

Filière Systèmes industriels

Orientation Infotronics

Diplôme 2012

Alexander Osen

Enregistreur de vol

Hes·so VALAIS
WALLIS

Rte du Rawyl 47 - 1950 Sion 2

Professeur

Christophe Bianchi

Expert

Sébastien Demont

HES-HEVS-T (Sion)



EM000007488423

Sion, le 9 juillet 2012

IT / 2012 / 24

HES-SO Valais

SI	TV
X	X

Données du travail de diplôme

Daten der Diplomarbeit

FO 1.2.02.07.AB
pof/31/01/2009

<input checked="" type="checkbox"/> FSI <input type="checkbox"/> FTV	Année académique / Studienjahr 2011/2012	No TD / Nr. DA it/2012/24
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student Alexander Osen Professeur / Dozent Christophe Bianchi	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes)	

Titre / Titel <p style="text-align: center;">Enregistreur de vol</p> <p>Le travail consiste à développer un prototype permettant de trouver une solution fiable pour déterminer si le moteur d'un moto-planeur électrique tourne ou pas. Ce système doit être fermé, car il doit pouvoir être intégré dans un enregistreur de vol de type igc "International gliding commission".</p> <p>Pour déterminer une solution technique, on peut se baser sur une carte de développement avec un microcontrôleur (ex. ARM) et ensuite y ajouter une carte mezzanine avec les différents types de capteurs voulus (accéléromètre, microphone). Les données seront enregistrées, ce qui permettra de les analyser par la suite et de déterminer la solution technique la plus fiable en respectant le règlement de la Fédération Aéronautique Internationale sur les enregistreurs de vol.</p> <p>Il est possible de compléter ce projet en cherchant à déterminer la vitesse du moteur ou en fournissant un fichier de type .igc (format officiel des enregistrements), ce qui nécessite des coordonnées gps.</p> <p>Les objectifs du travail de bachelor sont de :</p> <ul style="list-style-type: none"> — valider les éléments d'analyse et la spécification du produit à développer (spécification élaborée en cours de semestre) — finaliser l'architecture du système à développer — réaliser le développement et le montage des cartes électroniques — intégrer et tester le prototype développé en conditions réelles d'utilisation. <p>La documentation du projet devra notamment comprendre, outre les éléments du travail de semestre que sont la spécification du système, un trade-off sur les capteurs, les solutions techniques; les éléments complémentaires suivants : le dossier de développement du prototype réalisé, les tests d'intégration et de validation du système, les propositions d'amélioration.</p>
--

Délais / Termine	
Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 14.05.2012	Exposition publique / Ausstellung Diplomarbeiten: 31.08.2012
Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 09.07.2012 12h00	Défense orale / Mündliche Verteidigung: Semaine / Woche 36
Signature ou visa / Unterschrift oder Visum	
Responsable de l'orientation Leiter der Vertiefungsrichtung: 	Etudiant/Student: 

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive et le caractère confidentiel du travail de diplôme qui lui est confié et des informations mises à sa disposition.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der Student, die Richtlinie einzuhalten sowie die Vertraulichkeit der Diplomarbeit und der dafür zur Verfügung gestellten Informationen zu wahren.

Enregistreur de vol

Diplômant

Alexander Osen

Objectif du projet

Ce travail consiste à développer un prototype d'enregistreur de vol spécifique au moto-planeur électrique, il doit donc pouvoir enregistrer la position du planeur et détecter si le système de propulsion est en marche.

Méthodes | Expériences | Résultats

Le projet a nécessité un travail de recherche sur les techniques de détection d'un système de propulsion électrique à hélice. Ceci a finalement permis de sélectionner deux types de capteurs qui sont : un enregistreur audio et un accéléromètre. Avec les données de ces capteurs, il est possible d'obtenir la vitesse de rotation du moteur en étudiant l'analyse fréquentielle du système de propulsion qui est générée à l'aide d'une FFT. Ces techniques de détection ont pu être vérifiées en effectuant des mesures préliminaires sur un banc d'essai ainsi que sur un moto planeur électrique.

Connaissant les capteurs et les algorithmes nécessaires, un prototype a été développé. Le prototype utilise une carte de développement de type OLIMEX STM32-103STK et une mezzanine qui regroupe tous les capteurs.

Concernant le développement software, il a fallu dans un premier temps communiquer avec tous les capteurs et ensuite développer un interface utilisateur permettant de vérifier la fonctionnalité du prototype.

La version actuelle du prototype permet de visualiser les données des capteurs, de détecter la vitesse de rotation du moteur et d'enregistrer des fichiers de type .igc sur une carte SD.

Travail de diplôme | édition 2012 |

Filière

Systèmes industriels

Domaine d'application

Infotronics

Professeur responsable

Christophe Bianchi

christophe.bianchi@hevs.ch

Partenaire

Lange Aviation GmbH



Table des matières

1. Lexique.....	6
2. Introduction	7
3. Objectifs	8
3.1. Cahier des charges	8
3.2. Démarches	8
4. Recherche et analyse	9
4.1. Les phénomènes	9
4.2. Analyse sonore.....	10
4.2.1. Principe	10
4.2.2. Capteurs	10
4.2.3. Tests préliminaires	10
4.2.4. Bilan	15
4.3. Analyse cinétique.....	16
4.3.1. principe	16
4.3.2. capteurs	16
4.3.3. tests préliminaires.....	16
4.3.4. Bilan	20
4.4. Analyse visuelle.....	20
4.4.1. principe	20
4.4.2. bilan.....	20
4.5. Bilan de l'analyse.....	20
5. Développement hardware	21
5.1. Architecture	21
5.2. Composants	22
5.2.1. Microphone.....	22
5.2.2. Accéléromètre.....	23
5.2.3. GPS Venus 638	23
5.3. Capteur de pression BMP085	24
5.3.1. Carte de développement	24
5.4. Protocole de communication.....	27
5.4.1. I2C	27

5.4.2.	SPI.....	27
5.4.3.	UART.....	27
5.5.	Consommation.....	27
5.6.	Prix	28
5.7.	Design du Prototype	28
5.7.1.	Carte de développement	28
5.7.2.	Mezzanine	28
6.	Développement software	30
6.1.	Environnement de développement.....	30
6.2.	Implémentation	31
6.2.1.	Boucle principale.....	31
6.2.2.	Timer	31
6.2.3.	ADXL.....	31
6.2.4.	LIS.....	32
6.2.5.	SD	32
6.2.6.	GPS	32
6.2.7.	Test.....	32
6.2.8.	FFT.....	32
6.2.9.	Algorithmes de détection	34
6.2.10.	Interface utilisateur.....	35
7.	Test et Validation	37
7.1.	Consommation énergétique	37
7.2.	Consommation mémoire	37
7.3.	FFT et capteurs audio et Accéléromètre.....	38
7.4.	Algorithme de détection du moteur avec générateur de signal	38
7.5.	Fichiers IGC & GPS.....	38
7.6.	Test en vol du détecteur de propulsion.....	39
8.	Bilan et améliorations	41
9.	Conclusion.....	41
10.	Remerciements	41
11.	Références	42
12.	Annexes.....	42
12.1.	ANNEXE 1 - Schématique PCB.....	43
12.1.1.	ANNEXE 1.1 - Schématique global de la mezzanine	44

12.1.2.	ANNEXE 1.2 - Schématique du bloque GPS	45
12.1.3.	ANNEXE 1.3 - Schématique du bloque connecteurs.....	46
12.1.4.	ANNEXE 1.4 :Schématique du bloque accélérometre	47
12.1.5.	ANNEXE 1.5 - Schématique du bloque capteur de pression.....	48
12.2.	ANNEXE 2 - Procédure test	49
12.3.	ANNEXE 3 - Structogrammes	51
12.3.1.	ANNEXE 3.1 - Structogramme de la boucle principale	52
12.3.2.	ANNEXE 3.2 - Structogramme du Timer	53
12.3.3.	ANNEXE 3.3 -Structogramme de l'Interface Utilisateur.....	54
12.3.4.	ANNEXE 3.4 - Structogramme du GPS	55
12.4.	ANNEXE 4 - Code.....	56
12.4.1.	ANNEXE 4.1 - global.h	56
12.4.2.	ANNEXE 4.2 - types.h	56
12.4.3.	ANNEXE 4.3 - main.c	56
12.4.4.	ANNEXE 4.4 - tick.c.....	56
12.4.5.	ANNEXE 4.5 - adc.c.....	56
12.4.6.	ANNEXE 4.6 - adxl.c.....	56
12.4.7.	ANNEXE 4.7 - audio.c	56
12.4.8.	ANNEXE 4.8 - buttons.c.....	56
12.4.9.	ANNEXE 4.9 - gps.c.....	56
12.4.10.	ANNEXE 4.10 - gui.c	56
12.4.11.	ANNEXE 4.11 - lcd.c.....	56
12.4.12.	ANNEXE 4.12 - lisAcc.c	56
12.4.13.	ANNEXE 4.12 - sd.c.....	56
12.5.	ANNEXE 5 - CD.....	57

1. Lexique

- ADC** : (*Analog-to-Digital Converter*) permet de convertir un signal analogique en signal numérique
- LCD** : (*Liquid Crystal Display*) est un écran permettant d'afficher des valeurs
- IGC** : (International Gliding Commission) Organisme international du Vol à Voile
- RPM** : (Rotation per Minute) Rotations par minute
- ADXL** : nom de l'accéléromètre externe utilisé
- LIS** : nom de l'accéléromètre intégré dans la carte
- FFT** : (Fast Fourier Transform) permet de passer un signal du domaine temps au domaine fréquentiel
- GNSS** : (*Global Navigation Satellite System*) Système de positionnement par satellite
- UART** : (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) émetteur - récepteur pour le port Série
- SPI** : (*Serial Peripheral Interface*) Protocole de communication
- I2C** : (*Inter Integrated Circuit*) Protocole de communication
- .igc** : format fichier utilisé pour tracer des vols

2. Introduction

Le premier vol a été effectué en 1896 par Otto Lilienthal, ensuite en 1903 les frères Wright effectuent le premier vol motorisé. Depuis ces premiers vols l'aviation n'a cessé d'évoluer, et aujourd'hui le grand challenge est de construire des avions écologiques qui ne rejettent pas de CO₂.

Parmi les avions écologiques, on trouve notamment les moto-planeurs de type Antares, qui sont des moto-planeurs innovateurs construits par Lange Aviation GmbH. L'Antares 20E est le premier et toujours le seul avion du monde certifié et commercialisé avec une motorisation électrique. Avec ces 80 kg de batteries Lithium-Ion et son moteur électrique qui fournit une puissance maximale de 42KW, il peut décoller tout seul et ensuite grimper à une altitude de 3000 mètres par rapport à son point de départ.

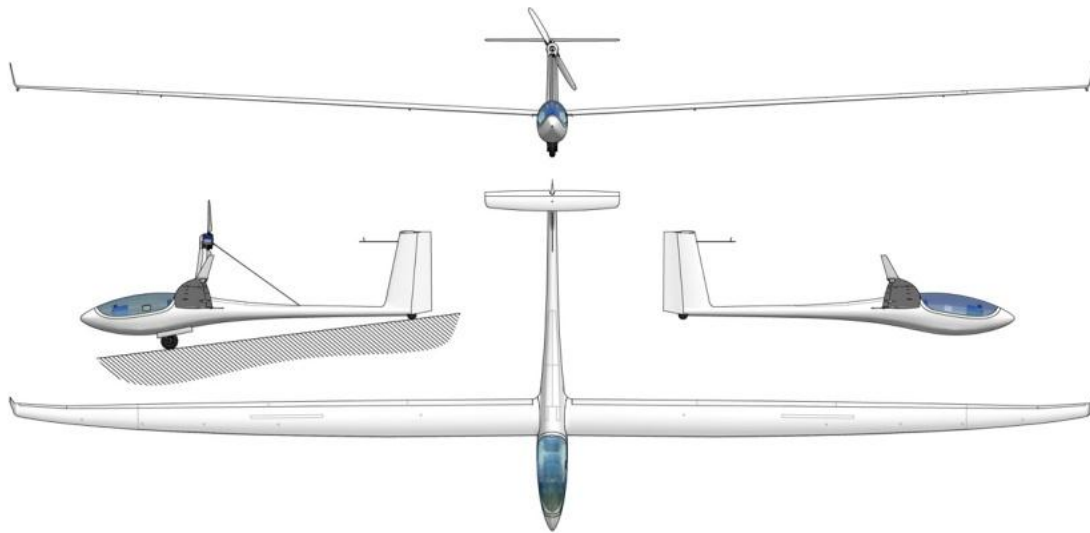


Figure 1: Plan 3 Vues de l'Antares 23E

Depuis le premier vol de l'Antares 20E qui a été effectué en 2003, une cinquantaine d'Antares 20E participent aujourd'hui dans des compétitions set d'autres épreuves aéronautiques. Pour l'International Gliding Commission (IGC), qui approuve des appareils dits « enregistreur de vol » pour surveiller les performances de planeur, le moteur silencieux de l'Antares pose un vrai problème.

L'IGC est un département de la Fédération aéronautique Internationale, et responsable pour réglementer le monde des planeurs et de mettre en place des règles pour les compétitions et les records. C'est exactement dans ce domaine là que le problème se situe, car depuis 1995 un règlement exige que tous les moto-planeurs doivent être équipés d'un enregistreur permettant de détecter quand le système de propulsion est en marche. Avant l'arrivée de l'Antares, tous les enregistreurs de vol mesuraient simplement le niveau sonore crée par le moteur à essence, qui était très fort et continu. Cependant, avec des moteurs électriques, des mesures plus sophistiquées doivent étre utilisées.

L'IGC a donc demandé à Lange Aviation et les fabricants d'enregistreurs de vol d'étudier des solutions pour résoudre ce problème. Ce travail de diplôme est une contribution à ces études.

3. Objectifs

3.1. Cahier des charges

Le cahier des charges a été défini en deux étapes, dans un premier temps pour les besoins de l'entreprise mandataire puis ensuite consolidé avec le professeur dans le cadre du travail de diplôme.

Les besoins de Lange Aviation sont de trouver une solution fiable permettant de détecter l'activité du système de propulsion de leurs moto-planeurs. Cette solution doit pouvoir être intégrée dans les futurs enregistreurs de vol, et elle doit donc respecter les points suivants :

- consommer peu d'énergie
- si possible facile à intégrer dans un boîtier d'un enregistreur de vol
- être peu coûteux
- être difficile de truquer les résultats du détecteur par le pilote ou une tierce personne.

Dans le cadre du travail de diplôme, il faut développer un prototype d'enregistreur de vol intégrant le système de détection. Le prototype doit donc respecter les points suivants :

- être mobile donc compacte et consommer peu d'énergie
- pouvoir déterminer sa position
- pouvoir générer un fichier de type .igc (fichier standard pour les enregistreurs de vol)
- respecter le plus possible les normes établies par l'IGC

3.2. Démarches

Afin de mener à bien ce projet, les étapes suivantes doivent être réalisées :

- 1) Effectuer une étude préliminaire sur la détection du moteur électrique pour permettre d'établir les techniques de détection les plus fiables.
- 2) Développer une carte de développement intégrant les capteurs définis dans le point 1.
- 3) Développer un software permettant d'effectuer les principales tâches d'un enregistreur de vol et détecter l'activité du système de propulsion.

4. Recherche et analyse

Dans ce chapitre, les phénomènes liés au système de propulsion de l'Antares sont étudiés. Un travail de recherche sera ensuite effectué pour déterminer les moyens de détection possible.

4.1. Les phénomènes

Le système de propulsion de l'Antares utilise un moteur électrique de type « brushless » qui fournit une puissance maximale de 42 kW. Sur celui-ci est fixée une hélice composée de 2 pales d'une longueur de 1 mètre chacune.



Figure 2 : système de propulsion de l'Antares

Afin de générer de la poussée suffisante permettant le décollage du moto-planeur, la vitesse de rotation du moteur atteint une vitesse de 1700 RPM. En l'air, la vitesse de rotation du moteur est située entre 1200 et 1700 RPM selon la force de poussée voulue.

À ces vitesses-là, notre hélice génère passablement de bruit, et d'après la certification du planeur, il peut monter jusqu'à 45 dB lors du décollage. Ce bruit est caractérisé par les chocs entre l'air et l'hélice lors de sa rotation, et il est possible de lui attribuer des harmoniques qui correspondent à des multiples de la fréquence de passage des pales près du fuselage.

$$\text{Fréquence} = \frac{\text{RPM} * \text{NbrDePales}}{60}$$

Équation 1: Relation RPM et fréquence de l'harmonique fondamentale de l'hélice

Cette équation donne la fréquence de passage des pales et va permettre de déterminer la vitesse de rotation. Il faut donc rechercher des capteurs capables d'obtenir les fréquences de ces harmoniques.

4.2. Analyse sonore

4.2.1. Principe

Lors des chocs entre l'air et l'hélice, des ondes sonores sont générées. Ces ondes ont une fréquence spécifique à la vitesse de rotation du moteur et elle respecte l'équation 1.

4.2.2. Capteurs

Il existe deux types de capteurs audio capables de détecter les ondes sonores :

Les microphones de contacts : Ils doivent être fixés sur une structure solide et utilisent les vibrations de celle-ci pour fournir des mesures sur le son. Dans notre cas de recherche, les capteurs doivent être fixés sur la structure pour mesurer les vibrations du moteur.

Les microphones à membranes : Ils utilisent les variations de pression pour obtenir des données audio. Les microphones à membranes ont été choisis pour ces mesures, car il y a moins de contraintes d'emplacement et pourraient facilement être intégrés dans un boîtier fermé.

4.2.3. Tests préliminaires

Des mesures préliminaires ont été effectuées sur un banc d'essai ainsi que sur un Antares 20E afin de valider ce moyen de mesure. Un enregistreur de type Nagra BB avec un microphone studio a été utilisé afin d'obtenir des échantillons audio. Ces échantillons seront ensuite traités avec un logiciel nommé Cool Edit pro2 qui permet d'obtenir une analyse fréquentielle d'un échantillon.

Banc d'essai

Pour ces tests préliminaires, un ventilateur de salon a été utilisé comme banc d'essai. Cela permet d'obtenir des mesures rapidement et d'obtenir plusieurs configurations connues (vitesse de rotation).

Dans un premier temps, il a été important de déterminer la vitesse de rotation de l'hélice du banc d'essai selon sa configuration afin de pouvoir comparer les résultats des analyses audio avec les paramètres réels du banc d'essai. Pour mesurer cela, un tachymètre a été utilisé et a permis de compléter le tableau 2.

Configuration Ventilateur	Tachymètre	RPM du moteur	Fréquence du moteur	Fréquence des pales
1	2862	954	15.9	47.7
2	3430	1143.3	19.1	57.2
3	3842	1280.7	21.3	64.0

Tableau 1 : Vitesses de rotation du ventilateur

Ensuite, des échantillons audio ainsi que des niveaux sonores ont été enregistrés autour du ventilateur afin de mieux comprendre la propagation des ondes sonores. Sur la figure 3, vous trouverez les différents points de mesures utilisés.

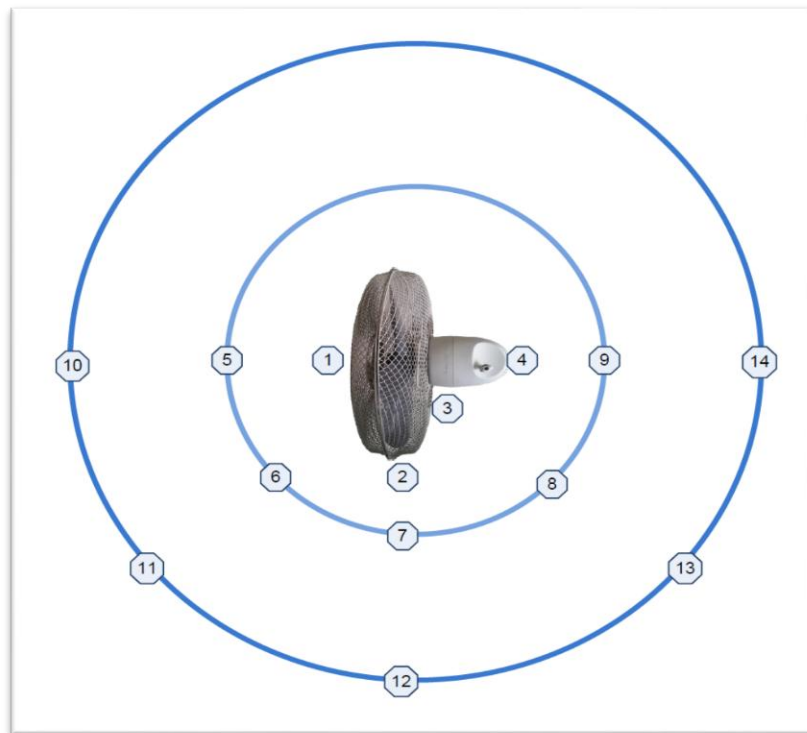


Figure 3 : Points de mesure autour du ventilateur

Les mesures du niveau sonore donnent le tableau suivant :

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Configuration 1	59	62.6	66.2	56.5	48	46.5	44.7	45.8	46.1	44	44.5	43.6	43.8	43.4
Configuration 2	64.7	62.7	71.2	58.5	53	51	49.1	50.7	50.3	48.2	48.8	48	47.7	48
Configuration 3	65.5	66	75.2	61.5	56	53	51.6	53	52.9	50.4	50.3	50.3	50.5	50.5

Tableau 2: résultats des niveaux sonores autour du ventilateur

L'analyse du niveau sonore donne les informations suivantes :

- Une faible augmentation de niveau avec une augmentation du RPM.
- Un affaiblissement du niveau sonore en augmentant la distance avec le ventilateur.
- Une faible variation du niveau sonore autour du ventilateur
- Une stabilisation du niveau sonore autour du ventilateur avec la distance

En effectuant une FFT des échantillons audio, il a été possible d'analyser le comportement fréquentiel des ondes sonores autour du ventilateur.

Ces analyses donnent des courbes comme celles de la figure 4. Pour chacune des figures, plusieurs enregistrements audio sont comparés ce qui permet de voir l'évolution des fréquences avec des configurations différentes.

Comparaison 1 : Le but de cette comparaison est de déterminer si les enregistrements effectués autour du ventilateur à une même distance montrent les mêmes harmoniques. Un premier test a été effectué avec les points 1, 2, 3 et 4 et le ventilateur ayant la configuration 3 (voir tableau 2). Et un second test avec les points 5,6, 7,8 et 9 et le ventilateur ayant aussi la configuration 3.



Figure 4: Les courbes (points 1, 2,3 et 4) après FFT montrent une unification des harmoniques à 65Hz et 86Hz

La figure 4 montre que l'harmonique représentant la fréquence des pales est très visible ainsi que la 4eme harmonique du moteur ($4 \times 21.5 = 86 \text{ Hz}$) sur toutes les courbes. La 2eme harmonique est aussi visible à 43 Hz, mais pour seulement 2 des courbes.

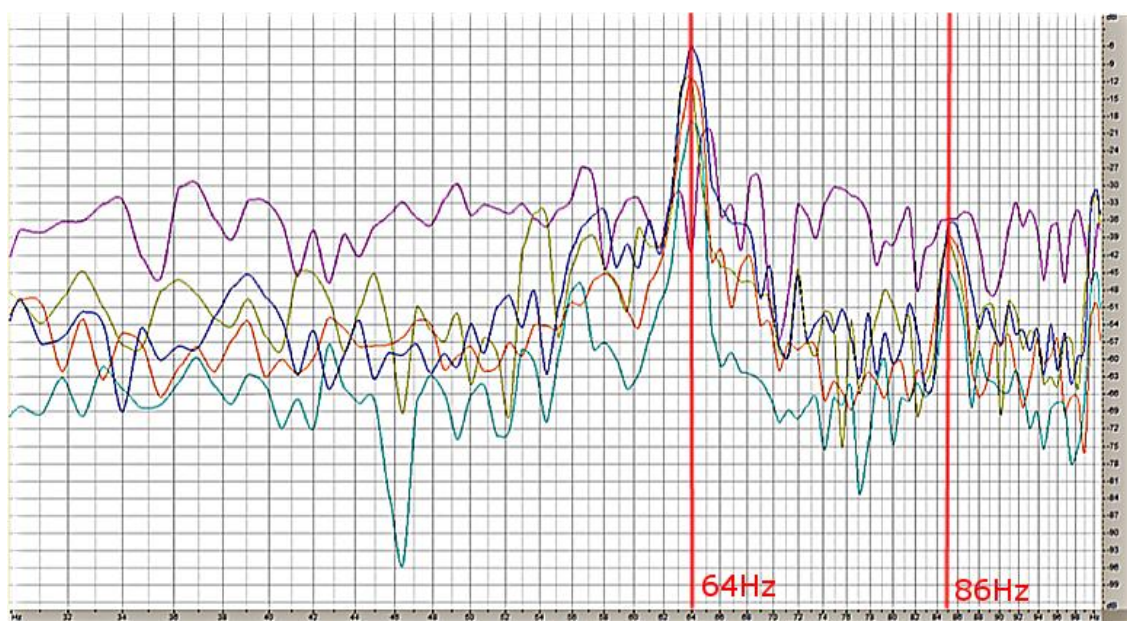


Figure 5 : Les courbes (points 5, 6, 7, 8 et 9) après FFT montrent l'unification des harmoniques

Les mesures effectuées à 1 mètre confirment les mesures de la figure 5. Une légère variation de fréquence de l'harmonique du passage de pales est visible, cette différence sera traitée dans la comparaison 2.

Comparaison 2 : Ce test consiste à comprendre la propagation du signal en éloignant le microphone du ventilateur. Les 3 courbes ont été enregistrées aux positions 2, 7, 12 avec le ventilateur en configuration 2



Figure 6 : Les courbes (points 2, 7 et 12) après FFT montrent l'évolution des harmoniques

Les 3 courbes de la figure 6 montrent que l'harmonique de la fréquence de passage de pales est très proche malgré l'éloignement du microphone. Il est important de noter que ces enregistrements n'ont pas été effectués au même moment ce qui peut expliquer les faibles variations de fréquence ($\Delta f < 1,5$ Hz). De plus, la fréquence n'augmente pas d'une façon linéaire avec la distance, car la courbe bleue est effectuée à 1 mètre (57,5 Hz), la courbe jaune à 3 mètres (58 Hz) et la courbe violette sur le ventilateur (59 Hz). Ce graphique permet aussi de constater que les mesures effectuées sur le ventilateur permettent de distinguer plus nettement les harmoniques principales.

Ces comparaisons ont permis de comprendre le comportement du signal et il est possible d'en déterminer les points suivants :

- L'harmonique qui représente la fréquence de passage du moteur est la plus visible.
- La deuxième et la 4ème harmonique du RPM sont aussi très visibles
- Les mesures effectuées autour du ventilateur avec une même distance donnent les mêmes harmoniques.
- Il y a une faible diminution de l'amplitude des harmoniques principales selon sa position autour du ventilateur ou en éloignant le capteur du ventilateur.
- Il peut y avoir des faibles variations de fréquence ($< 1,5$ Hz) pour les harmoniques en éloignant le microphone.

Antares 20E

Les mesures sur l'Antares 20E ont été effectuées pour vérifier les mesures dans le milieu d'utilisation du prototype qui comporte beaucoup plus d'interférences. Elles ont été effectuées avec le même système

d'enregistrement qui a été fixé dans le cockpit lors des vols d'essai. Une procédure de test visible en annexe 2 a été créée pour aider le pilote d'effectuer les tests et pour faciliter le traitement de l'enregistrement audio. Les mesures audio ont permis de confirmer les points suivants :

- Les harmoniques principales sont toujours facilement détectables (le double de l'amplitude par rapport au reste du signal). Elles sont toutes des multiples de la fréquence fondamentale qui représente le RPM du moteur.

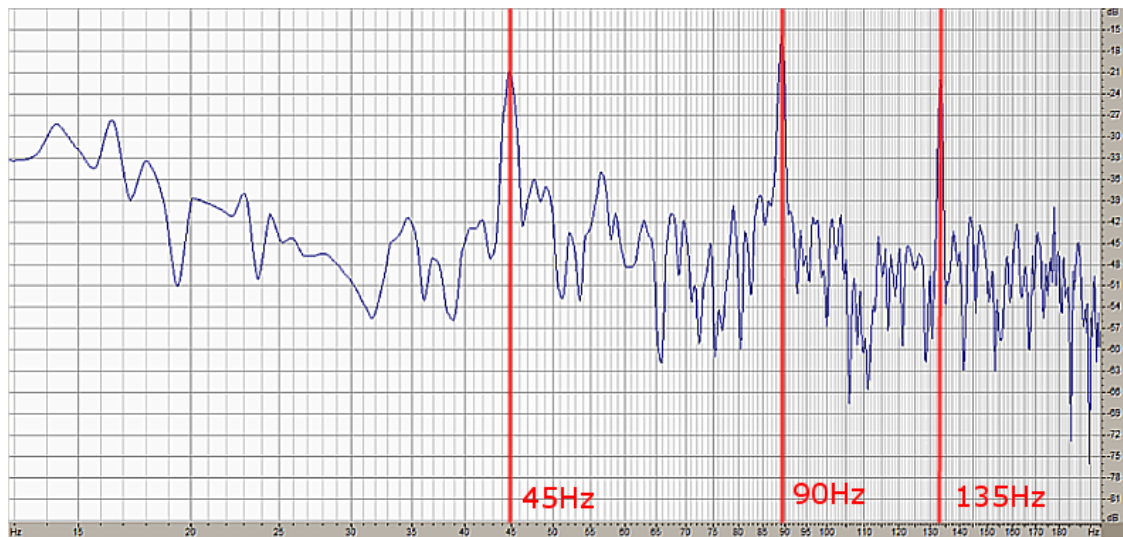


Figure 7 : FFT d'une mesure audio effectuée sur l'Antares 20E (point de mesure 8 de la procédure)

- Les fréquences des harmoniques semblent corrélérer avec la vitesse de rotation du moteur, mais il est difficile de confirmer cela, car il n'y a pas d'enregistrement du RPM du moteur lors de ces mesures. Cependant lors d'une augmentation du RPM du moteur annoncé par le pilote, il y a une augmentation de la fréquence des harmoniques.
- Les variations de vitesse des planeurs n'influencent pas les fréquences des harmoniques pour une même vitesse de rotation du moteur. Cela a été testé en configurant une certaine vitesse de rotation du moteur et en variant la vitesse du planeur (voir figure 9 et 10).
- Le bruit à l'intérieur du cockpit (ouverture de la ventilation, etc.) n'influence que faiblement l'amplitude des harmoniques.

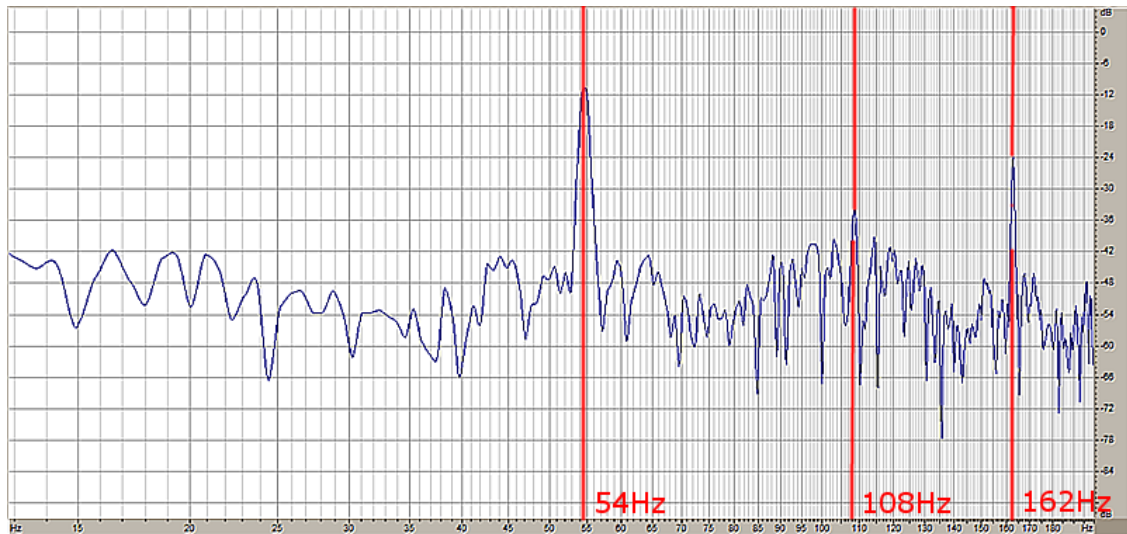


Figure 8 : FFT d'une mesure audio effectuée sur l'Antares 20E (point de mesure 11 de la procédure)

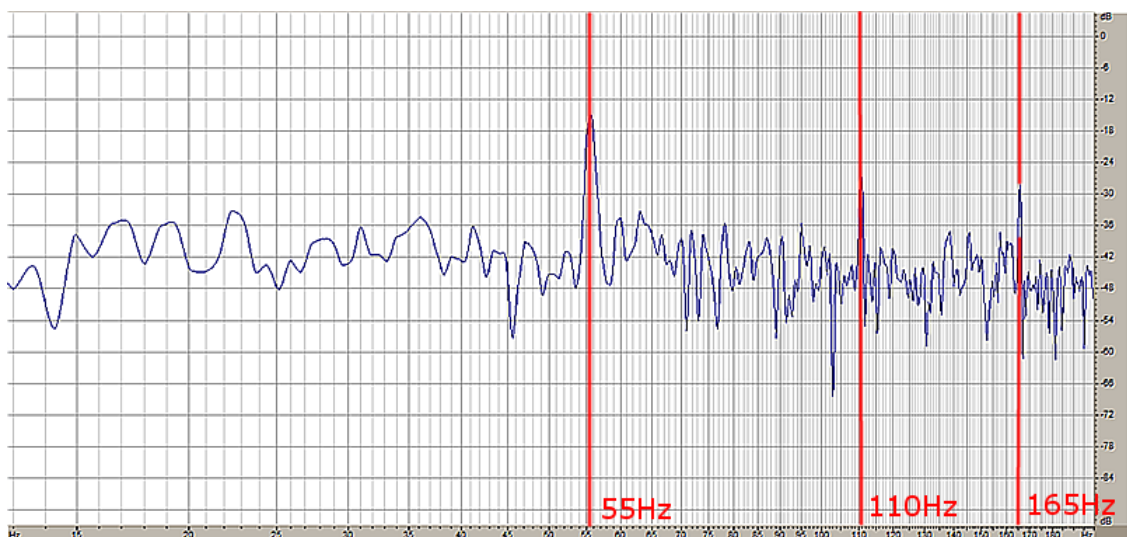


Figure 9 : FFT d'une mesure audio effectuée sur l'Antares 20E (point de mesure 19 de la procédure)

4.2.4. Bilan

Les mesures effectuées sur le banc d'essai montrent que l'analyse des niveaux sonores ne permettra pas de déterminer la vitesse de rotation, car les valeurs obtenues sont trop instables. Cependant, les analyses fréquentielles des échantillons donnent des bons résultats et démontrent qu'une analyse du signal permettra d'obtenir les fréquences des harmoniques donc le RPM du moteur. Ces résultats ont été confirmés avec les essais sur l'Antares et les données restent bonnes dans toutes les configurations de vol testé.

4.3. Analyse cinétique

4.3.1. principe

La cinétique regroupe tous les phénomènes liés au mouvement. Dans le d'un système de propulsion a hélice, il y a plusieurs phénomènes qui sont présents : la rotation de l'hélice et les vibrations.

4.3.2. capteurs

La rotation du moteur peut être détecté à l'aide d'un compteur incrémental qui donne l'angle du l'hélice. L'évolution de cet angle dans le temps permet de donner la vitesse de rotation. Le point négatif de ce capteur est qu'il doit être fixé sur le moteur ce qui n'est pas une solution pour le prototype.

Les vibrations générées lors de la rotation du moteur se propagent dans toute la structure du planeur. Il serait donc possible d'utiliser des capteurs de vibration que l'on doit positionner sur la structure. Ces capteurs ont aussi des contraintes d'emplacement, mais afin de mieux comprendre le comportement des vibrations sur la structure, une analyse vibratoire sera effectuée lors des mesures préliminaires.

4.3.3. tests préliminaires

Les tests préliminaires de vibration utilisent de nouveau le banc d'essai ainsi que l'Antares 20E. Pour ces mesures, le capteur de vibration utilisé est un produit Piezotronic avec le module d'alimentation (482A05) et l'accéléromètre piézoélectrique (308B15). L'accéléromètre a une précision de 100mV/G ce qui permettra de déterminer la sensibilité du capteur nécessaire.

Les signaux obtenus sont ensuite lus avec un analyseur de spectre ce qui donne un signal dans le domaine fréquentiel.

banc d'essai

Les mesures seront effectuées à plusieurs endroits autour du ventilateur pour analyser la propagation des ondes, tout en changeant les configurations du banc d'essai.

Une première analyse des courbes (exemple figure 10) a permis de compléter le tableau 3.

Configuration Ventilateur	RPM	Fréquence Moteur	Fréquence Pales	1 ^{er} peak	2eme peak	3eme peak
1	954	15.9	47	16	31.5	48.3
2	1143	19	57	19.25	38.3	57.5
3	1286	21.4	64	21.5	43	64.3

Tableau 3: Fréquences des harmoniques lors de l'étude des vibrations

Ce tableau montre que le premier peak est l'harmonique fondamental avec les peaks 2 et 3 comme harmoniques secondaire, car ils sont des multiples de la fréquence du premier peak :

$$\frac{48.3}{3} = 16.1 \approx \frac{31.5}{2} = 15,75 \approx 16$$

De plus, la fréquence du moteur est très proche du premier harmonique et la fréquence des pales est très proche de la 3eme harmonique (tableau 3). Une légère différence entre les fréquences est visible, car les mesures n'ont pas été effectuées en même temps et une légère variation de vitesse de rotation est possible.

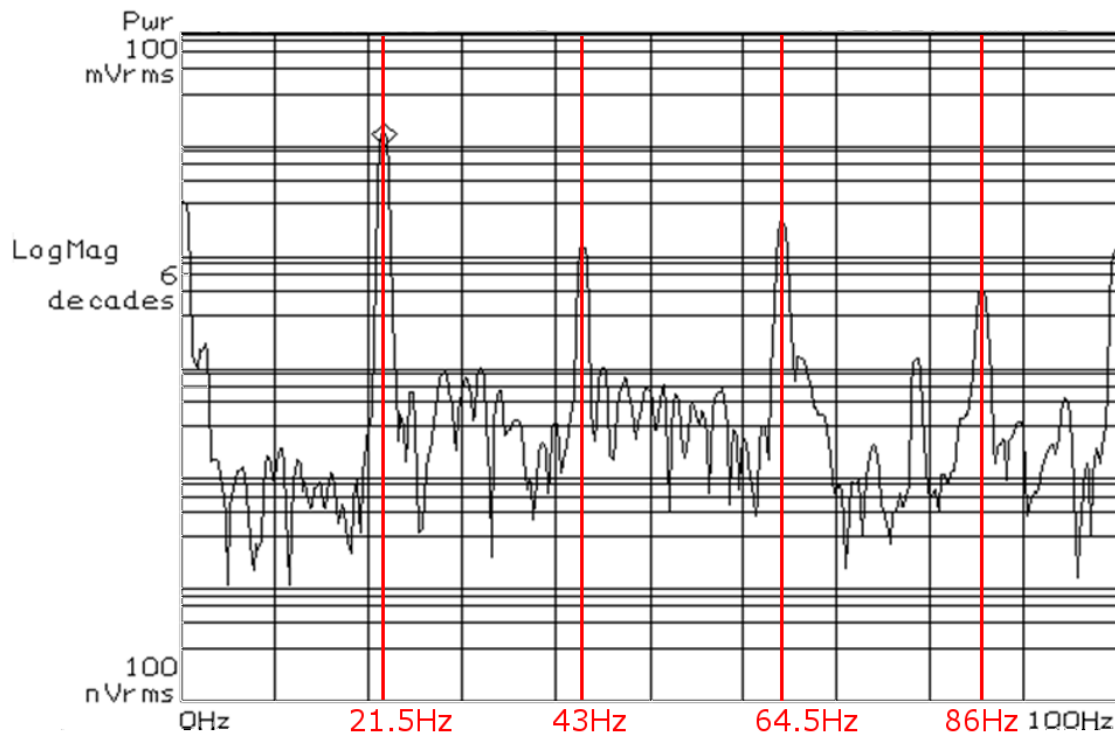


Figure 10 : FFT avec un capteur de vibration situé sur le ventilateur

Une deuxième analyse a été effectuée pour vérifier la propagation des mesures. La figure 11 montre une mesure effectuée au pied du ventilateur (à 1 mètre du moteur) et la figure 12 montre la mesure effectuée au sol à environ 2 mètres du moteur.

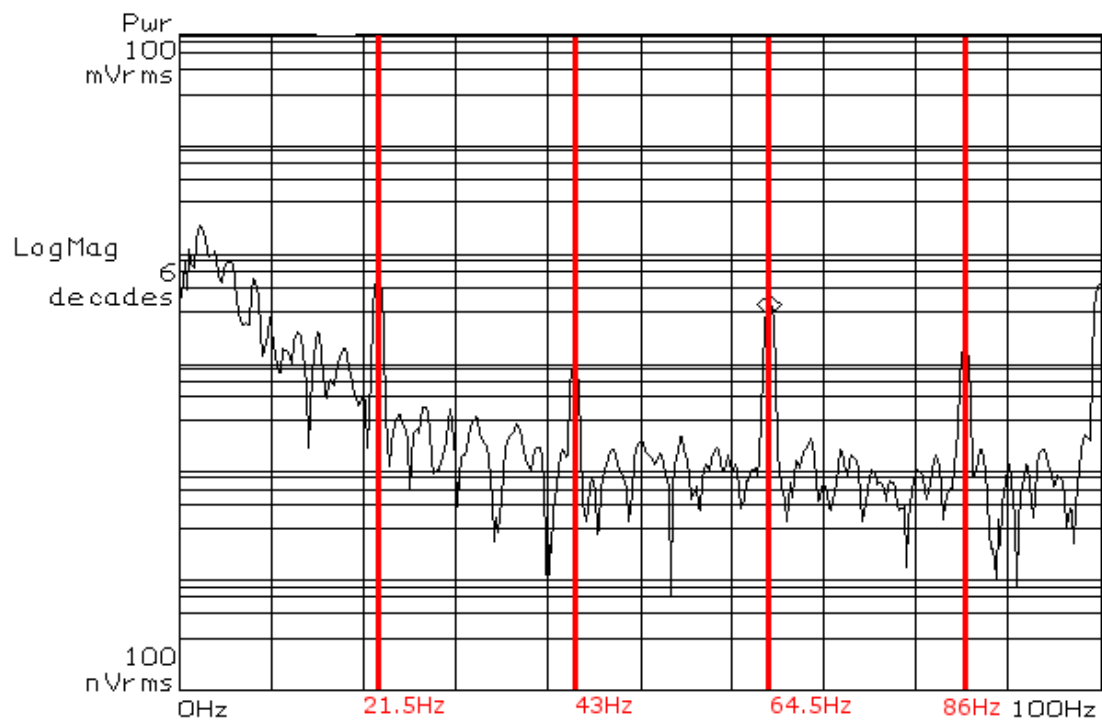


Figure 11: FFT effectué avec un capteur de vibration situé sur le pied du ventilateur

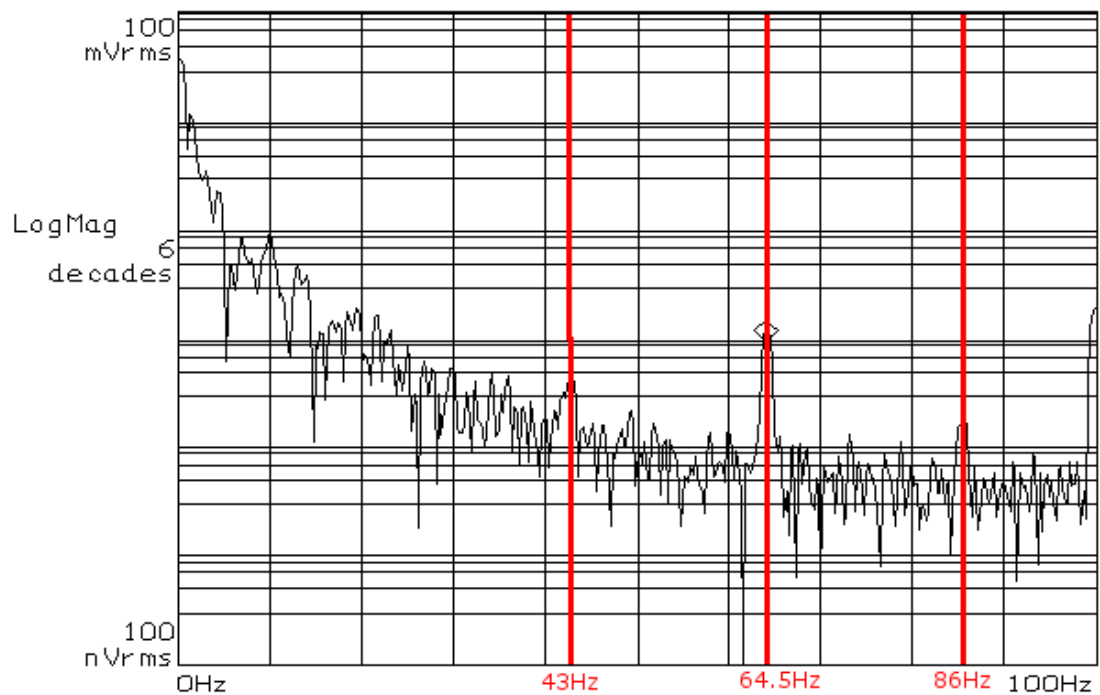


Figure 12 : FFT effectué avec un capteur de vibration situé à 1 mètre du ventilateur

Cette deuxième analyse montre que les ondes se propagent bien le long de la structure sans modifier la fréquence des harmoniques.

Sur la figure 12, l'harmonique fondamentale n'est plus visible du au bruit, mais il ne faut pas oublier que le ventilateur était simplement posé sur le sol. Il faudra s'assurer que le point de fixation de l'accéléromètre soit sur une structure relié au moteur.

Les premiers tests préliminaires ont donc déterminé les points suivants :

- Les harmoniques principales sont facilement détectables.
- Les ondes ont une bonne propagation jusqu'à une distance de 3 mètres (faible affaiblissement et pas de changement de fréquence).
- Les fréquences corrélerent avec la fréquence du ventilateur
- Les harmoniques sont des multiples de la fondamentale

Antares

Les mesures effectuées sur l'Antares ont dû être très restreintes, car il a été impossible de faire des mesures en l'air, car notre système de mesures avait besoin d'une alimentation 230V. Cependant, des mesures ont pu être effectuées au sol.

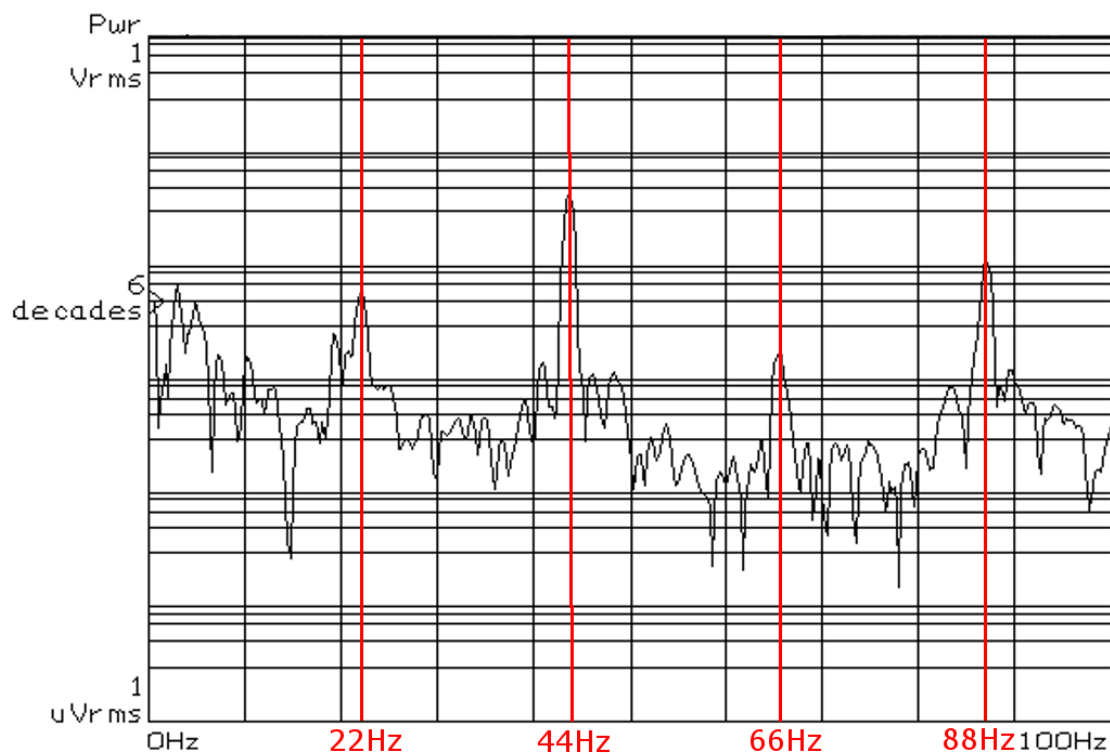


Figure 13 : FFT effectuée avec un capteur de vibration dans l'Antares

La courbe de la figure 13 démontre de nouveau qu'il serait possible de trouver les harmoniques avec un capteur de vibration.

Concernant la sensibilité nécessaire pour le futur capteur, la figure 13 montre une différence entre le sommet des harmoniques et le bruit moyen de 10mV. Ceci donne demande une précision d'au moins 0.05G pour garder de la marge.

4.3.4. Bilan

Les résultats obtenus sont convaincants. Ce type de capteur sera donc intégré au prototype ce qui permettra enfin d'analyser le comportement vibratoire en l'air. Si les résultats sont concluants, un algorithme de détection pour ce type de capteur pourra être implémenté.

Pour approfondir les tests, il serait intéressant d'intégrer un accéléromètre sur la carte de développement et un autre qui soit mobile. Ceci permettrait de comparer leurs valeurs et de vérifier si un capteur situé sur la carte permettrait de détecter le comportement du moteur.

4.4. Analyse visuelle

4.4.1. principe

L'analyse visuelle consiste à vérifier le déplacement de l'hélice à l'aide d'une caméra. Cette méthode nécessite une caméra qui fournit des images à une très haute fréquence et un processeur assez puissant pour traiter rapidement l'image. La fréquence de traitement d'image doit être supérieure à la fréquence maximale de rotation du moteur afin de ne pas oublier des passages de pales.

4.4.2. bilan

Ce type d'analyse nécessite des puissances de calcul très élevées, des algorithmes très complexes et des contraintes de positionnement et ne sera donc pas intégré au prototype.

4.5. Bilan de l'analyse

L'analyse a mis en avant deux types de capteurs qui seront utilisés pour la détection du moteur qui sont un accéléromètre et un microphone à membrane. Il a aussi permis de définir les étapes nécessaires pour détecter l'activité du moteur qui sont :

- 1) enregistrement de données
- 2) traitement de données avec une FFT pour passer au domaine fréquentiel
- 3) traiter le signal du domaine fréquentiel avec un algorithme d'analyse pour déterminer le RPM du moteur

5. Développement hardware

Cette deuxième partie traite les étapes effectuées pour le développement hardware. L'objectif est d'obtenir un prototype basé sur une carte de développement avec tous les capteurs nécessaires.

5.1. Architecture

Suite aux études effectuées précédemment, le prototype devra regrouper les capteurs suivants : un microphone à membrane et un accéléromètre 3 axes. De plus, il faudra intégrer un capteur GPS, un capteur de pression et un système de lecture rapide des données (USB ou SD) afin de respecter le règlement IGC. Une interface utilisateur devra aussi être intégrée pour faciliter l'utilisation du prototype ainsi qu'un microcontrôleur assez puissant capable d'effectuer les tâches nécessaires. L'architecture du prototype est représentée sur la figure 14.

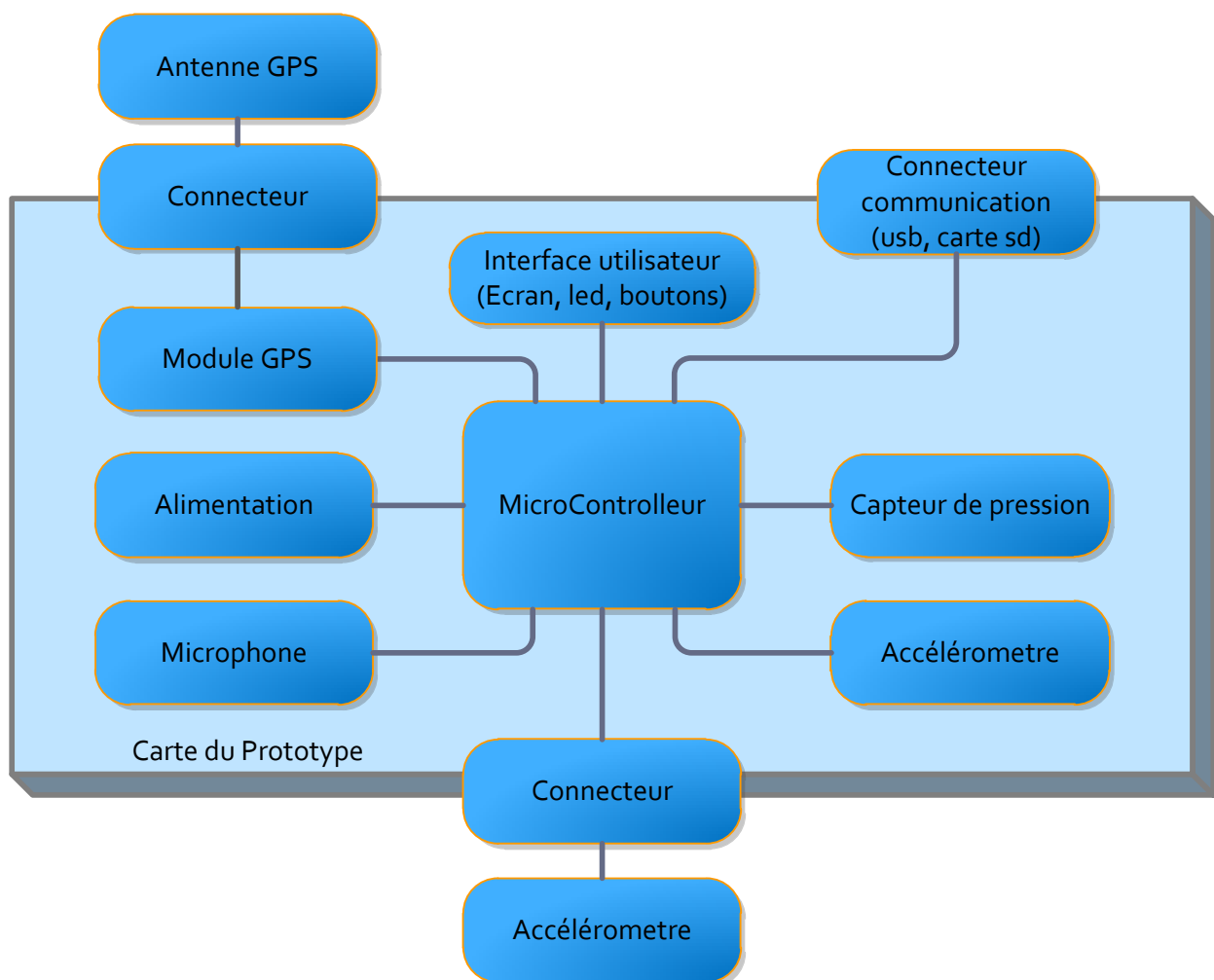


Figure 14 : Architecture du prototype

5.2. Composants

5.2.1. Microphone

Le système audio qui est intégré dans des systèmes embarqués est divisé en plusieurs parties : le microphone, le préamplificateur et le convertisseur AD qui lui peut être intégré dans le microcontrôleur.

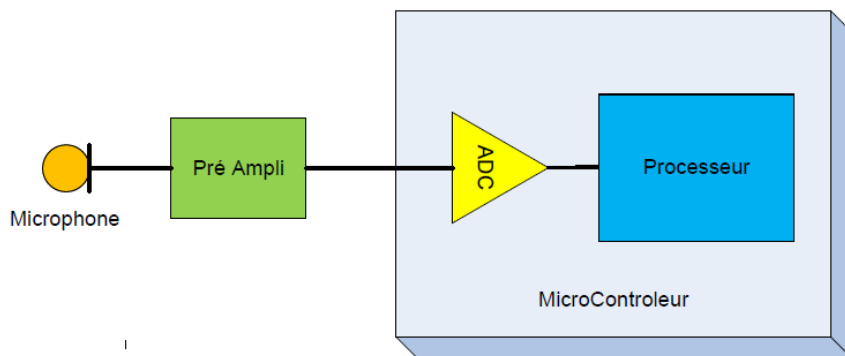


Figure 15 : Schéma bloc du système audio

Le système audio intégré dans le prototype doit pouvoir enregistrer le bruit émis par le système de propulsion. Ce bruit est caractérisé par une fréquence très basse située entre 10 et 200 Hz, il faudra donc vérifier que microphone ne possède pas de filtre qui influence les données à basses fréquences.

De plus selon la carte de développement choisi, il y a deux solutions. Dans le cas où il n'y a pas d'entrée audio intégrée, il faudra ajouter un module complet avec préamplificateur et microphone. Dans l'autre cas où la carte de développement possède une entrée audio, il faudra seulement trouver un microphone compatible avec le connecteur de la carte. Heureusement, la carte choisie possède une entrée audio utilisant un mini-jack.

Concernant l'ADC, il faut vérifier si celui-ci est assez précis, mais de nos jours la plus part des microcontrôleurs ont des convertisseurs à 12 bits ce qui est suffisant.

Le microphone "0057151 Notebook Mini-Mikrofon" de chez Hama a été choisi, car il répond à toutes les exigences recherchées qui sont :

- bonne lecture des basses fréquences (jusqu'à 30 Hz selon le fabricant).
- compact (23 mm x 7 mm).
- pas d'alimentation externe.
- faible cout (6.45 CHF).

5.2.2. Accéléromètre

Les accéléromètres utilisés dans le prototype doivent respecter les minimums déterminés lors des essais préliminaires qui sont :

- précision élevée d'au moins 0.5 G
- un spectre d'au moins 2 G
- fréquence d'échantillonnage de 500Hz

Mais en plus ces contraintes, il faut un capteur qui soit petit, peu coûteux et facile à intégrer dans un prototype. Un grand choix de capteur est disponible, quelques exemples de composants sont comparés dans le tableau 4.

Modèle	Axes	Tension	Consommation	Avail. Range (g)	Sensibilité	Freq. Normal	Com	Prix
ADXL345	3	2 -3.6	145 μ A	2, 4, 8, 16	256 LSB/g at 2g	1600	SPI, I2C	14.50 CHF
ADXL330	3	1.8 - 3.6	0.18 mA	3	300 mV/g	1600	Analog ue	22.25 CHF
ADXL335	3	1.8 - 3.6	350 μ A	3	300 mV/g	1600	Analog ue	10.30 CHF
LIS3LV02DL	3	2.16 - 3.6	0.65 mA	2,6	1024LSB/g at 2g	2560	SPI, I2C	20.20 CHF
BMA180	3	1.62 - 3.6	975 μ A	1, 1.5, 2,3,4,8,16	4060LSB/g at 2g	2400	SPI, I2C	16.50 CHF

Tableau 4 : Liste d'accéléromètre

Les capteurs ci-dessus respectent tous les critères voulus, mais l'ADXL345 a été choisi, car il était disponible et il a déjà été utilisé lors de travail précédent avec le protocole SPI.

5.2.3. GPS Venus 638

Le module GPS qui devra être intégré doit pouvoir recevoir des données de 12 satellites simultanément et doit pouvoir donner une nouvelle position toutes les 5 secondes pour avoir un fichier de suivi de vol fluide. Le capteur doit aussi être peu gourmand en énergie et peu coûteux. Quelques exemples de composants sont comparés dans le tableau 5.

Modèle	Tension	Consommation	Connexion	Temps d'acquisition	Nbr Satellite	Antenne	Prix
EM-410	5V	60mA	Sériel	0.1s	16	externe	43.90 CHF
Venus 638	3.3V	68mA	SPI/sériel	20Hz	12	externe	39.00 CHF
LEA-6S	3.3V	100mA	UART/USB	5Hz	16	externe	38.10 CHF

Tableau 5 : Liste de module GPS

Les capteurs ci-dessus respectent toutes conditions mises en place par l'IGC, mais afin de simplifier le design de la Mezzanine il faut utiliser un capteur qui marche à 3.3V comme l'ADXL345. Le Venus 368 a été choisi, car a une consommation plus basse.

5.3. Capteur de pression BMP085

Le capteur de pression est un capteur ajouté au prototype afin de respecter le règlement IGC. Celui-ci demande que le capteur aie une précision 1/3 d'hectopascal ce qui équivaut environ 2,8 mètres.

Modèle	Tension	Consommation	Avail. Range	Sensibilité	Com	Prix
KP-256	3.3-5V	10mA	60k-165kPa	9.74 LSB/kPa	SPI	14.50 CHF
BMP085	1.8-3.6V	12 μ A	300 - 1100hPa	0.01hPa	I2C	8.5 CHF
LEA-6S	2.4-3.3V	25 μ A	30 kPa - 120 kPa	1.5 Pa	SPI	10.30 CHF

Tableau 6 : Liste de capteur de pression

Le capteur BMP085 a été choisi, car il répond aux exigences de l'IGC et possède la consommation la plus basse et le prix le plus bas du tableau 6.

5.3.1. Carte de développement

La carte de développement doit répondre à plusieurs critères, il doit pouvoir :

- communiquer avec tous les capteurs choisis.
- être assez puissant pour effectuer toutes les étapes nécessaires dans les délais donnés.
- Être fonctionnel et enregistrer des valeurs durant la période d'un vol soit au minimum 7 heures.

Deux cartes de développement qui sont utilisées par l'HES//SO ont été mis en concurrence pour ce projet : OLIMEX stm32F103stk et ARMBS3

La carte Olimex stm32f103stk est une carte développée par OLIMEX qui utilise un processeur ARM Cortex M3. Cette carte comporte les spécificités suivantes :

- clock allant jusqu'à 72 MHz
- 128 KBytes de mémoire Flash
- 20 KBytes de RAM
- une interface utilisateur avec écran LCD, boutons et joystick.
- une entrée et sortie audio
- un lecteur de carte SD
- un accéléromètre interne
- une sortie USB
- un support de pile AA.
- des connecteurs avec une multitude d'entrées/sortie (I2C, SPI, UART, ADC)

Une documentation plus détaillée de la carte OLIMEX STM32F103STK est disponible à l'adresse suivante : <http://www.olimex.com/dev/index.html>

La carte ARMEBS3 est une carte de développement développée par l'HES//SO qui utilise un ARM7. Elle se compose d'une carte principale qui peut se connecter à une multitude de mezzanines selon nos besoins. Elle peut regrouper les éléments suivants :

- clock à 180 MHz
- 16MBytes de mémoire Flash
- 128 MBytes de SDRAM
- 16 KBytes de SRAM
- une interface utilisateur avec écran LCD et boutons.
- des connecteurs avec une multitude d'entrées/sortie (I2C, SPI, UART, ADC)
- un pack d'alimentation

Test comparatif

Afin de départager les deux cartes, un test de comparaison a été effectué avec le tableau suivant.

	Indexe	Olimex	ARMEBS3
Alimentation	3	++	++
Tension interne	2	++	++
Mémoire	3	+	++
USB	1	++	++
SD	1	++	++
SPI	3	++	++
I2C	3	++	+
USART	3	++	++
ADC	3	++	++
Connecteur	3	++	++
Entrée audio	1	++	--
Accéléromètre	1	++	--
Mécanique	2	++	-
Interface utilisateur	2	++	+
Librairie	1	++	+
Outil de dev	2	+	++
Support	1	++	++
TOTAL		119	50

Symbole	--	-	0	+	++
Note	-2	-1	0	1	2

-- : inexistant sur la carte, implémentation Hardware et Software ou pas de ressource disponibles

++ : module intégré au hardware avec bonne documentation et librairie OU ressources disponibles

Tableau 7: Comparaison des deux cartes de développements

Ce test montre que la carte OLIMEX répond mieux aux besoins recherchés surtout avec l'intégration d'une entrée audio et d'un accéléromètre dans la carte.

Le deuxième point positif est le fait que la carte OLIMEX est plus compacte est qu'elle regroupe tous les modules décrits sur une seule carte tandis que l'ARMEBS possède plusieurs mezzanines, par exemple l'interface utilisateur. Les mezzanines de l'ARMEBS3 sont simplement reliées à la carte principale à l'aide du connecteur ce qui rend la carte fragile.

Le seul point important où l'ARMEBS3 est meilleure est au niveau de la mémoire. Afin d'assurer que la carte OLIMEX puisse être utilisée, une analyse des besoins de mémoire a été effectuée.

Analyse mémoire

Pour ce projet, une estimation de la taille du code est située autour de 80KBytes. Ceci ne pose pas de problème pour la carte Olimex qui possède une mémoire programme flash de 125KBytes.

Concernant la mémoire RAM, l'analyse doit être plus approfondie, car la carte est limitée à 20K Bytes. Une estimation de la place utilisée dans la RAM a été faite, voir figure 16.

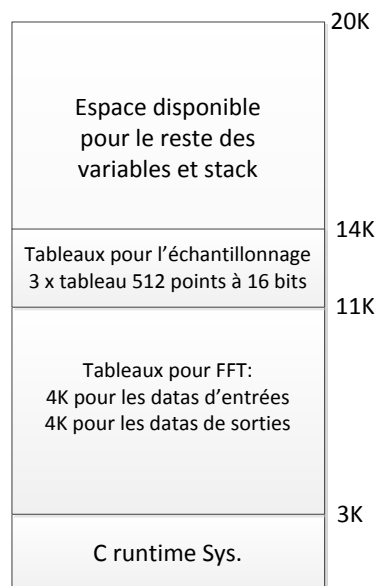


Figure 16 : Estimation de la mémoire RAM

La figure 16 montre que plus de 50% de la RAM sera dédiée à la FFT et à l'échantillonnage des données. L'espace disponible pour les autres variables et le stack est de 6KBytes. Elle reste cependant suffisante pour les fonctionnalités recherchées.

La carte OLIMEX possède donc assez de mémoire pour intégrer toutes les applications voulues pour le prototype.

Bilan

La carte de développement OLIMEX regroupe donc toutes les ressources nécessaires pour ce projet et elle possède plus de points positifs que l'ARMEBS3, elle sera donc utilisée comme carte de développement.

5.4. Protocole de communication

5.4.1. I2C

Le capteur de pression ainsi que l'accéléromètre LIS intégré à la carte Olimex utilise le protocole I2C. Ce protocole est utilisé des relations esclaves maîtres entre les composants. Dans notre cas le maître est le microcontrôleur et les esclaves sont les deux capteurs : accéléromètre et capteur de pression. Chaque capteur utilise chacun un module I2C (I2C1 pour l'accéléromètre LIS, I2C2 pour le capteur de pression) donc pas de souci de conflit entre les composants.

5.4.2. SPI

L'accéléromètre externe ADXL, le connecteur SD et l'écran LCD utilise les deux modules SPI proposés par le microcontrôleur. Une transmission SPI typique est une communication simultanée entre un maître et un esclave. Les deux capteurs (SD et ADXL) qui utilisent le même module devront être activés séparément pour ne pas engendrer de conflit lors des communications.

5.4.3. UART

Le seul composant utilisant l'UART est le GPS, de plus, la communication GPS-Microcontrôleur est unidirectionnelle, car il n'y a pas de configuration du GPS nécessaire.

5.5. Consommation

Avec les composants choisis précédemment et leur spécification, il est possible de définir la consommation théorique du prototype à l'aide du tableau 8.

Consommation	Olimex stm32f103stk[mA]	Bmp085 [mA]	Venus638 [mA]	GPS Antenna [mA]	Adxl345 [mA]	Total [mA]
Moyenne	100	0.896	50	15	0.145	166
Maximum	130	1.6	68	15	0.145	215

Tableau 8 : Tableau de consommation des composants du prototype

Cette analyse montre une consommation totale de 215 mA. Avec une batterie AA 1,5V de 2700mAh comme alimentation, cela permet d'utiliser le prototype pendant environ 12 heures. Cette période est suffisante, car les vols en planeur n'excèdent en général pas 8 heures et notre produit n'est qu'à l'état de prototype.

5.6. Prix

Il est aussi intéressant d'avoir une idée sur le prix total du prototype pour une future commercialisation, voir tableau 9.

Olimex stm32f103stk	Bmp085	Venus638	Adxl345	Antenne GPS	Microphone	Total
72 CHF	8.50 CHF	39 CHF	14.50 CHF	20.60 CHF	6.45 CHF	161.50CHF

Tableau 9 : Tableau du prix des composants du prototype

Le prix total des composants prototype est de 161.5 CHF. Il faut encore y ajouter le prix du PCB de la mezzanine pour avoir le prix total du prototype.

Pour une future commercialisation, une nouvelle analyse de prix sera nécessaire, car la carte principale ne sera plus basée sur une carte de développement ce qui peut baisser fortement le prix final du produit.

5.7. Design du Prototype

5.7.1. Carte de développement

La carte de développement Olimex STM32-103STK est conçue sur un PCB de taille compact 65x100mm.

Les connecteurs utilisés pour communiquer avec les composants externes sont tous situés au dos de la carte ce qui permet de facilement y ajouter une mezzanine sans déranger l'interface utilisateur qui est de l'autre côté. Du côté de l'interface utilisateur, il y a aussi le connecteur JTAG qui permet d'y connecter le débbugger ainsi que le support de la pile AA. Au dos de la carte est aussi disposé le port SD, le port USB ainsi que le connecteur audio.

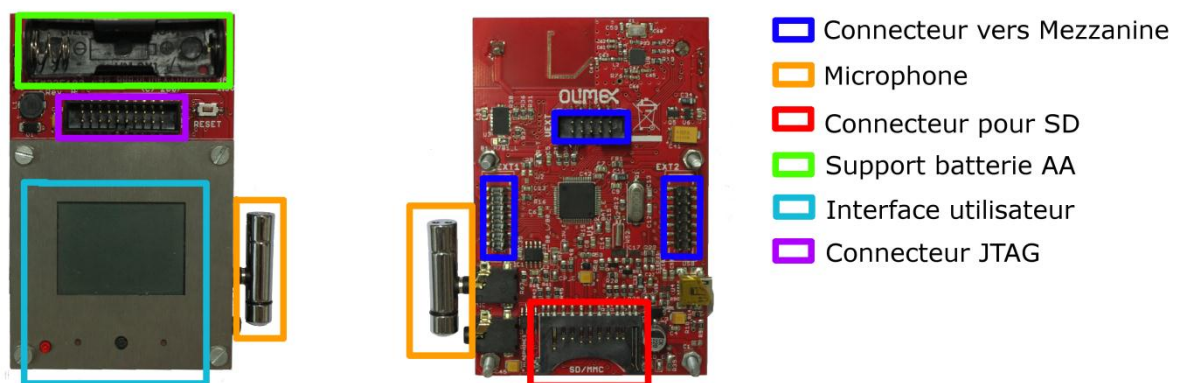


Figure 17 : Design de la carte OLIMEX

5.7.2. Mezzanine

La mezzanine qui intègre les capteurs doit posséder des connecteurs compatibles avec ceux de la carte de développement pour qu'elles puissent communiquer ensemble. Les composants ont tous été intégrés du même côté des connecteurs afin de les protéger lorsque les deux cartes sont connectées.

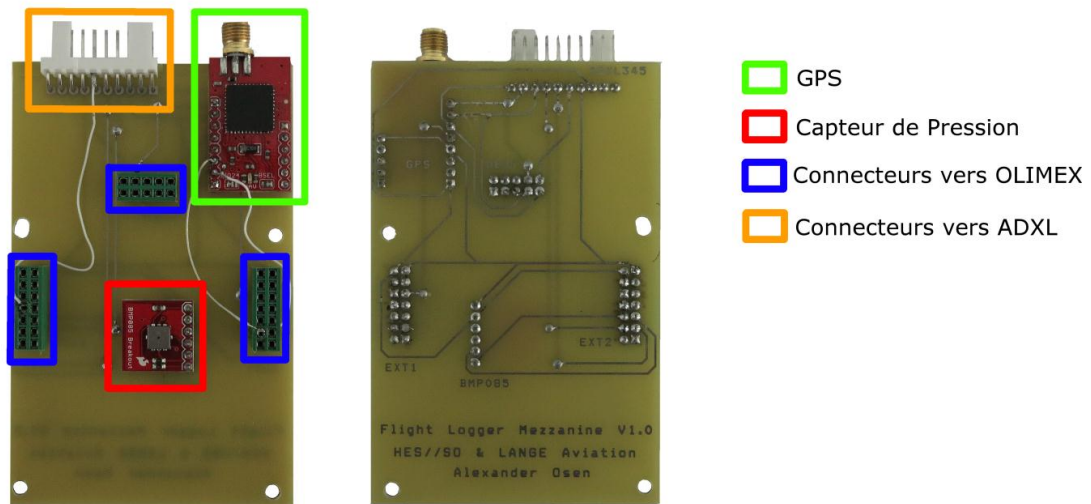


Figure 18: Design de la Mezzanine

L'accéléromètre ADXL qui est lui mobile est connecté à la mezzanine via un connecteur qui lui est dédié.



Pour que le prototype soit solide, le PCB de la mezzanine a été dimensionné aux mêmes dimensions que la carte OLIMEX. Elle peut aussi utiliser les visse de fixation de l'écran LCD pour que les deux cartes soient bien attachées.

6. Développement software

Cette partie retrace le développement software du prototype servant à valider le concept. D'abord l'environnement utilisé ensuite l'implémentation du code.

6.1. Environnement de développement

Pour développer le prototype, l'IDE CoIDE et le debugger OLIMEX ARM-USB-OCD ont été utilisés. Ce choix a été influencé par OLIMEX qui propose cette alternative simple et efficace.

ARM-USB-OCD utilise OPENOCD qui est un protocole permettant de communiquer entre le JTAG et le debugger. Une documentation plus détaillée du debugger OLIMEX est disponible à l'adresse suivante : <http://www.olimex.com/dev/index.html>

CoIDE est un outil de développement software développé par Coocox et qui est dédié au microcontrôleur ARM Cortex. CoIDE intègre CoDebugger qui est le debugger de Coocox. Ce debugger est compatible aussi OPENOCD. Cet IDE possède aussi une multitude de libraires qui permet d'implémenter rapidement des fonctionnalités sur notre carte de développement.

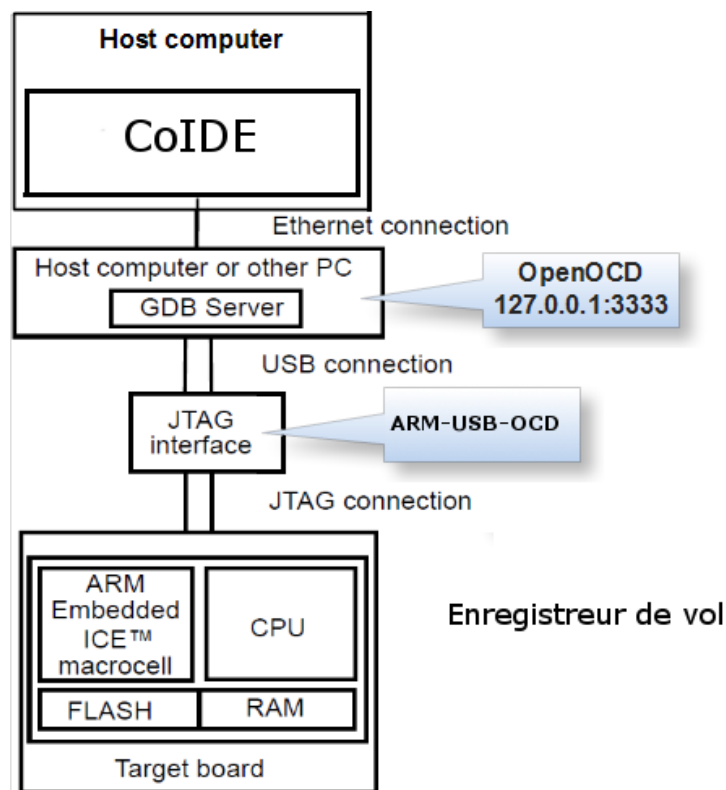


Figure 19 : structure de l'environnement de développement

6.2. Implémentation

L'implémentation du programme a été faite pour répondre aux besoins du prototype. Pour cela, il a fallu effectuer des tâches indispensables :

- Lecture des données des capteurs
- Effectuer une FFT
- Pouvoir faire un échantillonnage avec une fréquence précise
- Développer des algorithmes détection
- Effectuer un mode de sauvegarde de fichier
- Avoir une interface utilisateur.

Ces tâches ont toutes été implémentées et le code est visible en annexe 4.

6.2.1. Boucle principale

La boucle d'entrée du code commence l'initialisation du processeur, de tous les capteurs et de l'interface utilisateur.

Dès que la partie initialisation est terminée, le processeur rentre dans la boucle principale qui regroupe une multitude de routines. Les routines sont toutes séparées et démarrent selon les besoins du programme. Le structogramme de la boucle principale est visible en annexe 3.1

6.2.2. Timer

En parallèle, la routine du timer est appelée toutes les millisecondes. Le timer a été configuré à la milliseconde, car la fréquence d'échantillonnage descend jusqu'à 500Hz.

C'est cette routine qui gère le séquençement du programme et c'est elle qui permet d'activer les routines situées dans la boucle principale. Cette méthode est valide pour les routines suivantes : FFT, ADXL, LIS, LCD, SD, Test.

Il y a une exception lorsqu'un capteur est utilisé par l'algorithme de détection du système de propulsion, car la fréquence d'échantillonnage doit être très précise. Ceci est dû à la FFT (équation XXX) qui doit avoir un échantillonnage précis pour passer du domaine temps au domaine fréquentiel. De ce fait, l'acquisition des données du capteur en question se fera directement dans la routine du timer. Le structogramme de cette routine est présenté dans l'annexe 3.2.

6.2.3. ADXL

La routine de l'accéléromètre est appelée dans la boucle principale ou dans la routine d'interruption du timer si les données du capteur sont utilisées pour déterminer l'activité du moteur.

Lors de son appel, la routine envoie la première commande SPI vers l'accéléromètre pour demander les nouvelles valeurs du capteur. Dès que le premier paquet émis par l'ADXL est reçu dans la routine

d'interruption du module SPI, la routine d'interruption prend le relais et envoie les prochaines commandes pour réceptionner les derniers paquets.

6.2.4. LIS

Le capteur LIS est intégré dans la carte de développement a été livré avec une librairie. Cette librairie permet de configurer la configuration de la communication et propose des fonctions permettant d'obtenir les valeurs de l'accéléromètre. Ces fonctions ont été intégrées dans la routine LIS qui est aussi appelée dans la boucle principale.

6.2.5. SD

La carte SD est la solution choisit pour sauvegarder les fichiers de data de mesures. Cette solution a été choisie, car des librairies disponibles sur internet (FatFS) permettant d'implémenter rapidement la routine de sauvegarder des données. Deux modes de sauvegarde ont été implémentés : IGC et RAW.

Le mode IGC est le mode le plus utilisé, car il fournit le fichier .igc qui permet de vérifier le trajet du planeur avec les informations sur le moteur.

Le mode RAW fournit les valeurs obtenues après chaque FFT. Cela a permis de vérifier l'efficacité de la FFT, mais aussi de mieux implémenter les algorithmes de détection.

L'activation de l'enregistrement se fait manuellement dans l'un des menus du programme.

6.2.6. GPS

Pour recevoir des données GPS, il faut attendre que le timer active la routine d'interruption du module UART. Lors de la réception d'une trame du GPS via l'UART la routine d'interruption de l'UART est directement appelée. Dans cette routine on attend de recevoir le caractère '\$' qui nous informe que la trame GPS a commencé. Ensuite, les 75 prochains caractères qui composent la trame sont enregistrés à leur tour.

6.2.7. Test

La Fonction test a été implémentée afin de tester les algorithmes de détection mis en place. Cette routine permet simplement de générer un signal basé sur des sinus qui est ensuite traité avec la FFT.

6.2.8. FFT

Le micro-processeur Cortex M3 fabriqué par ST électronique possède une librairie avec des algorithmes de FFT (48,512 ou 1024 points). Afin d'obtenir une estimation la plus précise possible de la vitesse de rotation, la FFT à 1024 points a été choisie. La précision des résultats respecte l'équation suivante :

$$\Delta Hz = \frac{\text{Fréquence d'échantillonnage}}{\text{Nbr de point de la FFT}}$$

Équation 2 : Précision de la FFT

Une fréquence d'échantillonnage de 500Hz a été choisit ce qui permet d'obtenir un ΔHz de 0.5 Hz soit une précision de +/-15 RPM pour la vitesse de rotation du moteur. Un système d'enregistrement à 3 tableaux de 512 points a été choisi ce qui permet d'effectuer une FFT environ chaque seconde (1,024 sec).

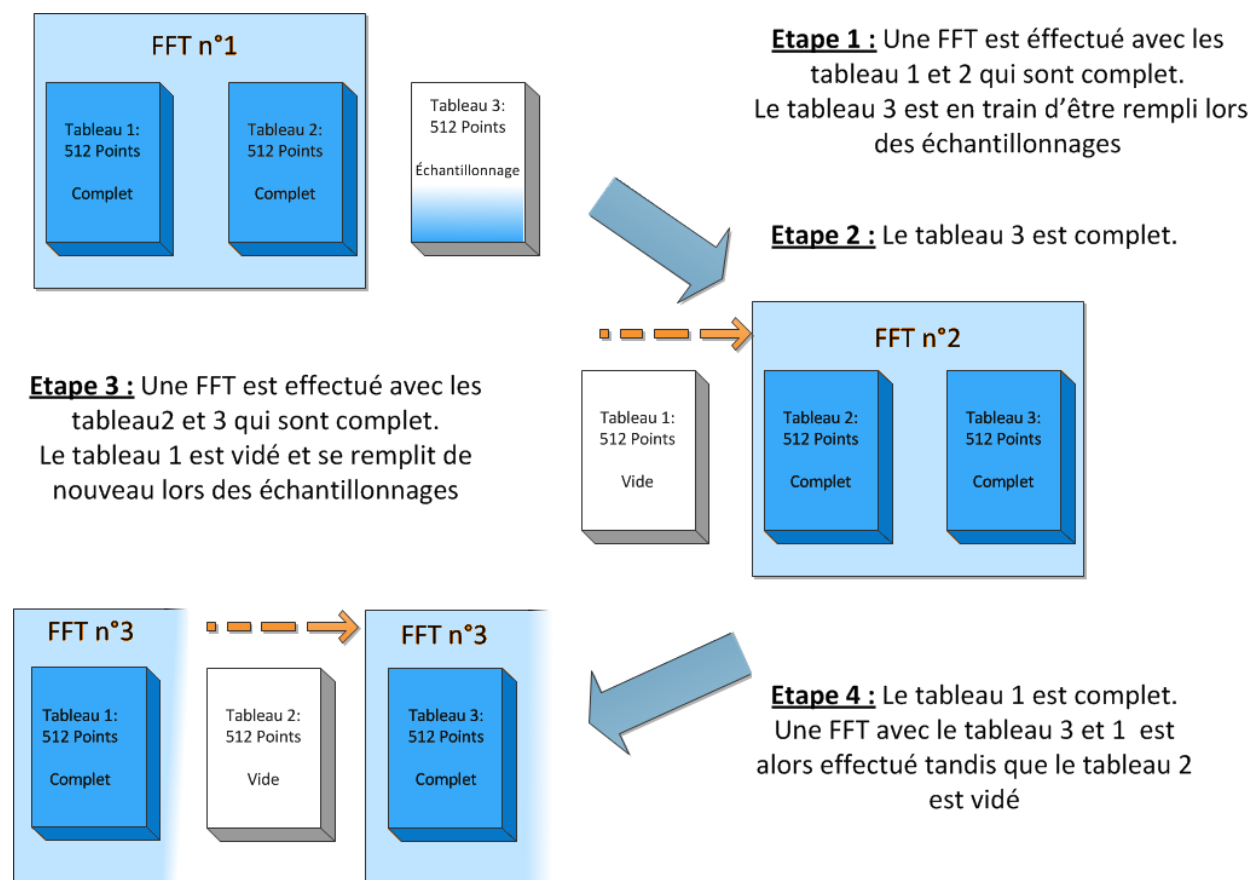


Figure 20 : FFT avec 3 tableaux de données

Cette technique consiste à posséder 3 tableaux de 512 points et de faire un cycle de remplissage : lorsque qu'un tableau est plein, une FFT est effectuée avec les deux autres tableaux qui sont remplis pendant que le dernier tableau prend les valeurs d'échantillonnage. Cela permet d'abaisser la fréquence d'échantillonnage et d'avoir une continuité entre les FFT.

Ayant une FFT chaque seconde cela permet aux algorithmes d'utiliser jusqu'à 4 FFT, car le prototype écrit seulement une ligne d'état (position, état du moteur) toutes les 5 secondes dans le fichier .igc.

6.2.9. Algorithmes de détection

Les divers algorithmes implémentés sont spécifiques au capteur utilisé et utilisent plusieurs techniques de détection. Les algorithmes proposés dans le prototype sont les suivants :

1) Algorithme de détection avec signal audio et superposition d'harmoniques.

Cet algorithme consiste à superposer les 3 champs où peuvent être situées les harmoniques principales.

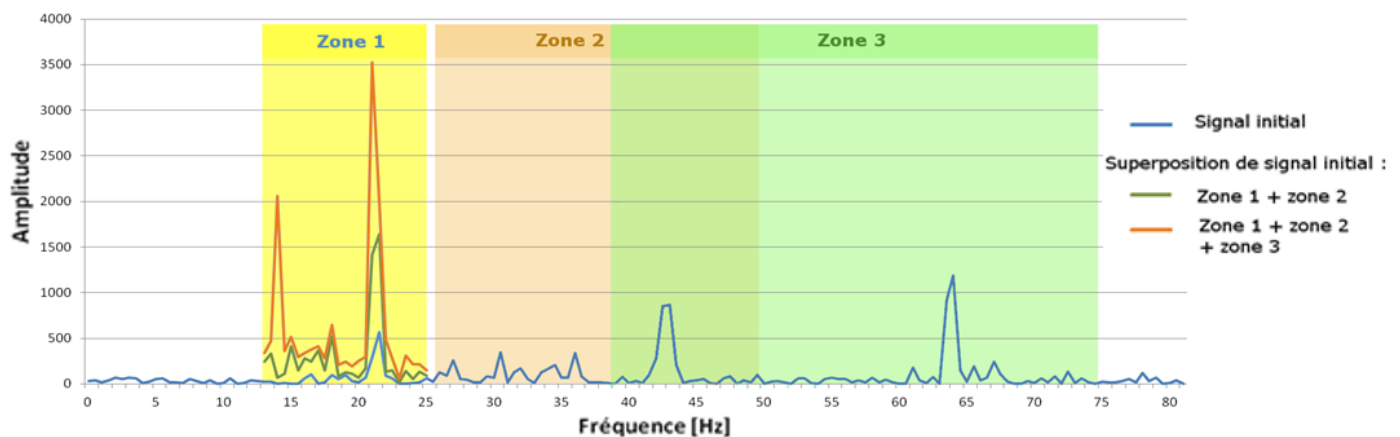


Figure 21 : Détection avec superposition d'harmoniques

Le graphique 21 montre 3 zones :

- Zone 1 : espace entre 13Hz et 25 Hz où peut être située l'harmonique fondamentale.
- Zone 2 : espace entre 26 et 50 Hz où peut être située la seconde harmonique.
- Zone 3 : espace entre 51 et 75 Hz où peut être située la troisième harmonique.

Dans un premier temps, il faut superposer les 3 zones et ne pas oublier de compresser les zones 2 et 3 pour qu'elles puissent chevaucher la zone 1. Ceci permet d'obtenir une courbe qui donne un grand contraste entre l'amplitude de l'harmonique principale et le reste des valeurs. Néanmoins, il faut faire attention que les 3 zones ne se superposent pas de trop, car cela pourrait fausser la courbe obtenue.

2) Algorithme de détection avec signal audio et analyse séquentielle des harmoniques.

Ce deuxième algorithme consiste à déterminer la fréquence de l'harmonique fondamentale et d'ensuite définir des zones plus étroites où peuvent être situées la 2ème et la 3ème harmonique. Si ces zones possèdent des harmoniques qui ont une certaine amplitude alors le moteur tourne à la fréquence de l'harmonique fondamentale.

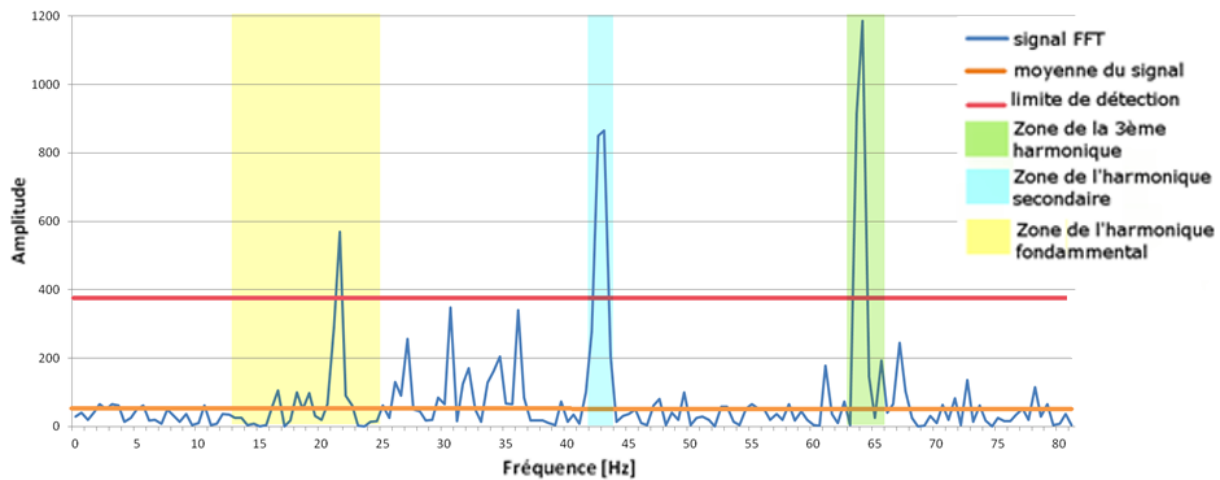


Figure 22 : Détection avec analyse séquentielle des harmoniques

Le graphique ci-dessus, montre la zone où peuvent être définies l'harmonique principale (jaune), les zones bleu et verte où doit théoriquement être la 2ème et la 3ème harmonique et la ligne rouge la limite que doivent dépasser les harmoniques pour considérer que le moteur tourne. Cette limite dépend de la valeur moyenne du signal initial (ligne orange).

3) Algorithme de détection pour accéléromètre.

Les mesures effectuées avec le prototype ont montré que l'harmonique fondamentale qui représente la fréquence du moteur est très lisible, mais que les harmoniques secondaires sont presque inexistantes. Ces constatations permettent d'implémenter un algorithme simple qui consiste à scanner la zone où peut être défini l'harmonique fondamentale et vérifier si son amplitude dépasse un certain seuil afin de dire si le moteur tourne ou pas.

6.2.10. Interface utilisateur

L'interface utilisateur a été implémentée pour faciliter l'utilisation du prototype. Il prend en considération la routine LCD ainsi que la routine des boutons.

La routine du LCD possède aussi une librairie qui s'occupe de la configuration de la communication, l'initialisation du LCD et qui propose des méthodes permettant d'écrire sur l'écran. Cette routine est utilisée toutes les 200ms pour garder une fluidité d'utilisation.

La routine boutons gère le joystick. Elle utilise aussi une librairie mise à disposition par OLIMEX. Le joystick utilise un ADC pour définir sa position et un port I/O pour son bouton presseur.

La partie affichage est basée sur 6 menus ayant chacun sa spécificité qui sont :

- le **menu général (1)** qui affiche les coordonnées géographiques, le RPM du moteur et l'heure UTC
- le **menu GPS (2)** qui affiche les données spécifiques au GPS qui sont les coordonnées géographiques, l'altitude et l'heure.
- le **menu ADXL (3)** qui affiche les valeurs des 3 axes X, Y et Z de l'accéléromètre ADXL345.
- le **menu LIS (4)** qui affiche les valeurs des 3 axes X, Y et Z de l'accéléromètre LIS intégré dans la carte
- le **menu Recording (5)** affiche les paramètres spécifiques à l'enregistrement des données. Il y a le type de capteur sélectionné pour la FFT, le type de fichier à écrire, l'état de l'enregistrement et l'état de la fonction test. Ces paramètres peuvent être changés à l'aide du curseur.
- le **menu Test (6)** affiche le RPM généré et le RPM calculé à l'aide de l'algorithme.

Le joystick permet de changer de menu ainsi que de changer les valeurs du menu Recording selon les actions suivantes :

- Joystick à gauche, permet de passer au menu suivant.
- Joystick à droite, permet de retourner au menu précédent
- Joystick en haut, permet de monter le curseur du menu 5
- Joystick en bas, permet de descendre le curseur du menu 5
- Bouton presseur du joystick, permet de changer les paramètres sélectionnés par le curseur.

7. Test et Validation

7.1. Consommation énergétique

La consommation énergétique du prototype a été mesurée à l'aide d'un multimètre. Pour chaque mesure, une moyenne sur une mesure du courant d'environ 5 secondes est effectuée. Ceci donne pour le prototype au complet une consommation allant jusqu'à 660 mA.

Afin de déterminer d'où provenait cette perte, des mesures sans certains composants ont été effectuées.

Composition	Complet	Sans Mezzanine	Sans ADXL	Sans Antenne GPS	Sans module GPS	Sans Microphone
Consommation	600 mA	120 mA	600mA	560mA	200mA	600

Tableau 10 : Consommation d'énergie du prototype

Ce tableau montre que la consommation du module GPS avec son antenne est de 400mA. Entre les valeurs du datasheet et les mesures, une différence de 300mA est visible. Aucune raison n'explique cette différence, mais si une commercialisation est envisagée il faudra trouver une solution à ce problème.

Avec cette consommation notre autonomie passe de 12 à 4 heures 30.

7.2. Consommation mémoire

La consommation mémoire du programme est visible dans le fichier .map, annexe 5.14.

Pour la mémoire Flash, l'espace entre l'adresse 0x08000000 et 0x08013c98 est utilisé. Ceci équivaut une taille de 81 kBytes. L'estimation sûre à la taille du programme a donc été bonne.

Pour la mémoire RAM, il y avait 20 kBytes de libre qui sont situées aux adresses 0x20000000 jusqu'à 0x20005000. Le fichier .map montre que 90% de la RAM a été utilisé, car elle est montée jusqu'à l'adresse 0x20004898 ce qui équivaut 18 kBytes.

7.3. FFT et capteurs audio et Accéléromètre

Les tests de la FFT ont été effectués en analysant les valeurs obtenues avec des prises de mesures effectuées sur le banc d'essai avec l'accéléromètre externe ADXL ainsi qu'avec le microphone.

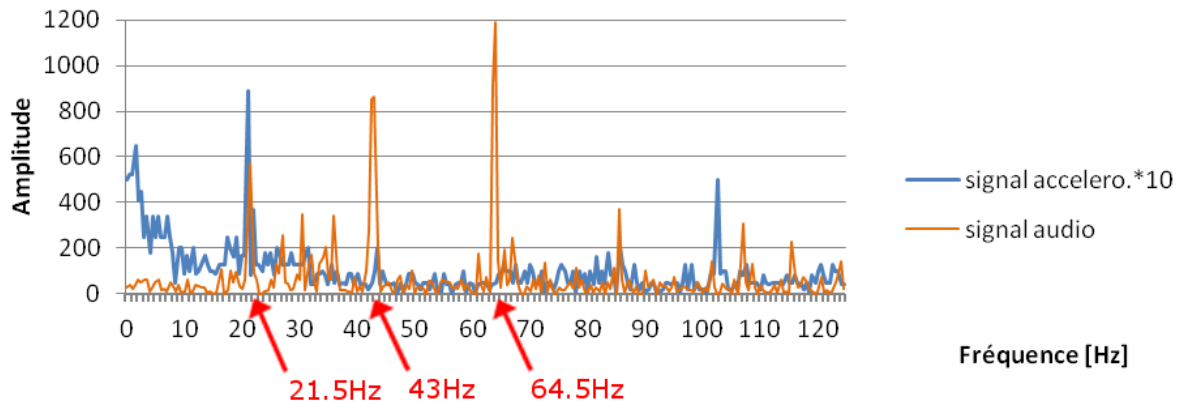


Figure 23 : Courbes après FFT avec les harmoniques principales

Le graphique démontre que la FFT permet d'obtenir les harmoniques principales du ventilateur. Il confirme aussi que les valeurs obtenues à partir du microphone permettent de donner les harmoniques l'accéléromètre permettent de donner la fréquence de rotation du moteur, mais que les harmoniques secondaires sont très faibles voir inexistantes.

7.4. Algorithme de détection du moteur avec générateur de signal

Dans un premier temps pour vérifier les algorithmes de détection, un générateur de signal a été implémenté. Ce générateur fournit un signal qui est créé à l'aide de 3 courbes sinusoïdales qui représentent les 3 premières harmoniques de la fréquence recherchée. Une transformation au domaine fréquentielle du signal est effectuée à l'aide d'une FFT et le résultat est ensuite envoyé vers l'algorithme de détection. Ce test est implémenté sur le prototype et peut être activé à tout moment. Lors de son activation, un 6eme menu est généré et il est possible de visualiser ces tests.

7.5. Fichiers IGC & GPS

Pour vérifier la validité des fichiers créés par le prototype, un programme dédié qui se nomme SeeYou a été utilisé. Ce programme permet de visualiser les trajets effectués avec un enregistreur de vol. Pour ce test, un fichier test a été créé en effectuant un enregistrement de quelques minutes lors d'un trajet en train. Ce fichier a ensuite été ouvert avec SeeYou afin de vérifier si le fichier pouvait être lu avec ce type de programme et pour la vérification de l'intégrité des données GPS.



Figure 24 : fichier IGC visualisé avec SeeYou

Le fichier a été lu et le trajet dessiné avec SeeYou correspondait avec le trajet effectué lors de l'enregistrement. Le code générant le fichier .igc et le système de géolocalisation est donc fonctionnel.

7.6. Test en vol du détecteur de propulsion

Le test en vol permet de tester la totalité du système. Ce test de validation a été effectué dans des conditions réelles avec un Antares 20E et un Arcus E (planeur biplace avec motorisation Antares).

Le prototype a donc été installé sur le tableau de bord afin de pouvoir comparer les valeurs du RPM réel et celle du prototype.



Figure 25 : Installation du prototype dans l'Antares

Il est ensuite possible de comparer les deux valeurs du RPM qui sont les deux affichées, le réel sur l'ordinateur central du planeur et la deuxième sur le prototype.

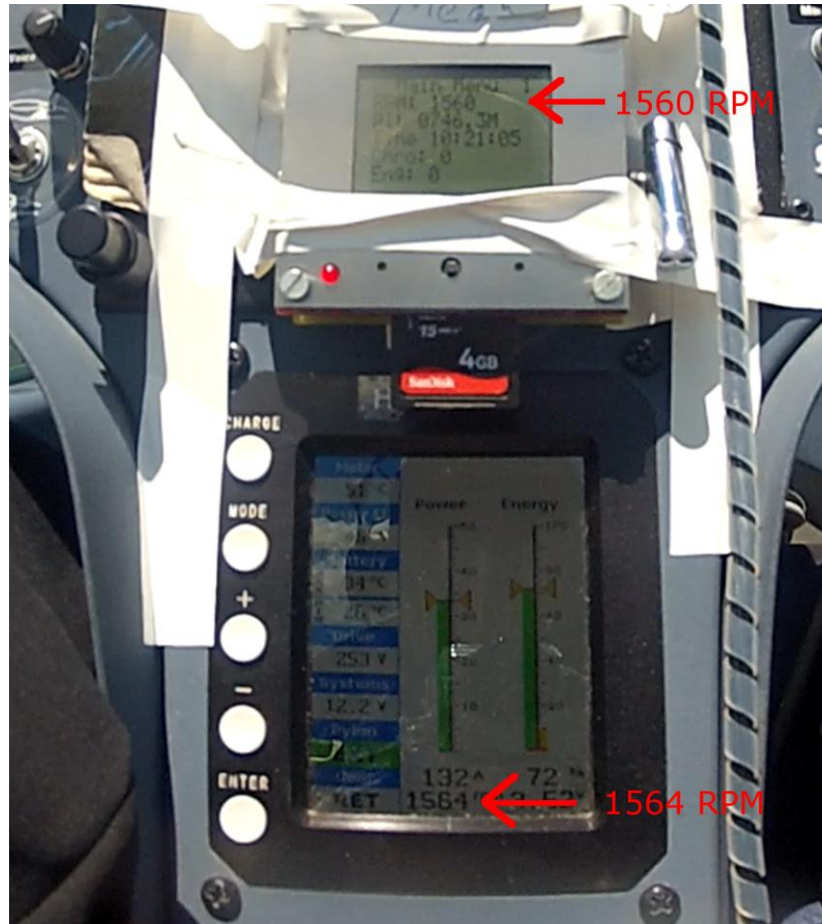


Figure 26 : Test en vol de l'enregistreur de vol

Le test effectué dans la figure 26 utilise l'algorithme de superposition des harmoniques. Les deux algorithmes utilisant le microphone ont été testés et donnent des résultats très similaires. Les tests utilisant l'accéléromètre n'ont pas pu être effectués car seulement 2 vols d'essais avec un Antares ont pu être effectués.

Le RPM calculé permet de donner la vitesse de rotation du moteur réel à ± 30 RPM près. Cette précision est suffisante sachant que le but principal du prototype est de détecter l'activité du moteur.

8. Bilan et améliorations

Le prototype développé dans le cadre du travail de diplôme répond au cahier des charges. Le prototype permet d'effectuer les fonctionnalités suivantes :

- Lecture des données du capteur GPS, de l'accéléromètre ADXL, de l'accéléromètre LIS
- Écriture de fichier sur la carte SD
- Traitement de signal avec une FFT
- Détection d'un moteur électrique avec hélice ainsi que son RPM.
- Création d'un fichier .igc

Afin d'améliorer les fonctionnalités du prototype, les points suivants pourraient être traités:

- Implémenter la routine du capteur de pression atmosphérique
- Amélioration de l'algorithme de détection pour être plus précis.
- Améliorer la configuration du module GPS ou le changer pour baisser la consommation de la carte

9. Conclusion

Durant ce projet, un prototype d'enregistreur pour moto-planeur électrique a été développé et testé avec succès lors d'essais en vol. Pour vérifier l'activité du système de propulsion qui est un moteur électrique avec une hélice, il a fallu faire des analyses de ce système. Cette analyse a défini une méthode de détection basée l'analyse audio ou vibratoire générée par l'hélice et qui permet de déterminer la vitesse de rotation du moteur.

Bien que le système ne soit pas encore optimal, la simplicité et l'efficacité du démonstrateur ouvrent des perspectives intéressantes dans le domaine de détection des systèmes de propulsion. La simplicité ainsi que le faible coût du système permettent d'envisager un développement ultérieur du projet ainsi qu'un fort intérêt de l'IGC.

10. Remerciements

Je remercie l'HEVs, et plus précisément Mr Christophe Bianchi qui m'a permis d'effectuer ce projet et qui m'a accompagné lors de son développement.

Merci à Sebastien Demont qui a été l'expert pour ce projet, et qui a pu me de donner des conseils très utiles.

Merci à Lange Aviation, et particulièrement Axel Lange, qui a mis à disposition ces planeurs pour effectuer des tests à Zweibrücken, Allemagne.

Merci à Karl Osen, qui a mis a disposition son Antares 20E et effectué des vols d'essai depuis l'Aéroport de Sion.

Merci à Gibert Maitre pour ses conseils et astuces concernant le traitement FFT.

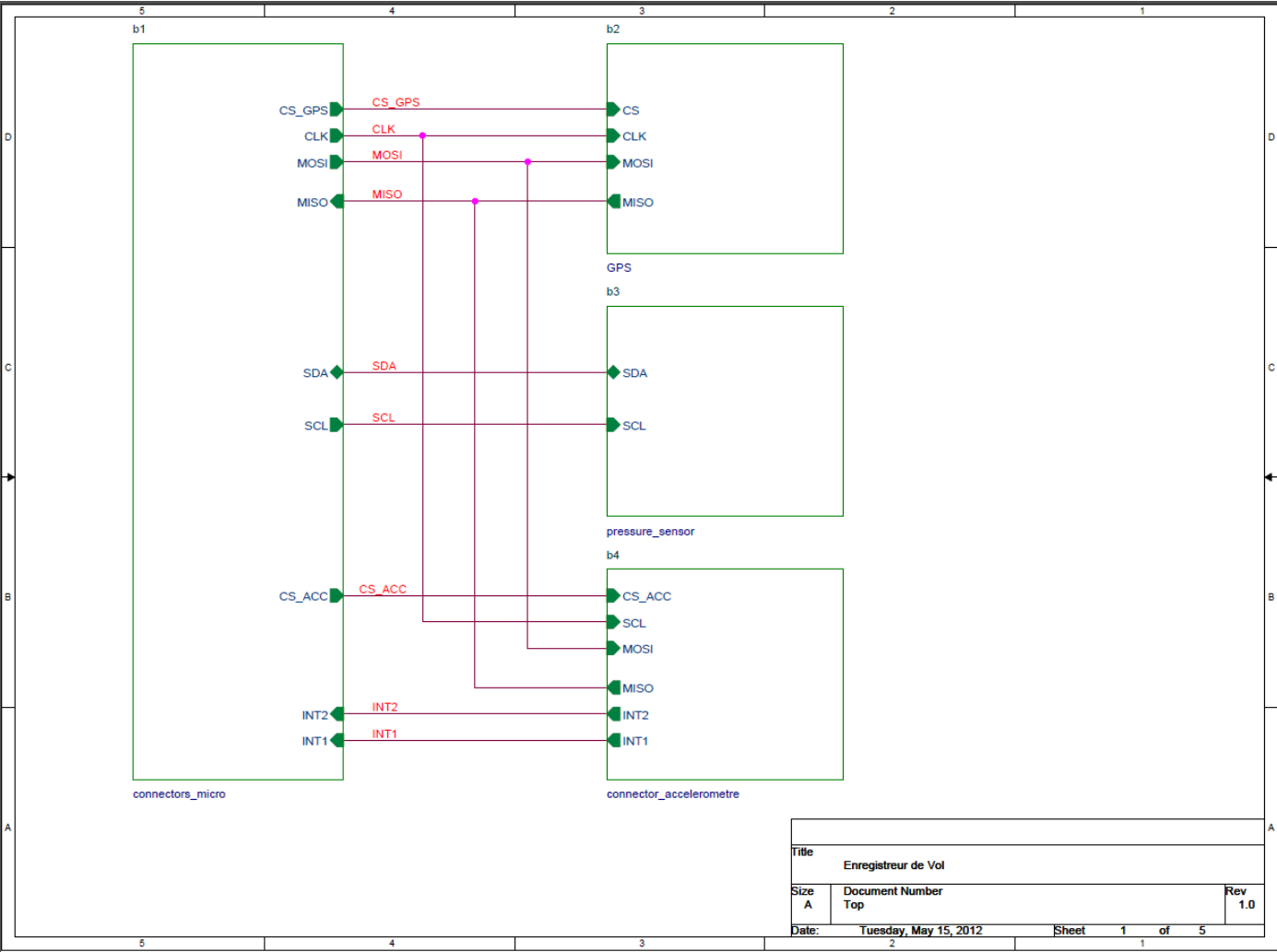
11. Références

- [1] **STM-103STK development board, Users Manual, April 2008**
<https://www.olimex.com/dev/pdf/ARM/ST/STM32-103STK.pdf>
- [2] **CooCox software with Olimex JTAGs, Users Manual, April 2012**
<https://www.olimex.com/dev/soft/arm/JTAG/How%20to%20run%20CooCox%20with%20Olimex%20JTAGs.pdf>
- [3] **STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced ARM-based 32-bit MCUs, data sheet, October 2011**
http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/REFERENCE_MANUAL/CD00171190.pdf
- [4] **STM32F10x DSP library, data sheet, June 2010**
http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/USER_MANUAL/CD00208762.pdf
- [5] **BMP085, Data sheet, August 2011**
<http://www.bosch-sensortec.com/content/language1/downloads/BST-BMP085-DS000-06.pdf>
- [6] **ADXL345, Data sheet, May 2011**
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf
- [7] **Venus638 Family GPS Module, Data Sheet, February 2010**
http://www.giga-concept.fr/media/uploads/products/documents/2010/11/Venus638DS_v02.pdf
- [8] **TECHNICAL SPECIFICATION FOR GNSS FLIGHT RECORDERS, Document, May 2011**
http://www.fai.org/component/phocadownload/category/855-technical_specifications?download=3165:technical-specification-for-igc-approved-gnss-flight-recorders

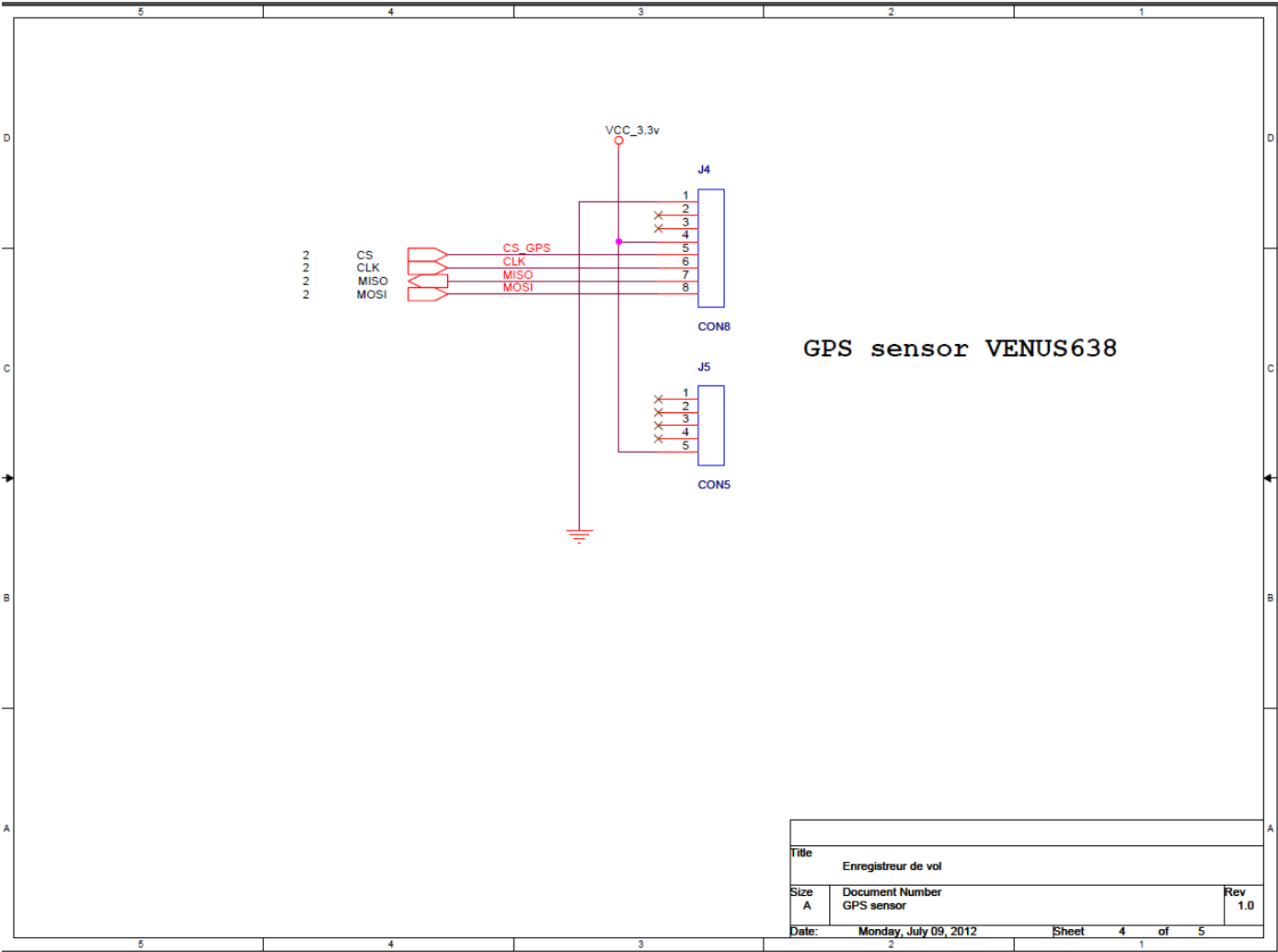
12. Annexes

12.1. ANNEXE 1 - Schématique PCB

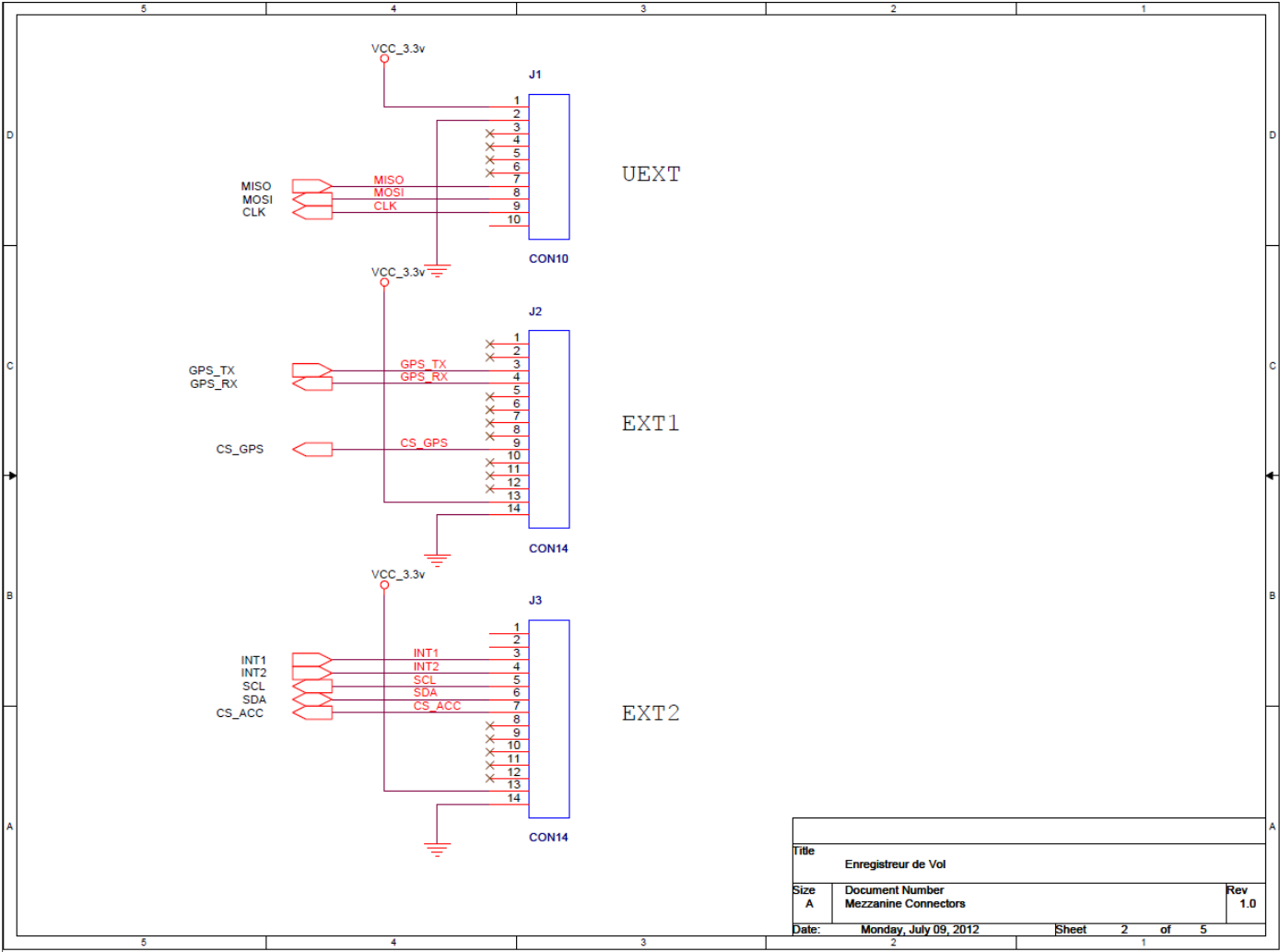
12.1.1. ANNEXE 1.1 - Schématique global de la mezzanine



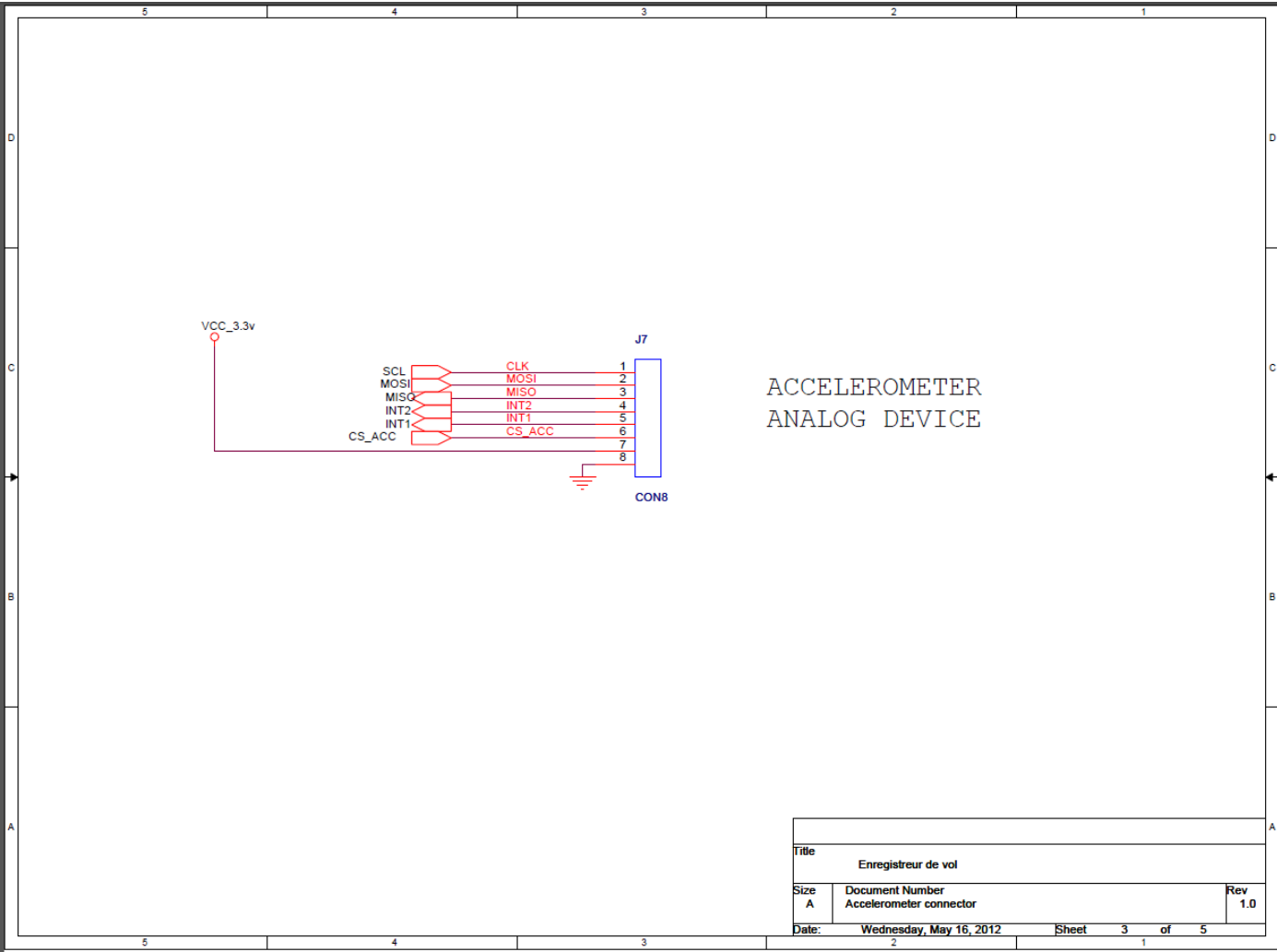
12.1.2. ANNEXE 1.2 - Schématique du bloque GPS



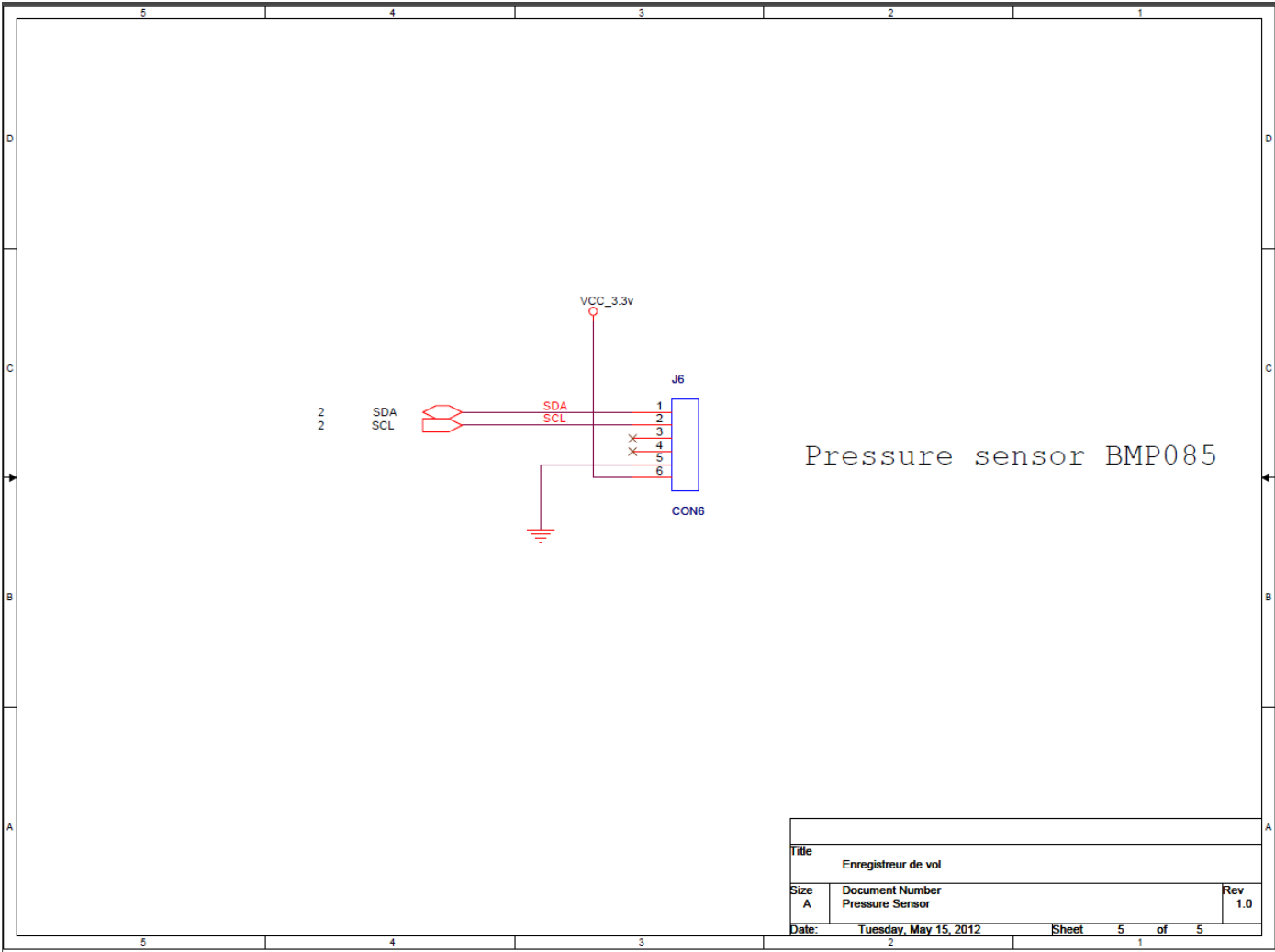
12.1.3. ANNEXE 1.3 - Schématique du bloque connecteurs



12.1.4. ANNEXE 1.4 :Schématique du bloque accélérometre



12.1.5. ANNEXE 1.5 - Schématique du bloque capteur de pression



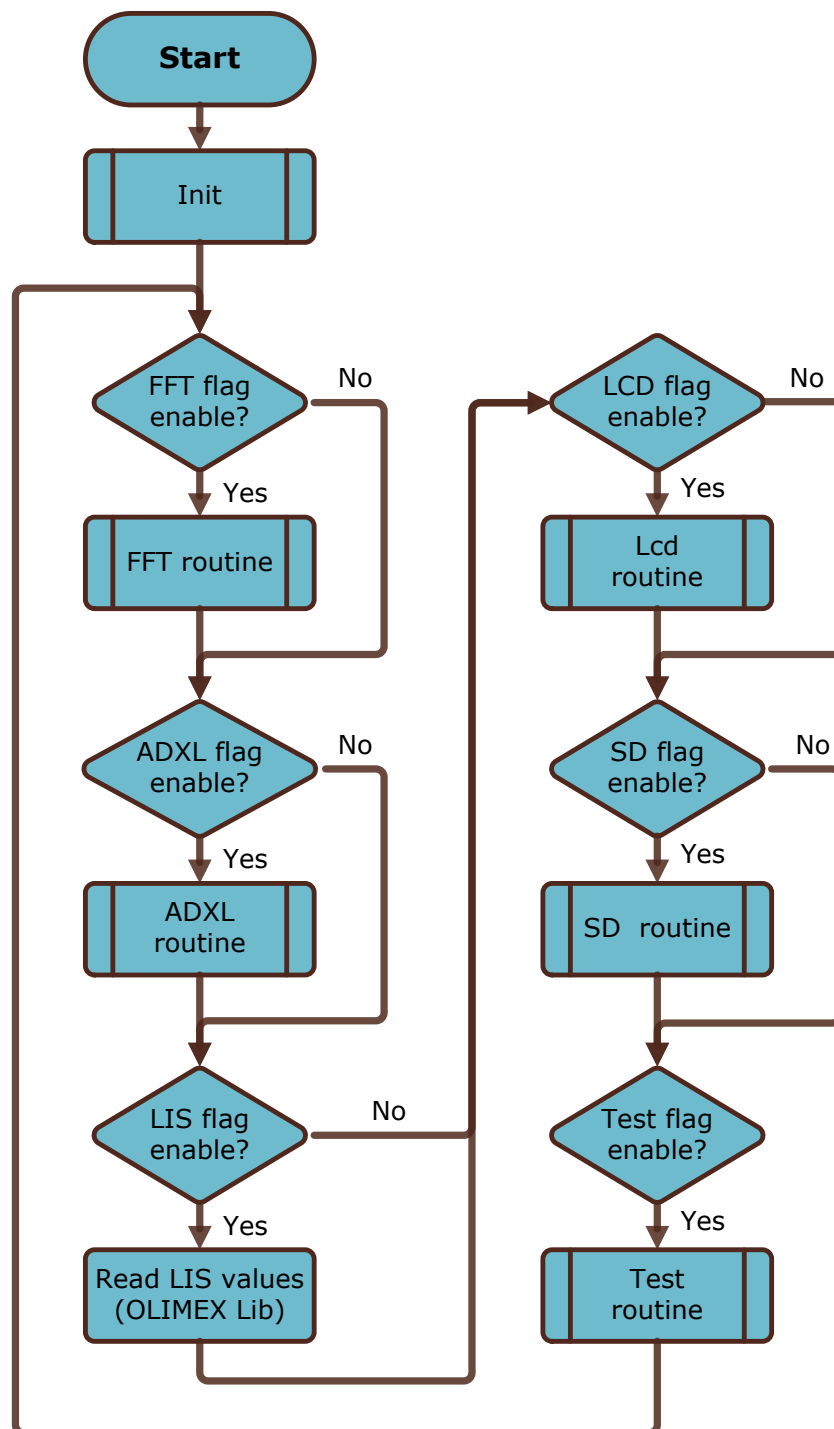
12.2. ANNEXE 2 - Procédure test

Procédure pour la prise de mesure sur Antares

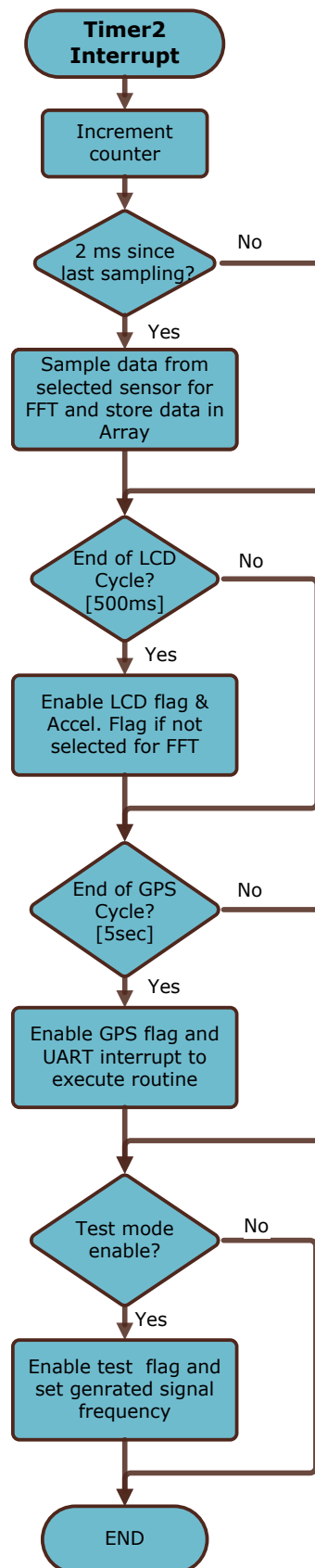
Test n°	Area	Cockpit Noise	IAS	Engine %	Gear	Accel loc	Micro loc
1	Gnd	-	-	0	OUT	wing spar	Nxt Inst panel
2	Gnd	-	-	50Amps	OUT	wing spar	Nxt Inst panel
3	Gnd	-	-	80Amps	OUT	wing spar	Nxt Inst panel
4	Gnd	-	-	100Amps	OUT	wing spar	Nxt Inst panel
5	Air	Low	90	0	IN	-	Behind pilot
6	Air	Medium	90	0	IN	-	Behind pilot
7	Air	High	90	0	IN	-	Behind pilot
8	Air	Low	90	50	IN	-	Behind pilot
9	Air	Medium	90	50	IN	-	Behind pilot
10	Air	High	90	50	IN	-	Behind pilot
11	Air	Low	90	100	IN	-	Behind pilot
12	Air	Medium	90	100	IN	-	Behind pilot
13	Air	High	90	100	IN	-	Behind pilot
14	Air	Low	150	50	IN	-	Behind pilot
15	Air	Medium	150	50	IN	-	Behind pilot
16	Air	High	150	50	IN	-	Behind pilot
17	Air	Low	150	100	IN	-	Behind pilot
18	Air	Medium	150	100	IN	-	Behind pilot
19	Air	High	150	100	IN	-	Behind pilot
20	Air	High	Max	0	IN	-	Behind pilot
21	Air	TAKE OFF	TAKE OFF	TAKE OFF	TAKE OFF	-	Behind pilot
22	Air	LANDING	LANDING	LANDING	LANDING	-	Behind pilot

12.3. ANNEXE 3 - Structogrammes

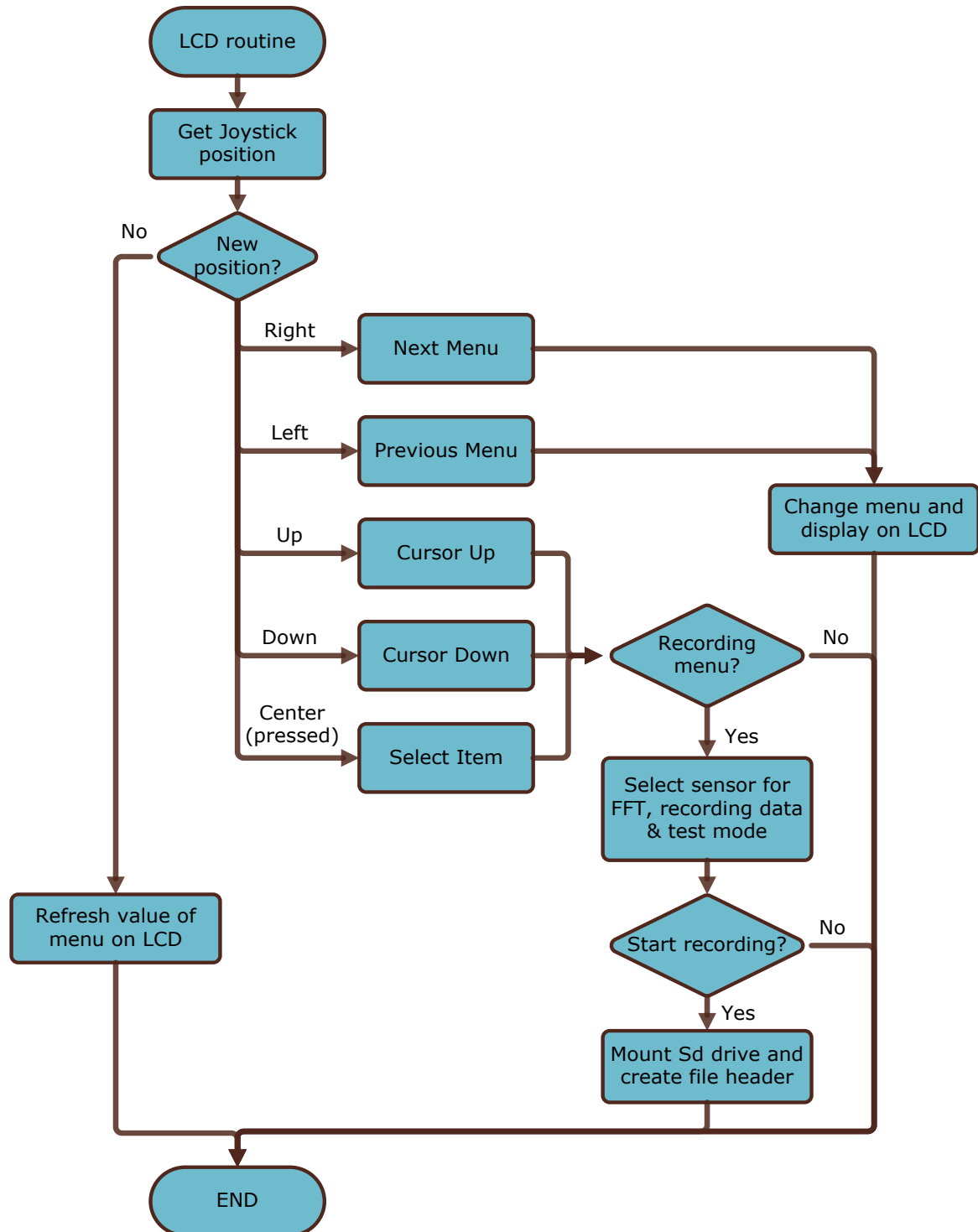
12.3.1. ANNEXE 3.1 - Structogramme de la boucle principale



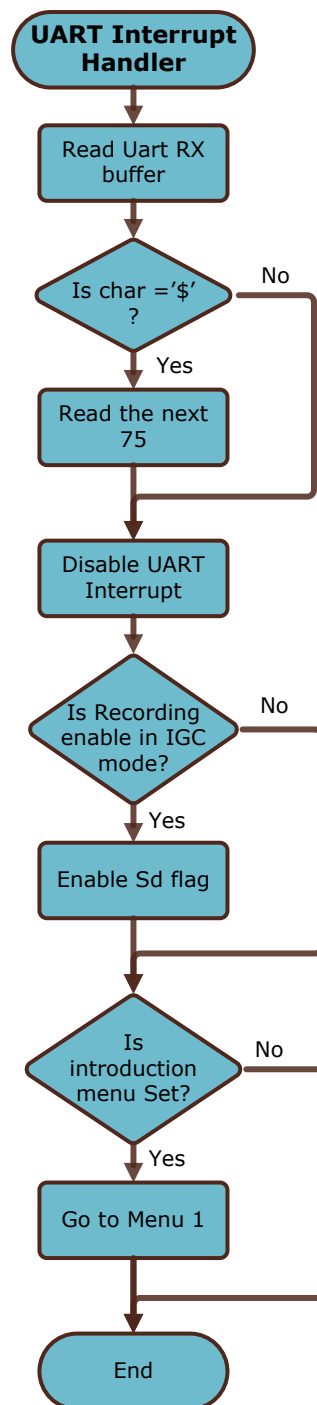
12.3.2. ANNEXE 3.2 - Structogramme du Timer



12.3.3. ANNEXE 3.3 -Structogramme de l'Interface Utilisateur



12.3.4. ANNEXE 3.4 - Structogramme du GPS



12.4. ANNEXE 4 - Code

- 12.4.1. ANNEXE 4.1 - global.h
- 12.4.2. ANNEXE 4.2 - types.h
- 12.4.3. ANNEXE 4.3 - main.c
- 12.4.4. ANNEXE 4.4 - tick.c
- 12.4.5. ANNEXE 4.5 - adc.c
- 12.4.6. ANNEXE 4.6 - adxl.c
- 12.4.7. ANNEXE 4.7 - audio.c
- 12.4.8. ANNEXE 4.8 - buttons.c
- 12.4.9. ANNEXE 4.9 - gps.c
- 12.4.10. ANNEXE 4.10 - gui.c
- 12.4.11. ANNEXE 4.11 - lcd.c
- 12.4.12. ANNEXE 4.12 - lisAcc.c
- 12.4.13. ANNEXE 4.12 - sd.c

12.5. ANNEXE 5 - CD

- Schématique PCB
- Enregistrement audio des tests
- Vidéo du vol d'essai
- Code