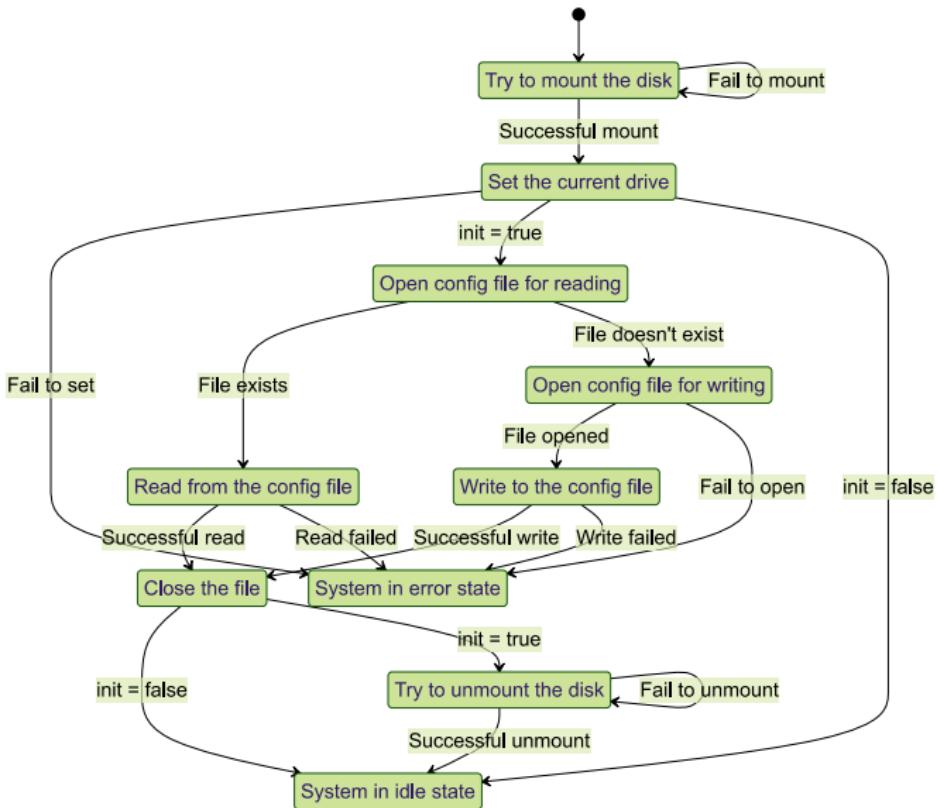


# Carte SD

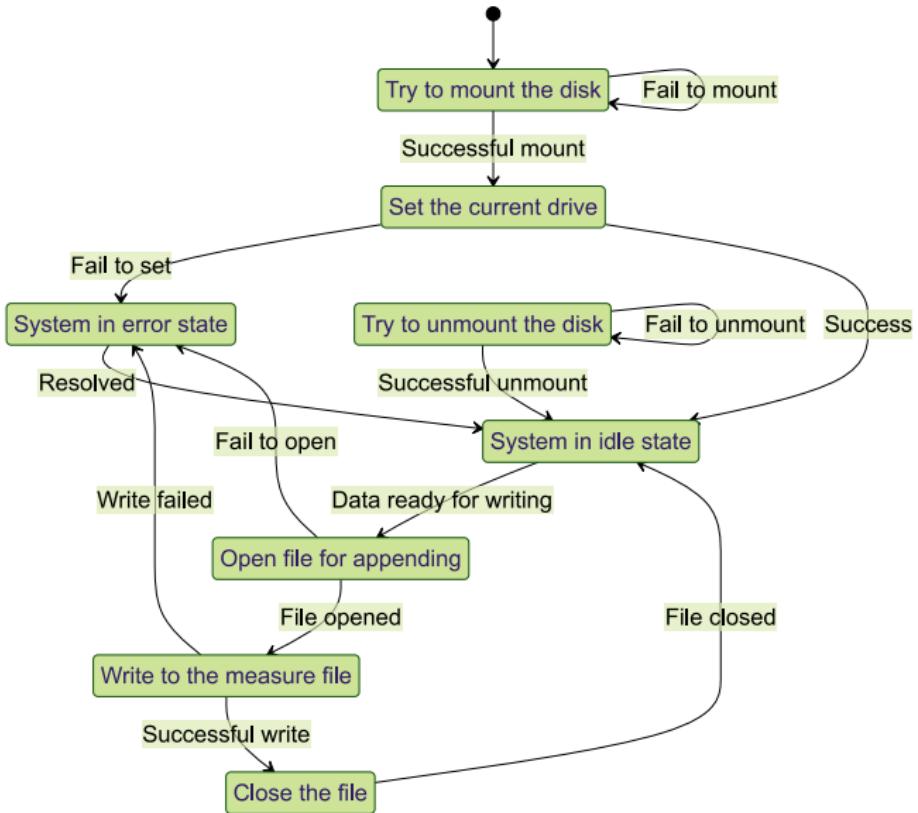
---



# Machine d'état carte SD - Initialisation



# Machine d'état carte SD - Logging



# Enregistrement des données

---

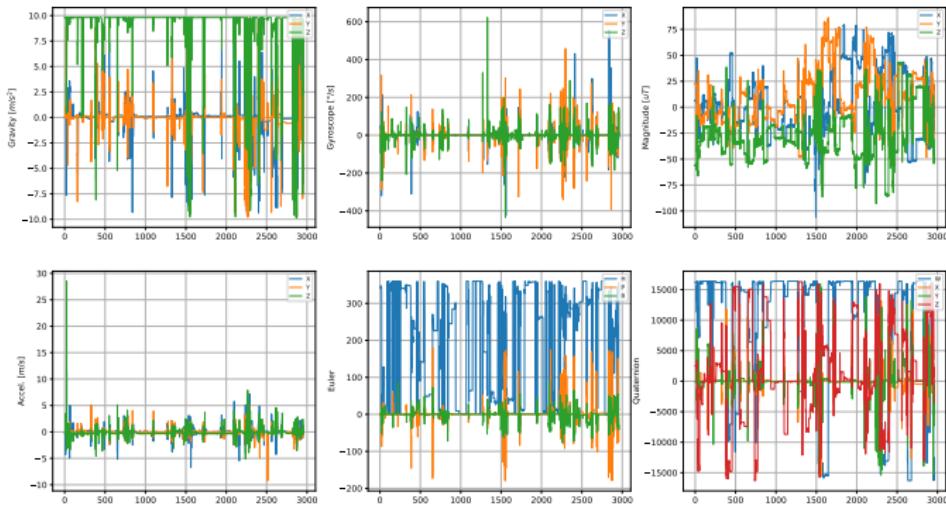


CONFIG.txt	05/10/2023 10:43	Document texte	1 KB
LOG_GNSS.txt	13/09/2023 20:22	Document texte	1,282 KB
LOG_IMU.csv	13/09/2023 20:22	Microsoft Excel C...	1,075 KB

# Données CSV - Centrale inertielle

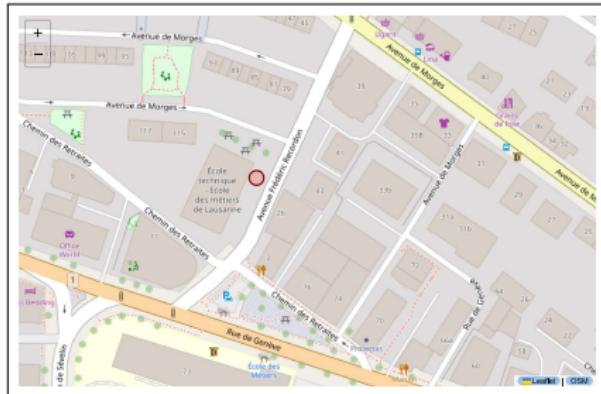
0;500;-3.5900;-3.9900;8.2000;17.3750;141.6875;20.0625;-0.8750;28.3750;-17.8750;0.9700;-0.0300;-0.4700;19.4375;25.9375;-21.4375;15475;-2902;3674;-2655;  
0;500;-9.1700;-3.4500;-0.2200;6.0625;184.1250;-153.9375;21.0000;26.7500;-9.3750;0.0200;-1.0300;-0.3300;35.1875;93.6875;-69.3125;11140;-521;11538;-3308;  
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**

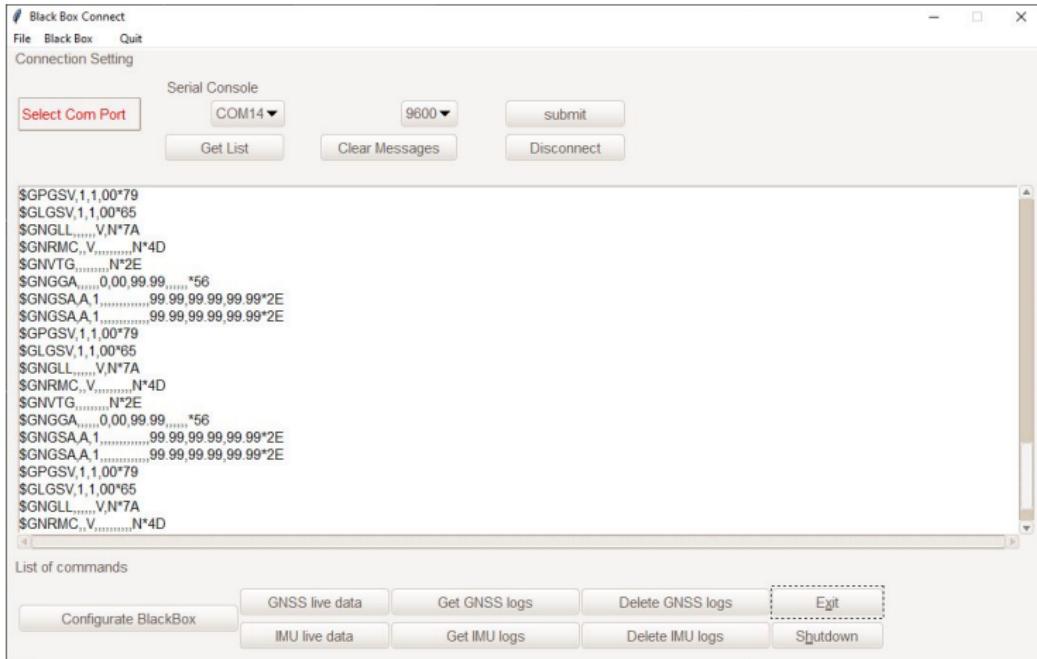


# Fichier de configuration

---

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

# Application



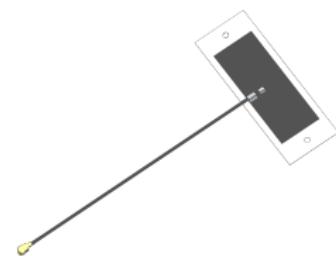
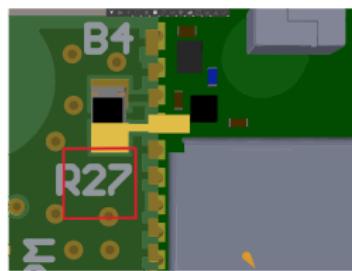
## **Validation du design**

---

# 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. <sup>1</sup>	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

- ✓ Un MCU de famille PIC32 de préférence basse consommation.
- ✓ Une IMU comprenant un accéléromètre et un gyroscope.
- ✓ Un module GPS.
- ✓ Un dispositif d'enregistrement des données dans une mémoire non volatile à carte microSD
- ✓ Une led de vie activable ou non.
- ✓ Un connecteur USB type C.
- ✓ Le choix d'une pile ou d'un accumulateur pour l'alimentation doit être évalué (avec circuit de charge par l'USB ou non).
- ✓ Un bouton de reset du MCU.
- ✓ Quelques points test miniatures essentiels pour la mise au point.
- ✓ Un switch ON/OFF à discuter. Il est possible d'imaginer une condition de mise en route et d'arrêt (Sleep) par détection de l'accéléromètre.
- ✓ Il n'y a pas de RTC, l'heure et la date d'un enregistrement seront données par l'heure GPS.
- ✓ 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?**