Université de Bretagne Occidentale

Ifremer

MASTER SCIENCES, TECHNOLOGIES, SANTE

Mention Electronique, Télécommunications et Réseaux

Spécialité Professionnelle

Electronique des Systèmes Communicants

Année Universitaire
2015 - 2016

Master Professionnel ESCo

Rapport de stage

Titre :

Evolution d'un système d'analyse de l'état de surface de mer.

Auteur : **M. Sébastien PRIGENT**

Responsables :
M. Michel HAMON
M. Benjamin POTELON

BREST
UFR SCIENCES & TECHNIQUES

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Je remercie mon maître de stage, Mr Michel HAMON, pour m'avoir suivi pendant ces six mois. Il m'a transmis une partie de ses connaissances techniques ainsi que sa vision du métier d'ingénieur électronicien. Ses conseils ont été précieux tout au long de ce stage.

Je tiens également à remercier Mr Peter SUTHERLAND pour m'avoir accompagné dans la partie scientifique du projet.

Je veux également témoigner toute ma reconnaissance au groupe technique du LOPS (Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale) pour son accueil au sein de l'équipe, son soutien technique et humain.

Un grand merci à mes collègues de l'unité de Recherche et Développement Technologique. Je pense notamment à Laurent Gautier et à Stéphane Barbot pour leur expertise approfondie sur les cartes SYREDOMY et ALEES.

Je remercie également l'équipe pédagogique de Master ESCo et du LabSTICC, notamment Mr Benjamin POTELON, mon tuteur, et Mr Gérard Tanné, responsable du master, pour avoir suivi mon évolution universitaire. Je les remercie également de m'avoir transmis le savoir nécessaire à un ingénieur électronicien.

TABLE DES MATIERES

1 Introduction 1
2 Présentation de l'entreprise 2
2.1 Présentation générale de l'Ifremer 2
2.2 Le Centre de Brest 2
2.3 Le LOPS (Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale) 3
2.4 L'équipe technique du LOPS 4
3 Projet de bouée dérivante pour la mesure de vagues 4
3.1 Contexte et état des lieux 4
3.2 Evolution des bouées 7
3.3 Déroulement du stage 10
3.4 Moyens à disposition 11
4 Tâches réalisées 15
4.1 Compréhension du post-traitement 15
4.2 Prise en main du logiciel embarqué 18
4.3 Lecture de la donnée brute issue de la centrale inertielle 19
4.4 Portage de l'analyse spectrale sur la bouée 20
4.5 Structure du fichier résultat et issu de l'analyse spectrale 21
4.6 Visualisation à terre du résultat du traitement embarqué 22
4.7 Intégration d'un GPS avec sortie PPS (Pulse par Seconde) 23
4.8 Intégration de la centrale inertielle VN100 24
5 Tests et validation 25
5.1 Test de consommation 25
5.2 Campagne de mesures GreenEdge 2016 25
6 Difficultés rencontrées 27
6.1 Traitement du signal 27
6.2 Programmation 27
6.3 Redémarrage non programmé de la carte électronique 28
7 Les améliorations futures 29
8 Conclusion 30
8.1 Sur le projet 30
8.2 Sur le plan personnel 30
9 Lexique 31
10 Table des références 31
11 Annexes 32

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Implantation de l'Ifremer (source : Ifremer) 2
Figure 2 : Energie des vagues à l'interface air-mer 5
Figure 3 : Zones de déploiement en septembre 2015 5
Figure 4 : Zone de déploiement lors de la campagne BicWin2016 6
Figure 5 a et b : Exemple de déploiement de bouée lors de la campagne BicWin2016 6
Figure 6 : Analyse spectrale des vagues 7
Figure 7 : **a.** Zone de travail lors de la campagne GreenEdge 2016. **b.** Difficulté pour la dépose de l'instrument de mesure 8
Figure 8: Possibilité de drone instrumenté pour la mesure de vagues 8
Figure 9 : Différentes versions de bouées pour la mesure de vagues 9
Figure 10 : Planning réel du projet de fin d'études 11
Figure 11 : Architecture physique de l'instrumentation 12
Figure 12 : a. Carte ALEES vue du dessus. b. Carte ALEES vue du dessous. 13
Figure 13: Carte SYREDOMY 14
Figure 14 : A gauche : Carte GPS. A droite : Carte adaptation modem Iridium 14
Figure 15 : Données d'accélérations brutes des axes X, Y et Z 16
Figure 16 : Données post-traitées à l'aide du script Matlab 16
Figure 17 : Données d'accélérations brutes de l'axe Z 16
Figure 18 : Spectre de fréquence de vague 16
Figure 19: Traitement sur le signal d'accélération de l'axe Z 18
Figure 20: Grafcet de séquencement logiciel 19
Figure 21 : Décomposition de la trame 03 de la centrale SBG Ellipse 20
Figure 22: Comparaison traitement embarqué VS post-traitement Matlab 20
Figure 23: Visualisation de l'analyse spectrale sur boite mail de l'utilisateur 22
Figure 25 : GPS MTK3339 23
Figure 26 : Trames de sorties du GPS MTK 3339 23
Figure 27 : VN100 rugged 24
Figure 28 : Prototype fonctionnel 24
Figure 29: Test de consommation 25
Figure 30 : Zone de déploiement 25
Figure 31 : Campagne GreenEdge 2016 25
Figure 32 : Intégration bouées vagues 26
Figure 33 : Protocole de mise en route avant déploiement 27
Figure 34 : Récupération des bouées 27
Figure 35 : Traitement embarqué VS post-traitement du 18/06/2016 à 13h58 27
Figure 37 : Appel de la fonction malloc() dans le code Mesures vagues 28
Figure 38 : Oscillogramme de la transmission du caractère K (01001011), avec un bit de start et un bit de stop [8] 39

1 INTRODUCTION

Dans le cadre de la formation du Master ESCo (Electronique des Systèmes Communicants), la deuxième année comprend un stage de fin d'études en entreprise.

Ce stage fait partie intégrante du cursus universitaire et doit être mené par l'étudiant de Master 2 dans un établissement industriel ou de recherche. Le projet doit avoir un intérêt indéniable pour l'entreprise d'accueil ainsi que pour l'étudiant, qui devra mettre en application les connaissances acquises durant son cursus universitaire et en particulier durant le M2 ESCo.

Pour ma part, il s'est déroulé du 1 mars au 31 août 2016 sur le centre d'Ifremer de Brest dans l'Unité Mixte de Recherche LOPS (Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale). Le projet "Bouée dérivante pour la mesure de vagues" s'inscrit dans les objectifs scientifiques communs de l'Ifremer et du Laboratoire. En effet, cet outil permettra de calibrer et de valider les algorithmes de prédictions météorologiques existants issus des modèles satellitaires, par confrontation avec des mesures *in situ*. Un des axes de recherche du LOPS porte sur la thématique « Océans et climat » avec en particulier une étude approfondie de l'interface air-mer. Ce développement a un intérêt tout particulier pour la compréhension de l'influence des vagues sur le climat, sur l'impact à la côte et sur la formation de glaces dans les régions polaires.

Par ailleurs, ce stage a sollicité beaucoup de connaissances et a nécessité une grande polyvalence (gestion de projet, programmation, tests, validations techniques, intégration système, reporting), il a donc été enrichissant aussi bien d'un point de vue professionnel que personnel.

Ce rapport présente le travail réalisé pendant mon projet de fin d'études. Dans un premier temps, je vous présenterai le projet de bouées pour la mesure de vagues et les évolutions nécessaires à y apporter avec leurs problématiques. La deuxième partie détaillera les travaux réalisés. Puis j'exposerai les résultats obtenus suite à une campagne océanographique. Enfin, une discussion visera à décrire les difficultés rencontrées, les méthodes mises en place pour les contourner ainsi que les améliorations futures à apporter à la bouée pour la mesure de vagues.

2 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

2.1 Présentation générale de l'Ifremer

L'**I**nstitut **F**rançais de **R**echerche pour l'**E**xploitation de la **MER** est né en 1984 par la fusion de deux organismes, le CNEXO (**C**entre **N**ational pour l'**EX**ploitation des **O**céans) et l'ISTPM (**I**nstitut **S**cientifique et **T**echnique des **P**êches **M**aritimes).

Établissement public à caractère industriel et commercial, l'Ifremer est placé sous la tutelle conjointe :

- Du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR).
- Du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la forêt.
- Du ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE).

L'Ifremer a été créé dans le but de confier à un seul établissement public de recherche, la mission de développer un ensemble d'actions de grande ampleur afin de mieux exploiter les ressources de la mer. L'étendue des domaines d'activités de l'Ifremer est très vaste et regroupe la gestion de l'environnement littoral, la gestion de ressources vivantes marines et la recherche océanique. À ces fins, il conçoit et met en œuvre des outils d'observation, d'expérimentation et de surveillance et gère la flotte océanographique française pour l'ensemble de la communauté scientifique ainsi que des bases de données océanographiques.

Figure 1 : Implantation de l'Ifremer (source : Ifremer)

L'institut est organisé en départements (*Annexe 1 : Organigramme de l'Ifremer*). Ceci dans le but de rendre plus visible les différents corps de métier de l'Ifremer, de conforter les capacités et connaissances acquises de chacun, et de simplifier les procédures de l'institut. Les différents départements gèrent leurs propres projets.

2.2 Le Centre de Brest

Le Centre de Brest (*Annexe 2 : Ifremer centre de Brest)* est situé au goulet de la rade de Brest, face à la pointe des espagnols. Il gère et anime les équipes d'Ifremer basées en Bretagne. Ce site est le plus grand centre d'Ifremer, en taille (45 000 m²) et en personnel (795 salariés). Il mène ses programmes de recherche en partenariat avec des organismes nationaux, européens et internationaux. Au niveau

régional, il contribue activement à la coopération avec les industriels et organismes de recherche à travers le Pôle de Compétitivité « Mer », et est associé à l'Euro pôle Mer.

Les activités du site sont réparties en onze unités de recherche, ils regroupent chacun des équipes de corps de métiers différents :

- Dynamiques de l'environnement côtier
- Economie maritime
- Recherches et développements technologiques
- Etudes des écosystèmes profonds
- Géosciences marines
- Informatique et données marines
- Navires et systèmes embarqués
- Océanographie physique et spatiale
- Physiologie fonctionnelle des organismes marins
- Sciences et technologies halieutiques
- Laboratoire Environnement et Ressources

D'autres organismes de recherche sont également présents sur le site : la direction de l'IPEV (**I**nstitut Polaire Français **P**aul-**É**mile **V**ictor), le centre de Bretagne de l'IRD (**I**nstitut de **R**echerche pour le **D**éveloppement), le laboratoire de pathologies des poissons de l'AFSSA (**A**gence **F**rançaise de **S**écurité **S**anitaire des **A**liments), une unité du CNRS, la composante océan de la Division Technique de l'INSU (**I**nstitut **N**ational des **S**ciences de l'**U**nivers du **C**entre **N**ational de la **R**echerche **S**cientifique). L'Ifremer est également le gestionnaire de la flotte océanographique hauturière nationale à travers l'armateur Genavir. Il contribue également à un centre de documentation commun Ifremer-UBO-IRD : la bibliothèque La Pérouse.

2.3 Le LOPS (Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale)

Le Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS) est une UMR (**U**nité **M**ixte de **R**echerche) sous la tutelle de quatre instituts : Ifremer, UBO, CNRS et IRD. En tant qu'unité de recherche, le LOPS développe et participe à des programmes de recherche en Océanographie qui contribuent au développement des connaissances sur la dynamique des océans. Cette unité étudie également les relations de l'océan avec d'autres entités du système terrestre comme l'atmosphère, les glaces et les organismes vivants. Les trois thèmes principaux de recherche du laboratoire sont :

- Les mécanismes de la dynamique océanique
- Les changements climatiques
- La compréhension des échanges « hauturier - côtier »

Le laboratoire comporte quatre équipes de recherche (*Annexe 3: organigramme du LOPS*) et une composante de soutien à la recherche. Il possède des moyens uniques en France pour la réalisation de campagnes d'océanographie physique : mouillages hauturiers, glider, bathysonde, scanfish *(Annexe 4 : systèmes de mesures océanographiques)*, capteur CTD (Conductivity Temperature Depth), ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), etc.

Ces instruments performants et novateurs permettent de mesurer les principaux constituants physiques des océans comme : le vecteur vitesse du courant, la conductivité, la température, ou la pression des masses d'eau.

Ces grandeurs permettent ensuite d'obtenir des informations sur la salinité et la densité de cette eau. L'objectif est de définir et de comprendre la physique des océans et ainsi de pouvoir prédire les changements climatiques et l'évolution des courants marins.

La composante de soutien intègre une équipe technique (ou groupe technique) à laquelle je suis rattachée (*Annexe 3 encadré en rouge sur l'organigramme*). Cette équipe veille à mettre à disposition des projets scientifiques les techniques de mesure adaptées. Elle met ensuite en œuvre ces techniques lors de différentes campagnes et assure la validation et la qualification des données.

2.4 L'équipe technique du LOPS

L'équipe technique se compose de 7 ingénieurs (mécanique, électronique, chimie, système embarqué et informatique) et 3 techniciens (instrumentation scientifique, techniques expérimentales, programmation). Chaque année, un à trois accueils temporaires s'ajoutent à ce groupe (stagiaire, CDD, contrat d'alternance). L'équipe conçoit les équipements et dispositifs accompagnant l'instrumentation scientifique nécessaire à la réalisation de projets expérimentaux à la mer, dans le cas où ces équipements ne peuvent être obtenus par l'achat d'un matériel adéquat sur étagère. Pour la maintenance ou le développement, un large spectre d'outils en mécanique et électronique sont à disposition: du marteau à la fraiseuse en passant par le fer à souder et l'oscilloscope.

3 PROJET DE BOUEE DERIVANTE POUR LA MESURE DE VAGUES

3.1 Contexte et état des lieux

Les chercheurs du LOPS qui étudient les interactions entre vagues et courant souhaitent pouvoir mesurer puis quantifier l'impact du courant sur la hauteur et la direction des vagues. Le directeur du laboratoire et les chercheurs ont fait appel au groupe technique pour la mise en œuvre d'un instrument qui pourrait permettre cette étude.

Le LOPS met en œuvre différents types de mouillages ou châssis instrumentés. Cependant, il ne dispose actuellement pas d'un moyen simple à déployer capable de réaliser des mesures d'état de mer. Le développement d'une bouée dérivante est un bon moyen pour répondre à cette problématique scientifique. A l'heure actuelle, des bouées effectuant des mesures en mer existent, cependant elles sont le plus souvent amarrées et ne permettent pas d'effectuer les mesures recherchées. En effet, un amarrage contraint le système qui de fait ne peut plus suivre précisément l'état de mer. De plus, elles sont de grande taille et ne permettent pas une mesure fine des vagues comme le ferai un objet dérivant de taille inférieure.

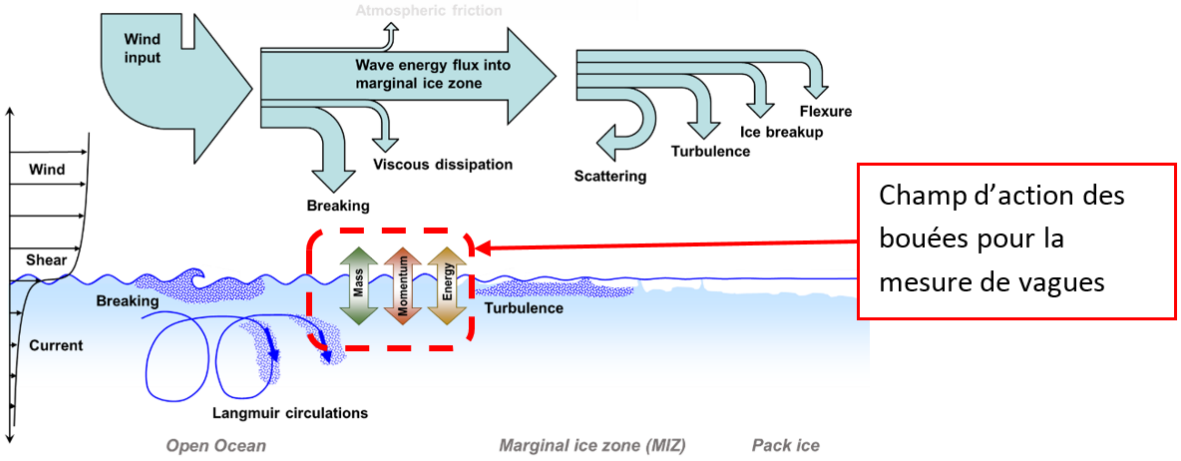


Figure 2 : Energie des vagues à l'interface air-mer

Durant le stage de fin d'étude de Pierre THOMAS, étudiant ENSTA Bretagne, de mars à août 2015 au sein du laboratoire, un prototype de bouée dérivante a été réalisé. Le fonctionnement et les données issues de la bouée ont pu être validés à la suite du déploiement d'une flotte de 8 bouées dérivantes lors de la campagne BBWaves (BroadBandWaves) au large de Brest en septembre 2015. Les déploiements se sont déroulés sur 3 zones : le front d'Ouessant, le passage du Fromveur et le chenal du Four.

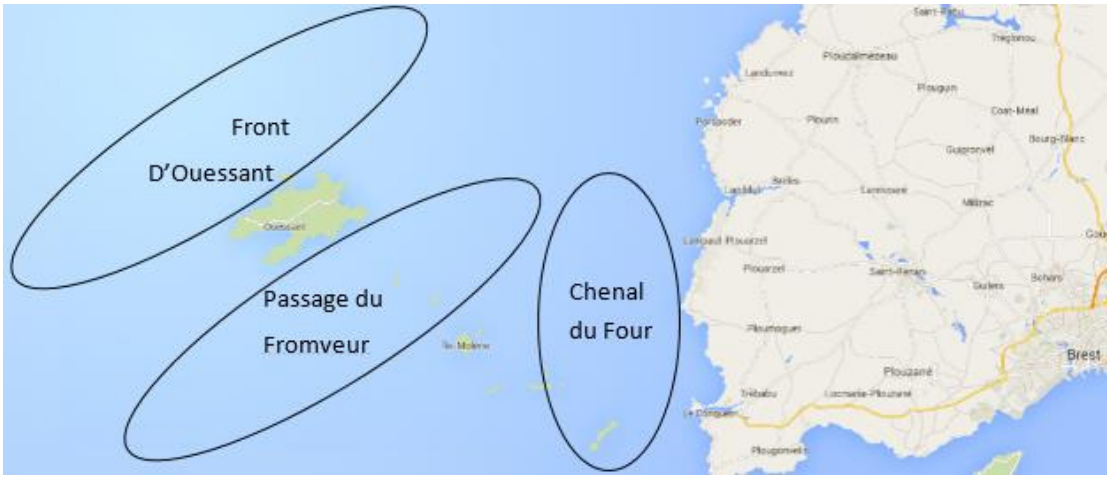


Figure 3 : Zones de déploiement en septembre 2015

Ces 3 zones intéressent les chercheurs du fait des fortes variations de courant (vitesse et direction) et d'une exposition importante à la houle. Ils tentent de comprendre ces variations avec plusieurs dispositifs : des images SAR (Synthetic Aperture Radar) pour une vision globale du courant et de la houle (exemple d'image SAR en *Annexe 5* : Image SAR de la mer d'Iroise) et des modèles numériques de ces mêmes paramètres établis à partir de données satellitaires (exemple de modélisation en *Annexe 6* : Modélisation de la mer d'Iroise).

Pierre THOMAS s'est appuyé sur des cartes électroniques et un logiciel embarqué maîtrisés par le groupe technique. Les principaux défis ont été de valider la faisabilité de la mesure avec les capteurs à disposition et d'intégrer le système dans une mécanique ne perturbant pas le milieu. Un travail tout particulier a été entrepris pour réaliser une mécanique étanche réalisée à l'imprimante 3D.

L'étude des mouvements de surface océanique a été réalisée au moyen d'un accéléromètre et d'un GPS. L'accéléromètre a permis la connaissance des mouvements verticaux (hauteur et fréquence) de

la bouée et le GPS la connaissance des déplacements horizontaux (position géographique, direction et vitesse).

La bouée dérivante fournit des données *in situ* à haute résolution permettant une meilleure interprétation des données SAR et une meilleure modélisation des interactions vagues-courant.

La faisabilité de ce nouveau moyen de mesure a également ouvert de nouvelles perspectives pour la mesure des mouvements des glaces dans des zones plus reculées, notamment pour Peter Sutherland, scientifique canadien embauché à l'Ifremer en octobre 2015. En effet, sa problématique de recherche est axée sur le déplacement de la banquise en Arctique.

Les mouvements des glaces demandent une mesure de pilonnement plus précise et moins bruitée qu'une mesure de hauteur de vagues en mer ouverte. En fin d'année 2015, des tests ont révélé que l'accéléromètre jusqu'à présent utilisé, ne suffisait pas aux besoins des campagnes en Arctique car sa mesure est trop bruitée et il ne détecte pas les longues périodes de houles supérieures à 5 secondes. Une modification majeure a été nécessaire en intégrant une centrale d'attitude de haute sensibilité. Une centrale inertielle ou centrale d'attitude est un instrument souvent utilisé en navigation, capable de traiter les mouvements d'un appareil mobile pour estimer son orientation dans l'espace. Elle fournira des informations d'accélérations, de vitesse angulaire, de roulis de tangage et de cap. Les données de la centrale inertielle sont de bonnes qualité car elle intègre des algorithmes pointus de traitement de donnée temps-réel.

Ces dernières modifications effectuées par le groupe technique, les bouées ont pu être déployées en février 2016 dans le parc National du Bic au Québec lors de la campagne BicWin.

Figure 4 : Zone de déploiement lors de la campagne BicWin2016

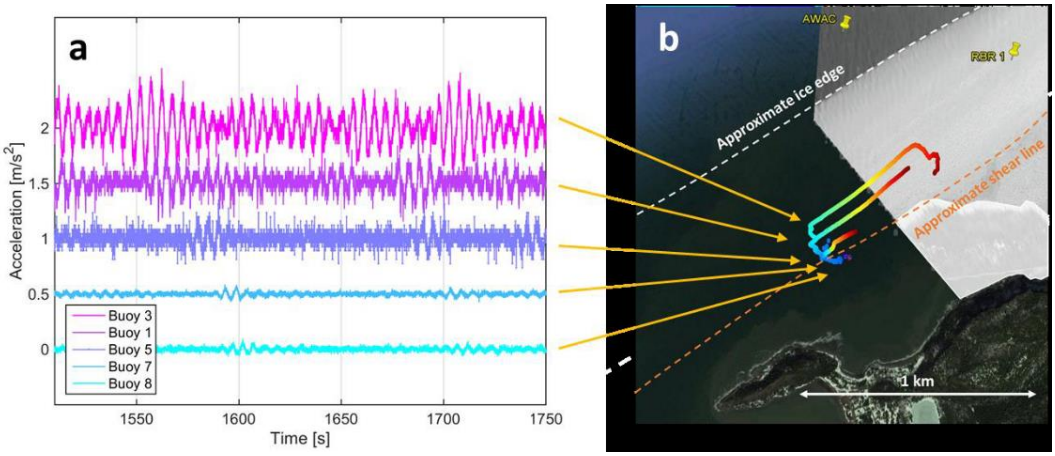
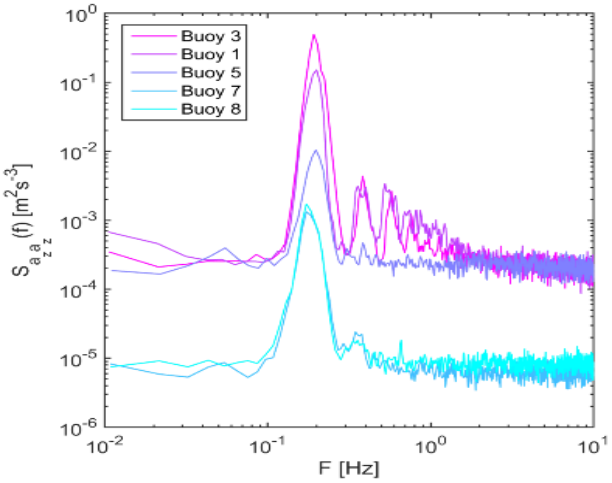


Figure 5 a et b : Exemple de déploiement de bouée lors de la campagne BicWin2016



La *figure 5.a* montre des séries temporelles d'accélérations verticales pour 5 bouées posées à une distance variable du bord de la glace : la rose étant la plus proche du bord de la glace et la bleue, la plus éloignée. Plus les bouées s'éloignent du bord de la glace, plus l'énergie des vagues tend à décroître. La figure 5.b montre leurs déplacements pendant une heure. Initialement les bouées avaient été déposées en ligne, orthogonale au bord de la glace. Les couleurs correspondent au temps (bleu : t = 0, rouge t = 1h). La *figure 6* représente l'analyse spectrale des 5 bouées réalisée à terre.

Figure 6 : Analyse spectrale des vagues

Les mesures, après traitement à terre, se sont révélées de très bonne qualité. Des publications dans des journaux scientifiques et techniques sont en cours de rédaction. Ces dernières campagnes ont également validé la viabilité du projet.

A ce jour, voici les caractéristiques techniques de la bouée :

- Accéléromètre ou centrale inertielle permettant la mesure des vagues ayant des périodes entre 0.6 secondes et 5 secondes, soit une gamme de fréquence entre 0.2 et 1.5Hz.
- Autonomie d'environ 15 jours de fonctionnement en mode nominal avec l'accéléromètre et inférieure à une semaine avec la centrale inertielle.
- Coordonnées GPS transmises par satellite toutes les 10 minutes.
- Acquisition de données brutes des capteurs.
- Stockage de données sur carte µSD. Récupération indispensable de la bouée.
- Traitement des données brutes réalisé à terre après récupération des bouées.

Deux expériences concluantes en mer ont été réalisées avec ces bouées :

- BBWAVES 2015: 8 bouées vagues déployées en mer d'Iroise pendant 2 jours.
- BicWin 2016: 6 bouées vagues + 2 bouées glace déployées dans le parc national du Bic au Québec.

3.2 Evolution des bouées

3.2.1 Les problématiques actuelles

Fort de ces résultats très encourageants, Peter Sutherland a souhaité poursuivre dans cette voie. Le groupe technique du LOPS a donc été sollicité pour apporter de nouvelles améliorations et je fus largement impliqué dans ce projet. En l'état actuel, la principale inquiétude est le fait que les bouées ne peuvent être perdues par l'utilisateur. En effet, qu'elles soient dérivantes en pleine mer ou posées sur la banquise, l'utilisateur est dans l'obligation de les récupérer pour pouvoir traiter la donnée enregistrée. Le risque encouru est une perte financière importante, celle du matériel en lui-même, celle engendrée par la campagne et les infrastructures permettant de déployer ces bouées et bien entendu la perte de données scientifiques pour le chercheur.

La problématique actuelle est que la donnée issue de la centrale inertielle est trop volumineuse pour être transmise en temps réel dans son intégralité. Pour donner un ordre d'idée, une heure

d'acquisition représente 18 Mo. En multipliant par le coût de transmission par iridium du kilo octet, la note s'élèverait à 18 000€/h de transmission satellite par iridium, sans compter le cout énergétique estimé à 53 Ah @ 7.2V. Cette solution est bien entendu inenvisageable.

L'alternative est de transmettre un volume moindre de données en envoyant seulement une analyse spectrale de la hauteur des vagues. Plusieurs intérêts à cette méthode :

- une partie de la donnée est récupérée et exploitable en cas de perte totale de la bouée.
- lors du premier déploiement dans une zone de travail, la première analyse reçue en quasi-temps réel permet au scientifique d'ajuster la zone de travail en fonction de la pertinence du résultat.

Avec l'expérience du terrain, une autre problématique a été soulevée, celle de la difficulté de se déplacer dans ces zones reculées pour déposer les bouées de mesure. Cela nécessite en effet des moyens importants ainsi qu'une énergie considérable dans des conditions climatique extrêmes. En effet, une fois la banquise atteinte à l'aide d'un brise-glace, il faut pouvoir descendre déposer les bouées directement sur les pains de glaces. Jusqu'à présent, la solution employée est de se rendre sur la zone à l'aide d'un canoë ou d'un zodiac. Les séries temporelles de mesures étant relativement courtes (~3h), les manœuvres dans ces endroits difficiles accès doivent se répéter souvent. Le problème étant que ces dernières sont souvent éprouvantes physiquement et qu'elles présentent un risque d'accident important en cas de chute en mer.

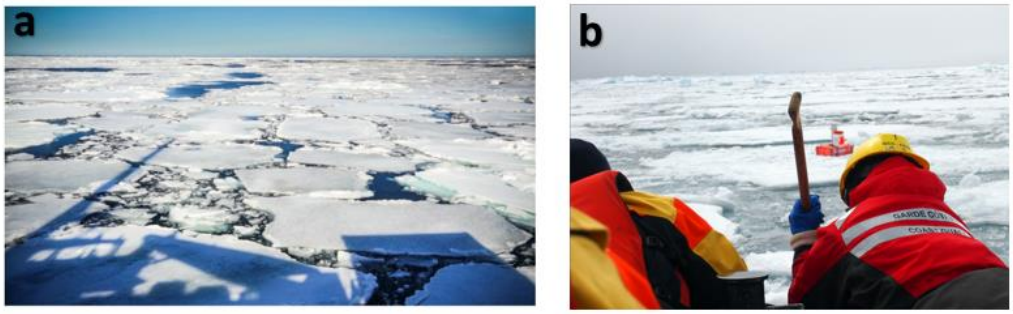


*Figure 7 : **a.** Zone de travail lors de la campagne GreenEdge 2016. **b.** Difficulté pour la dépose de l'instrument de mesure*

Pour solutionner ce problème, les scientifiques envisagent d'embarquer l'instrumentation de mesures sur un drone. Il sera alors relativement simple d'atteindre un point GPS, de réaliser une station de mesure durant quelques heures à l'endroit voulu et de se déplacer à un autre point de mesure. Tout ceci en commandant le drone directement du pont du brise-glace.

Figure 8: Possibilité de drone instrumenté pour la mesure de vagues

L'idée de base est d'avoir un petit Hexacopter avec GPS embarqué / IMU (Inertial Measurement Unit) qui puisse atterrir sur la banquise, enregistrer environ 20 minutes de données, atteindre un nouvel endroit pour une nouvelle acquisition et revenir ensuite à son point de départ en autonomie. Le but est de garder une instrumentation identique à celle des bouées et de ne modifier que le vecteur.

Il devra tenir les caractéristiques suivantes :

- Acquérir en continu des données GPS et de l'IMU ;
- Garder un système mécanique et électronique identique à la bouée glace ;
- Atteindre une autonomie de 12 heures en enregistrement de donnée ;
- Assurer la flottabilité et l'étanchéité du système ;
- respecter un poids du système < 2kg ;
- Être opérationnel avec des vents forts de 25 nœuds ;
- Être robuste et résistant aux basses températures ;
- Pouvoir couvrir une zone de 2 km autour du point de départ (500m de tolérance) ;
- Avoir un retour vidéo durant les déplacements et être synchronisé avec les autres capteurs en utilisant une base de temps GPS.

Les échéances pour la réalisation de ces changements sont les suivantes :

- Baie de Baffin au Québec, Rimouski, 15/01/2017 – 28/02/2017 ;
- Forte probabilité de futures missions en Arctique et en Antarctique.

En conclusion, 3 besoins différents de mesure de vagues sont donc identifiés en fonction du contexte et de l'environnement donné:

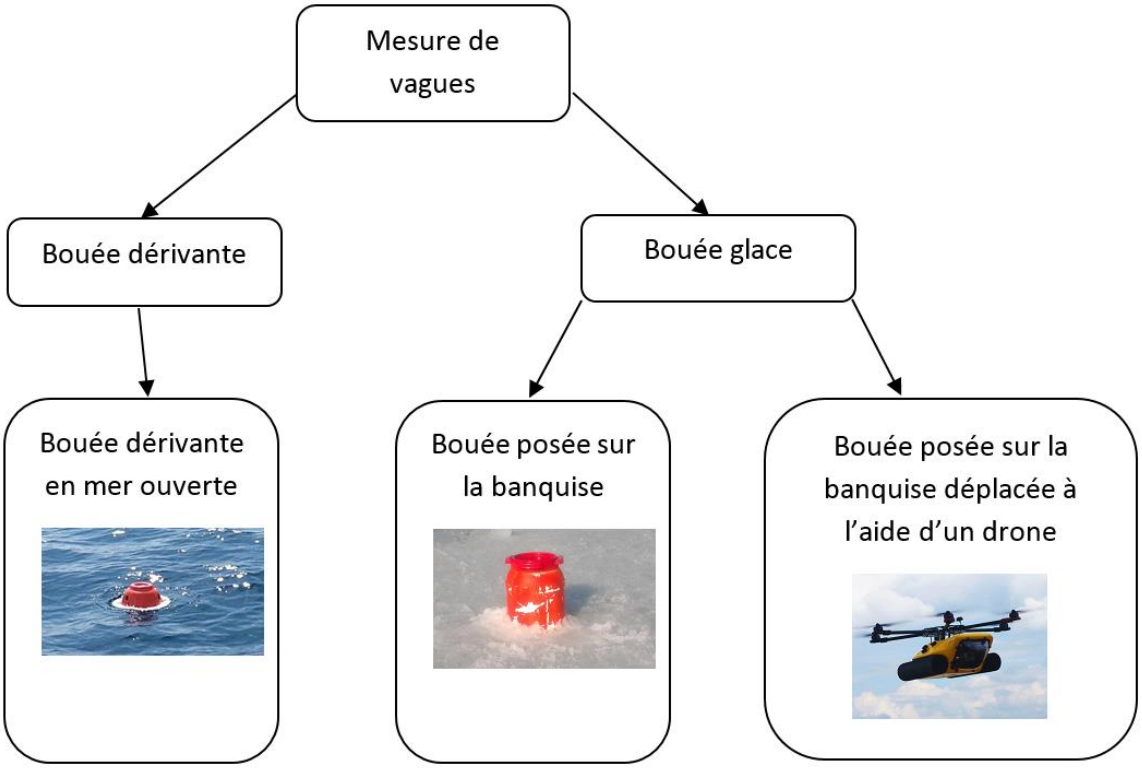


Figure 9 : Différentes versions de bouées pour la mesure de vagues

3.2.2 Améliorations à apporter aux bouées pour la mesures de vagues

Une série de modifications est à réaliser sur l'ensemble des versions des bouées, afin d'améliorer leur fonctionnement ainsi que les données scientifiques résultantes :

- Effectuer un traitement embarqué de grandeurs physiques suivantes:
  - Calcul des moments pour visualiser l'énergie des vagues ;
  - Angle de diffusion des vagues ;
  - Direction moyenne.
- Transmettre une partie des informations en temps quasi-réel.
- Synchronisation parfaite entre tous les capteurs en prenant une base de temps commune à savoir le temps GPS. Lors d'une campagne de mesure, une flotte de capteurs est déployée simultanément pour mesurer une multitude de paramètres physiques de l'eau et de l'atmosphère : CTD pour la mesure des paramètres physico chimique de la mer, ADCP pour la mesure des profils de courant des masses d'eau, bouée vagues pour l'état de surface de l'eau, anémomètre pour la vitesse et la direction du vent, etc. Il est donc très important que tous ces capteurs soient référencés temporellement de la même manière pour pouvoir corréler et valoriser l'ensemble de ces paramètres.
- Modification à distance de la fréquence d'envoi des positions GPS pour affiner la géolocalisation dans des zones de forts courants.
- Modification à distance de la fréquence d'échantillonnage de la centrale d'attitude pour réaliser une mesure plus ou moins fine en fonction de l'intérêt de la zone.
- Possibilité d'éteindre la centrale inertielle à distance lorsque les batteries sont vides pour conserver assez d'autonomie pour continuer à envoyer régulièrement des positions GPS.
- Réduire le coût de fabrication d'une bouée. Premièrement en remplaçant la centrale IMU actuelle SBG Ellipse N (3500€) par une nouvelle centrale avec des caractéristiques similaires. Une recherche effectuée en amont par Peter Sutherland a démontré que la Centrale VectorNAV VN100 (1000€) remplirait pleinement cette fonction.
- Atteindre une autonomie de 3 mois.

Les échéances pour la réalisation de ces changements sont les suivantes:

- Campagnes BBWAVES en octobre 2016 & 2017 ;
- Campagne en baie de Baffin, Rimouski, 15/01/2017 – 28/02/2017.

3.3 Déroulement du stage

Au début du stage, le groupe technique m'a présenté les différents interlocuteurs pour ce projet de fin d'études. Il a fallu interagir avec les chercheurs pour comprendre leurs besoins et ainsi définir les tâches à effectuer pendant ces 6 mois.

Les tâches ci-dessous ont été réalisées pour atteindre cet objectif.

1) Prise de connaissance du post traitement écrit sous Matlab.
2) Prise de connaissance du logiciel embarqué en langage C et de l'environnement de développement existant. Etude de faisabilité de traitement du signal sur notre plateforme et portage du code en langage C.
3) Validation des données traitées en embarqué par le post-traitement réalisé à l'aide du code source Matlab.
4) Génération d'un fichier résultat (spectre de vague) transmis par iridium.

5) Ecriture en langage Python d'un script de visualisation du fichier résultat. Ce script sera inséré dans la chaîne de réception de fichier par iridium pour une visualisation automatisée du spectre de vague sur une boite mail.
6) Test de consommation et dimensionnement des piles avant les essais en mer. L'utilisation du compteur d'énergie du groupe technique était un avantage, l'autonomie du système a été calculée rapidement.
7) Juin 2016 : une personne du laboratoire a participé à une campagne de 6 semaines en Arctique pour déployer 2 bouées glace pour la mesure des mouvements de la banquise. Première campagne d'expérimentation des modifications apportées (traitement du signal embarqué + émission des fichiers résultats par iridium): les 2 systèmes devaient être prêts à être déployés pour cette échéance.
8) Intégration d'un nouveau GPS avec sortie PPS (Pulse Par Seconde) pour homogénéiser la base de temps des différents capteurs, à savoir l'utilisation d'une seule et même référence de temps : l'heure GPS.
9) Changement et intégration d'une nouvelle centrale d'attitude Vector Nav, aussi performante que la SBG Ellipse N mais moins onéreuse.
10) Validation et test en endurance de la nouvelle électronique.
11) Campagne en mer d'Iroise comme l'an passé: une mesure en mer non loin de la bouée de mesure « Pierres Noires » sera réalisée en septembre 2016. La comparaison des données de houle (hauteur et période) de cette bouée amarrée avec la bouée dérivante permettra la validation de modifications réalisées.

Voici le planning réel suivi pendant ce projet de fin d'études :

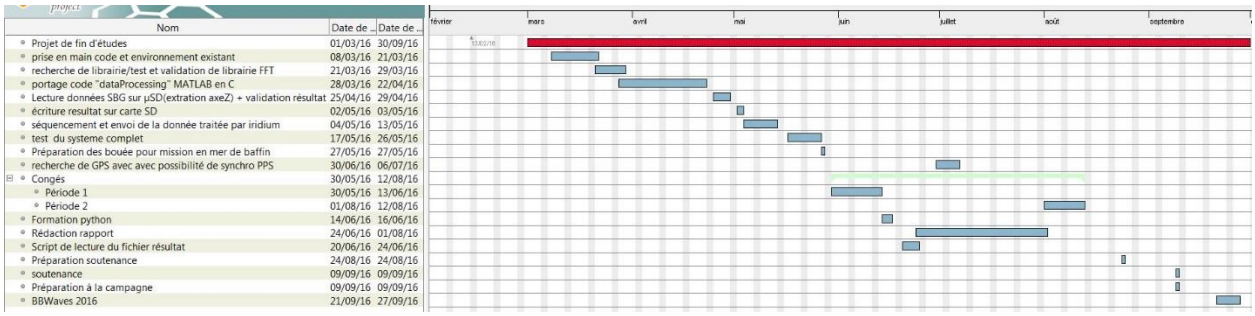


Figure 10 : Planning réel du projet de fin d'études

3.4 Moyens à disposition

3.4.1 Moyens matériels

De manière générale, en océanographie, la principale contrainte des structures instrumentées est l'autonomie de fonctionnement. Les systèmes d'acquisitions sont très souvent immergés ou déployés dans des lieux très difficiles d'accès. La maintenance et le changement de batteries sont très difficiles voire impossibles. Ces systèmes ne sont que très rarement alimentés de manière permanente, ils sont donc autonomes et équipés d'une énergie limitée. La consommation électrique est donc le point sensible de beaucoup de systèmes océanographiques.

Dans un souci d'homogénéité, les nouveaux développements au sein de l'Ifremer sont basés, autant que possible, sur un même cœur électronique. En 2010, une refonte de la carte électronique vieillissante (basée sur un microcontrôleur ATMEL ATméga 128) a mené à une recherche approfondie de nouvelles solutions existantes sur le marché pouvant la remplacer.

De nombreuses cartes microcontrôleurs sont disponibles sur le marché, cependant aucune ne répondait aux contraintes énergétiques de la plupart des projets *i.e*. elles n'intégraient pas à la fois une très faible consommation en fonctionnement et un mode de veille profonde.

En 2012, la décision avait été prise de réaliser une carte dédiée articulée autour d'un microcontrôleur très faible consommation de type GiantGecko EFM 32. Ce composant correspondait parfaitement au cahier des charges établi. Le choix de la faible consommation s'est fait au détriment de la puissance de calcul, non prioritaire jusqu'alors. J'ai moi-même participé activement au développement hardware de cette carte, en réalisant l'intégralité du placement/routage ainsi que le suivi de la sous-traitance. A l'issu de son développement, la carte ALEES (Advanced Low Energy Electronic System) réalisée par le service Recherche et Développement Technologique de l'Ifremer consomme 42 mA @ 7.4V en fonctionnement et 12 µA @7.4V en mode veille. En comparaison, la célèbre carte Raspberry consomme 10 fois plus en fonctionnement et ne dispose pas de mode veille.

Cette solution a les avantages cités mais a également l'inconvénient majeur d'avoir une communauté active sur le web très restreinte. Le temps de développement du software est donc beaucoup plus long qu'une carte utilisée par un large panel d'usagers. De plus, toujours dans un souci d'optimisation énergétique, le choix a été fait de ne pas implanter de système d'exploitation pour contrôler au mieux la dépense énergétique du système.

Pour minimiser les temps de développement, la bouée dérivante pour la mesure de vagues est basée sur un projet déjà existant et maîtrisé par le laboratoire, le projet SYREDOMY (SYstème de REcuperation de DOnnées par Messager hYperfréquence). Ce projet permet de récupérer les données scientifiques d'un châssis d'instrumentation (ou mouillage) directement à terre sans avoir besoin de récupérer le châssis se situant au fond de la mer. Les parties matérielles et logicielles de ce projet ont donc été utilisées, le principe de fonctionnement de ce projet est présenté en *Annexe 7.* Le fait de disposer de matériels déjà fonctionnels a permis de maîtriser rapidement l'existant pour y apporter les améliorations.

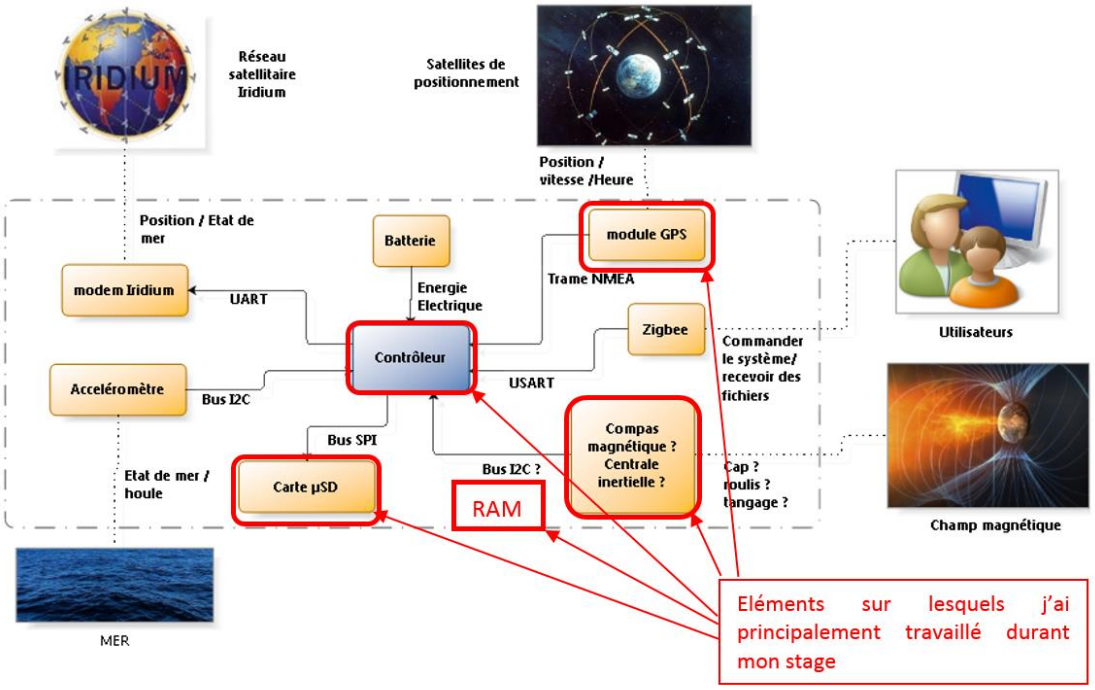


Figure 11 : Architecture physique de l'instrumentation

L'accéléromètre ou la centrale inertielle et le module GPS sont les capteurs principaux de ce projet puisqu'ils fournissent les informations sur l'état de mer, le positionnement et les mouvements de la bouée.

➢ **Carte électronique ALEES**:

Pour mesurer les accélérations, un accéléromètre est utilisé. Ce composant se situe sur la carte ALEES (Advanced Low Energy Electronic System). Cette carte a été conçue en 2012 par le service EIM (Electronique, Informatique et Mesure *in-situ*) de l'unité Recherche et Développement Technologiques (RDT) pour des applications demandant une optimisation importante de la consommation. Le premier projet à avoir utilisé cette carte est le projet SYREDOMY.

Description des ressources matérielles de la carte ALEES (*voir Figure 12*) :

- Microcontrôleur 32bits EFM32 cortex M3 ;
- Vitesse jusqu'à 48MHz, 1Mo flash programme ;
- 128ko RAM ;
- Carte mémoire micro SDHC + système de fichiers FAT32 ;
- Accéléromètre 3 axes ;
- Mémoire paramètre FRAM ;
- Capteurs servitude température/baromètre ;
- 6 UARTs ;
- Horloge temps réel RTC (Real Time Clock);
- USB.

L'accéléromètre ST LIS3SH implanté sur la carte ALEES (encadré sur la *Figure 12b*) permet de mesurer les accélérations sur les trois axes (X, Y, Z). Les informations transitent entre le microcontrôleur et l'accéléromètre de la carte ALEES par l'intermédiaire d'un bus I2C (Inter Integrated Circuit). C'est un accéléromètre à basse consommation (entre 2 et 6 µA sous une tension de 2,5 V et selon la fréquence d'échantillonnage). L'échelle des accélérations est programmable de 2 à 16 g (1g=9,81m/s²). Ce composant permet aussi de détecter 6 positions de l'accéléromètre. Il dispose également d'un bus SPI, ce bus n'est cependant pas utilisé car celui-ci est câblé avec le bus I2C de la carte ALEES. Ce composant tend à être remplacé par une centrale inertielle plus précise.

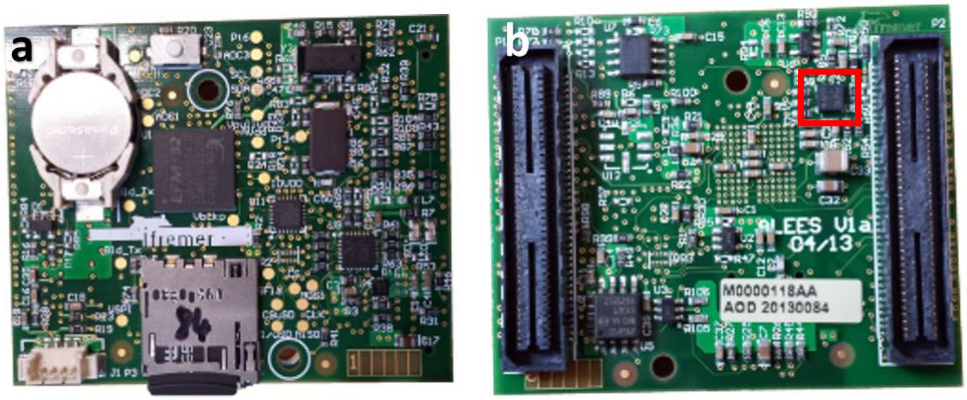


Figure 12 : a. Carte ALEES vue du dessus. b. Carte ALEES vue du dessous.

➢ **Carte SYREDOMY**

La carte SYREDOMY sera connectée à la carte ALEES (carte microcontrôleur) (voir les connecteurs qui accueillent la carte ALEES sur la *Figure 13*). Elle nous permettra de communiquer et de commander le système à distance grâce à une liaison sans fil de type Zigbee, ainsi que d'alimenter et de communiquer avec les cartes GPS et IRIDIUM grâce aux sorties de puissance et aux liaisons séries.

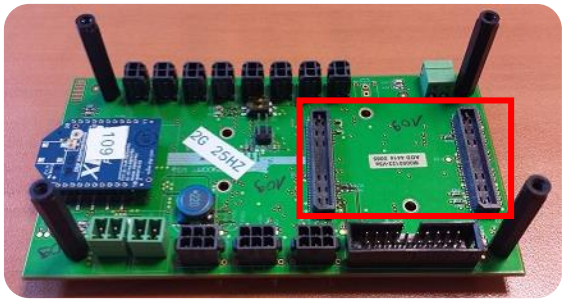


Figure 13: Carte SYREDOMY

➢ **Carte électronique avec module GPS**

Cette carte a été réalisée par un stagiaire de Licence Professionnelle. Elle permet de récupérer la position avec un module GPS (Global Positioning System) et de la transmettre grâce à un modem utilisant le réseau satellitaire ARGOS. Cette carte aide à la recherche d'instruments en mer. Au lieu d'un modem ARGOS ayant une couverture temporelle et spatiale moindre, un modem Iridium transmet la position sur une boite mail, la bouée peut être retrouvée en mer en temps réel à condition d'avoir un accès à la messagerie. Aujourd'hui, cette solution n'est plus pérenne car la puce GPS est maintenant obsolète. Cette carte sera remplacée durant mon stage.

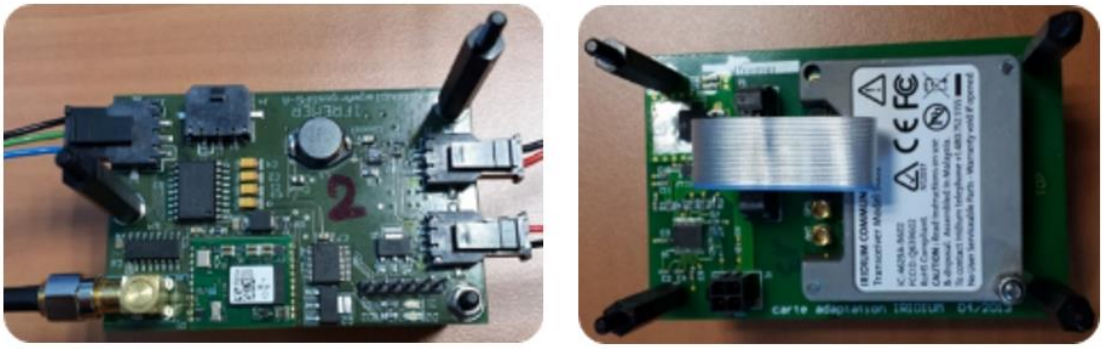


Figure 14 : A gauche : Carte GPS. A droite : Carte adaptation modem Iridium

➢ **Logiciel**

Le logiciel embarqué complet des projets « bouées vagues » est disponible. Les différentes couches, les librairies et les composants *(Annexe 8 : Les différentes couches du logiciel)* des cartes ALEES et SYREDOMY sont fonctionnelles. Seule la couche applicative de ce logiciel sera modifiée pour correspondre aux nouvelles attentes des bouées pour la mesure des vagues. Les outils de développement utilisés sont :

- L'IDE Eclipse et son compilateur langage C GCC et son JLINK JTAG debugger;
- L'IDE PyCharm pour l'environnement Python;
- Matlab.

Concernant l'exploitation du matériel, les outils suivants sont utilisés : l'IDE (Integrated Development Environment) Eclipse pour programmer les cartes électroniques en langage C, Matlab pour le post-

traitement des données ainsi que l'IDE PyCharm pour l'analyse du traitement embarqué en langage Python.

3.4.2 Moyens humains

Ce projet est complexe et des questions se posent dans de nombreux domaines (électronique, mécanique, hydrodynamique, traitement du signal, analyse de données). C'est pourquoi, il fait appel à mes connaissances personnelles mais également à l'expertise des personnes de l'Ifremer. Pour ce stage, l'interaction avec des personnes de différents services a été très enrichissante et indispensable pour mener à bien le projet confié.

3.4.3 Moyens financiers

Le prototype a été financé sur les fonds propres du laboratoire. Suite à des demandes de financements récents, des subventions européennes et CNES (Centre National d'Etudes Spatiale) ont été obtenues pour poursuivre le projet.

4 TACHES REALISEES

4.1 Compréhension du post-traitement

Un point critique a été soulevé sur la perte éventuelle de bouées. Outre la perte financière de l'instrument, le plus dommageable est la perte totale de la donnée acquise. D'où l'importance d'un envoi périodique d'une information significative. Le travail réalisé pour ce projet est principalement une étude de faisabilité du traitement embarqué des données de pilonnement par la carte ALEES. La donnée brute enregistrée, quant à elle, reste stockée dans la bouée, d'autres calculs à terre plus complexes sont possibles à la récupération du matériel. Les priorités ont été rapidement fixées sur la faisabilité du traitement embarqué du signal. En effet, si cette carte axée faible consommation ne peut effectuer le traitement de signal, il faudra s'orienter vers une autre solution *i.e.* le changement de plateforme électronique et donc la révision du cahier des charges en terme d'autonomie de fonctionnement.

Les données présentes sur la carte µSD sont trop volumineuses pour être transférée à un coût supportable par le réseau satellitaire Iridium. L'analyse spectrale du signal acquis ne peut se faire qu'après récupération de la bouée et lecture des données enregistrées. L'idée est ici de calculer le spectre de vagues en embarqué par le microcontrôleur de la carte électronique puis de l'envoyer par Iridium. Le premier travail demandé fut de porter ce post-traitement (jusqu'à présent réalisé grâce à un script écrit sur le logiciel de calcul numérique Matlab) en langage C. De manière évidente, notre plateforme électronique axée faible consommation n'a pas les ressources nécessaires pour faire fonctionner un outil aussi haut niveau que le logiciel Matlab.

Ce script permet de traiter les données brutes (*Figure 15*) issues des axes X, Y et Z de la centrale IMU.

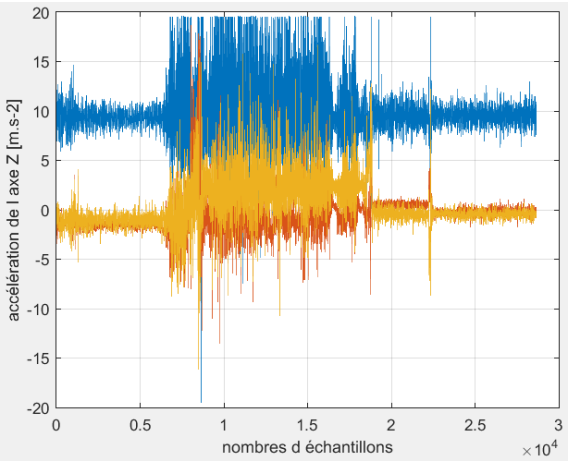


Figure 15 : Données d'accélérations brutes des axes X, Y et Z

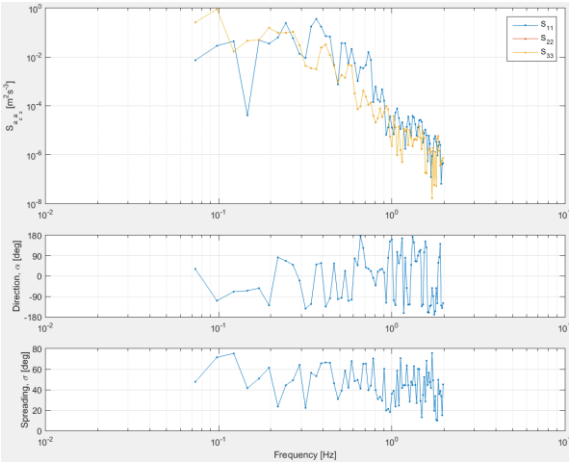


Figure 16 : Données post-traitées à l'aide du script Matlab

Le post traitement numérique réalisé permet de visualiser, entre autres, trois principales caractéristiques en fonction de la fréquence des vagues (*Figure 16*). L'énergie des vagues en premier lieu, puis l'angle de diffusion et leur direction moyenne. Trois éléments importants pour la compréhension du mouvement et de la formation de vagues.

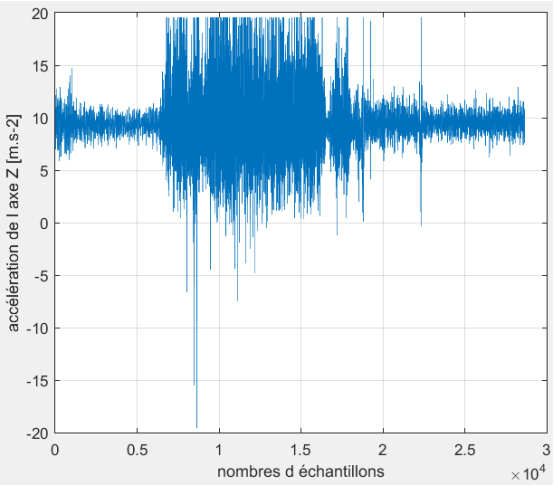


Figure 17 : Données d'accélérations brutes de l'axe Z

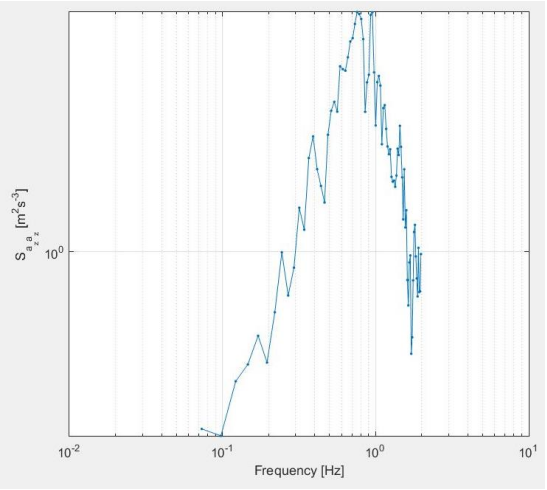


Figure 18 : Spectre de fréquence de vague

La fonction d'analyse spectrale codée en Matlab (*Annexe 10*) à porter en langage C sur notre plateforme a été écrite par Peter Sutherland, scientifique responsable du projet « bouée glace ».

4.1.1 Explication de la fonction Matlab à implanter sur notre plateforme

Cette fonction réalise un périodogramme modifié par la méthode de Welch. En somme, elle calcule une estimation de la densité spectrale de puissance (DSP). Cette méthode enlève la composante continue du signal d'origine, découpe le signal en petits segments, réalise un fenêtrage sur chaque segment, calcule le module de la transformée de Fourier au carré de chaque segment puis réalise une moyenne. Elle permet de connaître l'état moyen de l'amplitude du signal d'entrée pour chaque fréquence.

Paramètres d'entrées :

data_x : signal d'entrée pour lequel on souhaite calculer la DSP
freq_sample = 25 ; fréquence d'échantillonnage, ici 25Hz.
n_windows = 13 ; nombre de fenêtre. Un recouvrement de 50% pour une analyse de 20 mn de signal.

n_fft = 1024 ; Nombre de points pour le calcul de la transformée de Fourier

La fonction renvoie 2 tableaux, un pour le spectre et un pour la fréquence.

En analysant la fonction Matlab écrite, Il peut être rapidement visualisé où pourrait être les points bloquants sur la faisabilité du portage de ce code en langage C.

En effet la transformée de Fourier discrète (TFD) est un outil incontournable du traitement du signal. Le résultat de la transformation est appelée le spectre ou la densité spectrale de puissance (DSP) du signal. Son utilisation sur un système embarqué peut paraître complexe, voir rédhibitoire car consommatrice de mémoire vive. [2]. L'aspect fréquentiel devient évident pour les signaux périodiques qui sont caractérisés par 3 grandeurs : leur amplitude, leur fréquence et éventuellement leur phase.

Un intérêt dans une de ces trois grandeurs justifie l'exploitation de la décomposition en série de Fourier. Cependant elle apporte une complexité calculatoire.

$$X_k = \frac{1}{N}\sum_{t=0}^{N-1} xn \,.\, \mathrm{e}^{-\mathrm{i}2\pi\frac{k}{N}n} \quad \text{Où } k = 0{,}1 \ldots \frac{N}{2}$$

Ceci est la forme complexe de la transformation, mais elle peut aussi être exprimée sous la forme familière utilisant sinus et cosinus:

$$ReX_k = \frac{2}{N}\sum_{t=0}^{N-1} xn \,.\, \cos(2\pi\frac{k}{N}n)$$

$$ImX_k = -\frac{2}{N}\sum_{t=0}^{N-1} xn \,.\, \sin(2\pi\frac{k}{N}n)$$

Et l'amplitude est :

$$MagX_k = \sqrt{Rex_{k^2} + Imx_{k^2}}$$

La densité spectrale de puissance (DSP) est calculée de la manière suivante:

$$S_k = \frac{Magx_{k^2}}{2}$$

Le spectre ($MagXk$) est calculé pour les fréquences fondamentales. La résolution en fréquence du spectre dépend du nombre d'échantillons utilisés dans la transformation et la fréquence d'échantillonnage. Elle est donnée par $\frac{fréquence\ d'échantillonage}{N}$. [3]

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme efficace en informatique pour calculer les TFD.

Dans notre cas, aucune bibliothèque mathématique n'a été implémentée sur la carte ALEES. Le choix était alors soit de développer nos propres routines, soit de s'appuyer sur des routines existantes. Le calendrier du projet m'a conduit à privilégier la seconde piste. Après quelques recherches, mon choix s'est tourné vers une bibliothèque disponible en Open Source « kissfft ». Cette bibliothèque offre plusieurs avantages : des utilisateurs nombreux, légèreté, simplicité à mettre en œuvre, robustesse.

4.1.2 Contraintes

La problématique étant posée, un compromis doit être trouvé pour satisfaire les besoins de tous avec le matériel à disposition:

1) Le temps d'enregistrement doit être le plus long possible avec une centrale IMU générant un flux de donnée important ;
2) Allouer une taille de buffer en RAM suffisante pour permettre l'écriture sur carte µSD ;
3) Réaliser un traitement embarqué rapide pour ne pas trop impacter l'acquisition ;

4) Manipuler des tableaux de 1024 points pour avoir une résolution spectrale intéressante et ne pas saturer la mémoire vive de 128 Ko ;
5) Envoyer par iridium une DSP sur une plage de fréquence de [0.05 Hz à 1,5 Hz] pour un signal de 20 mn toutes les heures (*Figure 19*).

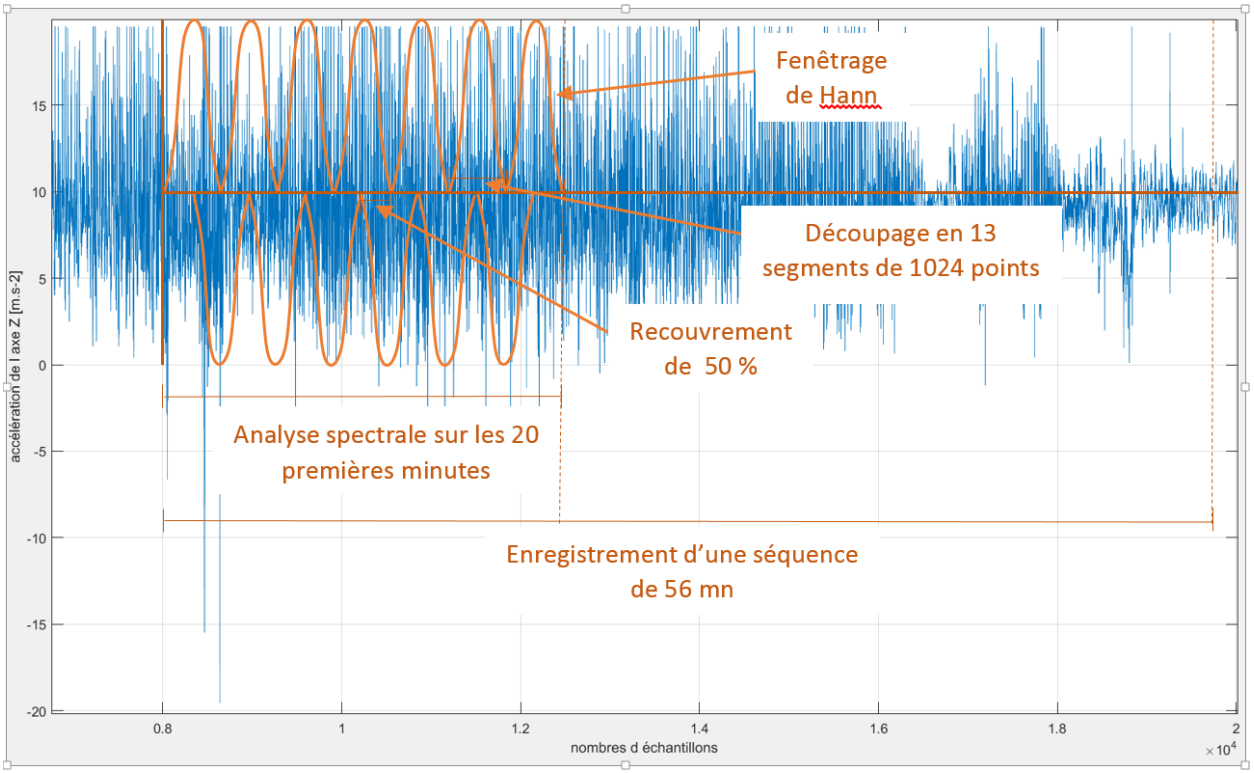


Figure 19: Traitement sur le signal d'accélération de l'axe Z

4.2 Prise en main du logiciel embarqué

Cette partie présente plus en détail le fonctionnement logiciel de l'applicatif. Tout d'abord, il ne s'agit pas ici d'une carte électronique temps réel, le traitement des actions se fera donc de manière séquentielle, les unes après les autres. Le microcontrôleur intègre une fonction DMA (Direct Memory Access) pour paralléliser certaines tâches, cependant c'est une piste inexplorée à ce jour. L'ajout des nouvelles options (en rouge sur la *Figure 20* ci-dessous) ne perturbera l'acquisition que très peu de temps (56 mn de d'acquisition et 3 mn 40 de traitement).

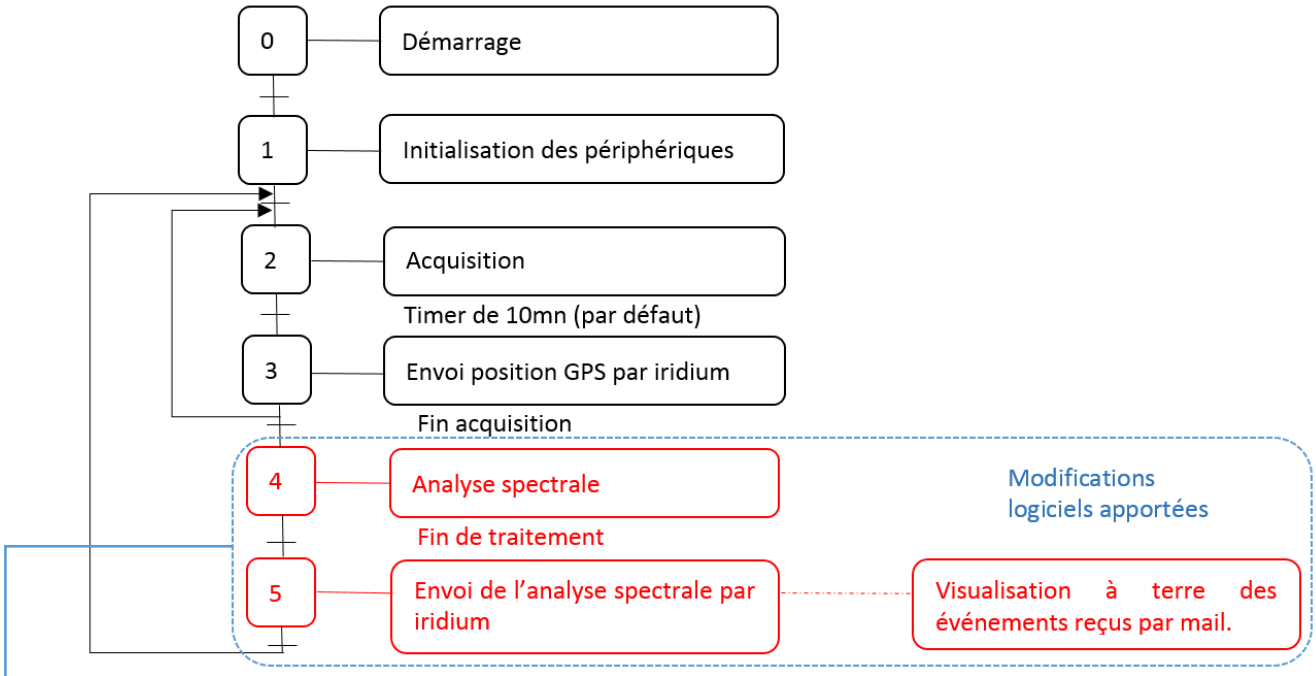


Figure 20: Grafcet de séquencement logiciel

Pour faciliter l'explication et pour mieux se repérer dans le processus de traitement, les étapes seront présentées sous cette forme de processus.

4.3 Lecture de la donnée brute issue de la centrale inertielle

Le travail débute à l'étape 4 du grafcet de séquencement logiciel, les étapes précédentes ayant déjà implémentées à mon arrivée. L'acquisition et le stockage de la donnée de la centrale inertielle étant terminés, la première étape du traitement consiste en une lecture et une extraction des données pertinentes du fichier résultant stocké sur la carte µSD. Pour ce faire, une analyse détaillée du mode de fonctionnement de la centrale Inertielle SBG Ellipse fut nécessaire pour ne sélectionner que l'information utile dans les trames de sortie. [5]

Field	Description	Unit	Format	Size	Offset
TIME_STAMP	Time since sensor is powered up	µs	uint32	4	0
IMU_STATUS	IMU Status bitmask	-	uint16	2	4
ACCEL_X	Filtered Accelerometer – X axis	m/s²	float	4	6
ACCEL_Y	Filtered Accelerometer – Y axis	m/s²	float	4	10
ACCEL_Z	Filtered Accelerometer – Z axis	m/s²	float	4	14
GYRO_X	Filtered Gyroscope – X axis	rad/s	float	4	18
GYRO_Y	Filtered Gyroscope – Y axis	rad/s	float	4	22
GYRO_Z	Filtered Gyroscope – Z axis	rad/s	float	4	26
TEMP	Internal Temperature	°C	float	4	30
DELTA_VEL_X	Sculling output – X axis	m/s²	float	4	34
DELTA_VEL_Y	Sculling output – Y axis	m/s²	float	4	38
DELTA_VEL_Z	Sculling output – Z axis	m/s²	float	4	42
DELTA_ANGLE_X	Coning output – X axis	rad/s	float	4	46
DELTA_ANGLE_Y	Coning output – Y axis	rad/s	float	4	50
DELTA_ANGLE_Z	Coning output – Z axis	rad/s	float	4	54
				Total size	58

Figure 21 : Décomposition de la trame 03 de la centrale SBG Ellipse

La fonction écrite en langage C parcourt le fichier binaire, en répétant 1024 fois la boucle suivante :

1) repère la trame N°3 avec l'entête « 0xFF5A03 » ;
2) stocke l'information « ACCEL_Z » codée sur 4 octets dans un tableau de réels ;
3) recherche la fin de la trame N°3 avec l'octet « 0x33 » ;
4) teste la position du curseur dans le fichier pour savoir s'il est à la fin du fichier et éviter tout plantage logiciel.

4.4 Portage de l'analyse spectrale sur la bouée

Cette étape de transcription de code Matlab en langage C a été relativement longue et fastidieuse. Non pas réellement dans l'écriture du code à proprement dit, mais dans la validation du calcul mathématique réalisé. Il a fallu valider en mode « débogage », variable par variable jusqu'à obtenir des résultats identiques. Les 50 lignes de codes d'un langage de haut niveau comme Matlab se sont traduites par environ 200 lignes en un langage plus bas niveau comme le langage C.

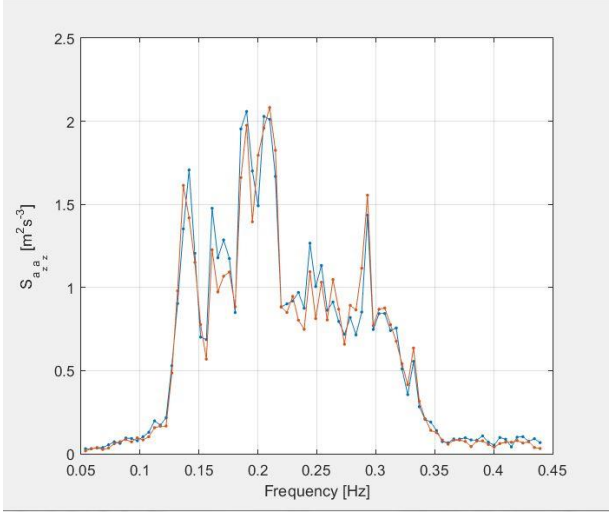


Figure 22: Comparaison traitement embarqué VS post-traitement Matlab

Au final, la carte électronique (courbe rouge de la *Figure 22*) équipée de son nouveau logiciel embarqué fournie des résultats très proches du post traitement Matlab (courbe bleue de la *Figure 22*). La différence est due à la fonction d'extraction de donnée de la centrale inertielle SBG. Pour une raison indéterminée à ce jour, la fonction occulte une trame N°3 toute les 3000 à 4000 trames et crée un décalage dans le calcul de la transformée rapide de Fourier. Ce delta n'a aucune incidence car l'allure de l'information reste sensiblement la même.

4.5 Structure du fichier résultat et issu de l'analyse spectrale

Une attention toute particulière a été portée à minimiser autant que possible la taille des fichiers envoyés. En effet, il est important de garder à l'esprit que la transmission de données par satellite et notamment par Iridium est relativement onéreuse. L'offre commerciale d'iridium est de l'ordre 1€/ko. La transmission du fichier d'analyse spectrale et des positions GPS peut donc rapidement s'avérer très couteuse si une attention particulière n'est pas prêtée à l'optimisation de la donnée transmise.

La difficulté était de transmettre un fichier le plus complet possible en prenant un minimum de place. Pour rappel, la taille d'un fichier brut de 56 mn d'acquisition est de 18 000 Ko, la taille de 20 mn de donnée temporelle de l'axe Z seul est de 53 Ko. Le temps de référence pour ce type d'analyse scientifique est de 20 mn. La taille de sa DSP est de 2 Ko.

La difficulté était de transmettre un fichier le plus complet possible en prenant un minimum de place. Même si l'information utile a déjà été largement compressée, ceci ne s'avérait pas suffisant. En effet, nous étions limités par la taille d'un envoi iridium de fichier SBD (Short Burst Data) de 340 octets.

La société Iridium met à disposition deux possibilités d'envoi de données en fonction du besoin.

- La solution RUDICS (Router-Based Unrestricted Digital Internetworking Connectivity Solutions) est prévue pour transférer un grand volume de données. Elle est lourde à mettre en place, relativement coûteuse et la connexion entre le modem et le réseau satellitaire est longue à établir. Ce dernier point s'avère très pénalisant pour nos bouées qui sont sans cesse chahutées par la houle. En effet, elles sont tantôt immergées, tantôt à la surface.
- La solution SBD (Short Burst Data), que nous avons choisie, est la solution la plus simple à utiliser. Elle consiste à envoyer un mail avec un fichier joint de 340 octets maximum sur un serveur distant. Elle a également l'avantage, dans notre cas, d'envoyer le message très rapidement (environ 10ms), rendant ainsi le lien de transmission très robuste.

Nous avons donc choisi de ne transmettre que les paramètres indispensables, à savoir :

- Une information de temps. La solution s'est naturellement tournée vers une datation par timestamp. Le timestamp (Unix) désigne le nombre de secondes écoulé depuis le 1er janvier 1970 à minuit UTC précise [4]. Dans notre cas, son principal intérêt est sa capacité à coder sur 4 octets une information de temps. Après conversion, nous pourrons aisément récupérer une date dans le format suivant : AAAA/MM/JJ HH :MM :SS.
  (Ex : 1467981545 -> 0xE99E7f57 -> 2016-07-08 12:39:05)
- La latitude exprimée en décimal et codée en réel sur 4 octets. (Ex : 0x42416E77 -> 48.357876).

- La longitude exprimée en décimal et codée en réel sur 4 octets. (Ex : 0xC091ED02 -> -4.560182).
- Le spectre de fréquence [0.05 Hz : 0.44 Hz] codé sur 80 échantillons réels de 4 octets. Nous avons choisi de réduire la plage de fréquence pour se concentrer sur les plus basses.

Finalement, le fichier de 332 octets (< 340 octets (*Annexe 11* : fichier d'analyse spectrale)) est stocké sur la µSD avant d'être envoyé par satellite sur une boite mail Ifremer.

4.6 Visualisation à terre du résultat du traitement embarqué

Un fichier binaire possède cet avantage d'être très léger en terme de taille mais a l'inconvénient de ne pas être directement lisible et exploitable par l'utilisateur final.

La réception des mails est faite sur un serveur hébergé sur le site de l'Ifremer Brest.

J'ai donc écrit un script en langage Python pour pouvoir directement visualiser l'information utile (voir *Annexe 14*).

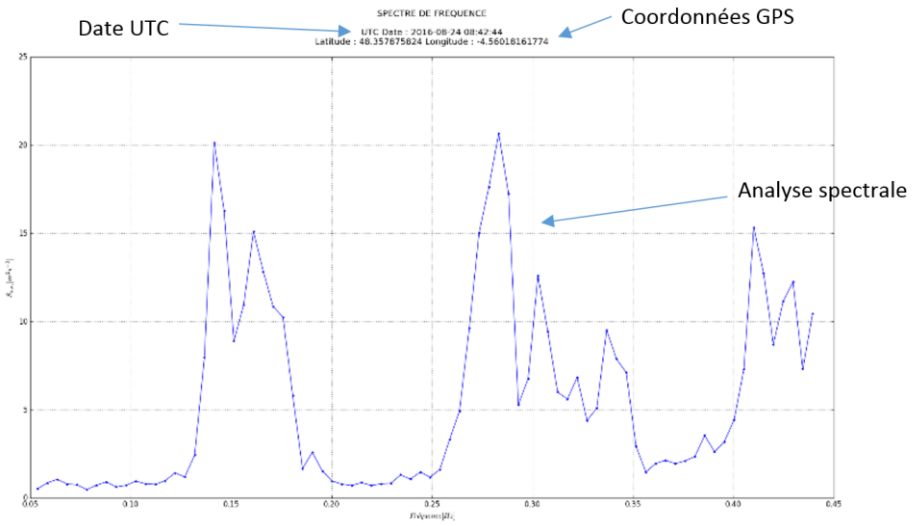


Figure 23: Visualisation de l'analyse spectrale sur boite mail de l'utilisateur

Nous avons sélectionné le langage python pour ce travail pour plusieurs raisons :

- Portabilité du code ;
- Langage open source ;
- Communauté très active ;
- Langage déjà utilisé dans le projet et facilement utilisable dans la chaîne de réception de mail ;
- Exécutable par commande Bourn Shell sur le serveur de réception.

J'ai eu la possibilité, durant cette période de stage, de pouvoir me joindre à une formation de 3 jours « initiation au langage python » dispensée par Tamia formation. Ceci m'a grandement facilité la tâche dans l'apprentissage du langage et la rédaction du programme.

L'utilisateur donc visualise directement l'information sur sa boite mail sans manipulation de fichier, ce qui facilite grandement sa prise décision.

4.7 Intégration d'un GPS avec sortie PPS (Pulse par Seconde)

4.7.1 Synchronisation des bouées

Lors du déploiement de bouées pour quadriller une zone, celles-ci se doivent d'être synchronisées avec la même référence de temps pour que les mesures soient effectuées aux mêmes instants. L'idée est de synchroniser chaque horloge de bouée avec une heure très précise comme celle du GPS (environ 50ns par rapport à l'heure UTC).

La solution que nous avons choisie est d'intégrer un GPS générant un signal PPS (Pulse par Seconde). Un signal PPS est un signal électrique de forme carrée transmettant une information de temps dans un câble. Le front montant est synchronisé sur le début de la seconde du temps UTC (Temps Universel Coordonné), la durée du front montant doit être inférieure à 20 ns, l'amplitude est de 2.8 V avec un niveau bas à 0 V, la durée du pulse est 20 µs et l'impédance de ligne est de 50 Ω [6]. Le point fort du PPS est sa simplicité de mise œuvre.

4.7.2 Configuration du GPS

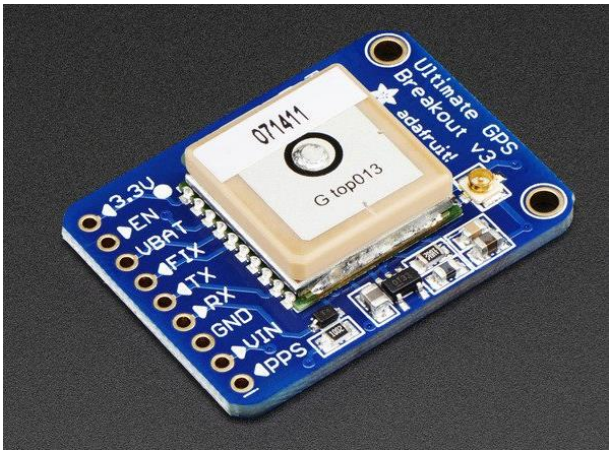


Figure 24 : GPS MTK3339

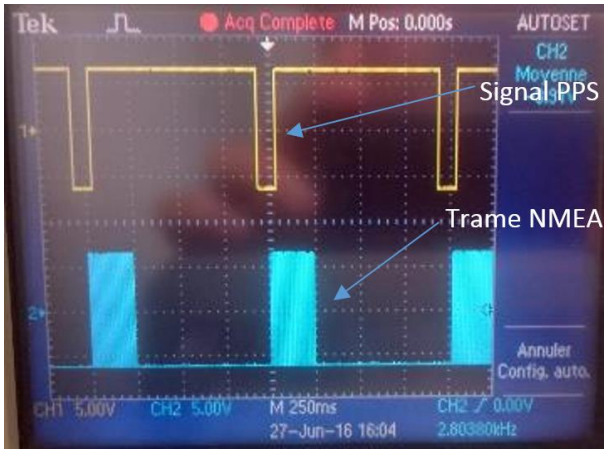


Figure 25 : Trames de sorties du GPS MTK 3339

Notre choix s'est porté sur le GPS commercialisé par Adafruit, le MTK 3339 embarquant la dernière puce de chez Global Top FGPMMOPA6H. Et ceci pour plusieurs raisons :

- Sa grande sensibilité ;
- Ses nombreuses configurations possibles ;
- L'intégration de la puce GPS sur le PCB (Printed Circuit Board) ;
- Une grande communauté active utilisant ce GPS.

La carte SYREDOMY communique en RS232 (Voir *Annexe 12*) contre des niveaux logiques 3.3V pour notre nouveau GPS. Une conversion de niveaux sera donc nécessaire pour réaliser la communication entre les deux cartes. Pour minimiser les temps de développement, nous utiliserons des convertisseurs Pmod232 en stocks ne consommant que 0.4mA @ 3.6V.

La puce GPS de chez GlobalTop est capable de fournir une multitude d'information nécessaire à la navigation. Seule la trame de type RMC (Recommended Minimum sentence C) nous sera utile. Elle regroupe les informations de temps, date, position, vitesse de déplacement

La trame est normalisée de cette manière :

```
$GPRMC,123519,A,4807.038,N,01131.000,E,022.4,084.4,260816,003.1,W*6A
Ou:
     RMC          Recommended Minimum sentence C
     123519       heure UTC: 12:35:19
     A            Status A=active ou V=Void.
     4807.038,N   Latitude 48 deg 07.038' N
     01131.000,E  Longitude 11 deg 31.000' E
     022.4        Vitesse au sol en nœuds
     084.4        Angle en degrés
     260816       Date 26 août 2016
     003.1,W      Déclinaison magnétique en degré
     *6A          Somme de contrôle de parité, un simple OU EXCLUSIF sur
les caractères entre $ et *.
```

Les commandes de configuration du module GPS pour recevoir la trame voulue et la fréquence de rafraîchissement sont envoyées par la carte ALEES à chaque redémarrage.

4.8 Intégration de la centrale inertielle VN100

Fin juillet, une nouvelle centrale inertielle Vector Nav VN-100 rugged a été reçue. Elle correspond parfaitement à nos attentes car elle est de très faible encombrement, robuste, entièrement configurable, de faible consommation et d'un coût raisonnable (~1000€) pour les fonctions réalisées. Un travail de prise en main, d'intégration et d'écriture de fonction en langage C a été réalisé sur notre plateforme pour pouvoir l'utiliser en lieu et place de la centrale IMU SBG (~3500€).

A ce jour, le prototype assemblé sur paillasse fonctionne de la même manière que le précédent montage. Il n'y a aucune manipulation supplémentaire pour l'utilisateur final pour le mettre en œuvre. Pourtant il laisse entrevoir de belles perspectives financières et techniques pour une consommation moindre. Ce prototype intègre une synchronisation des mesures à 10 µs grâce à la sortie PPS du GPS reliée à la broche d'entrée « SYNC_IN » de la centrale inertielle. Cette fonctionnalité permet de caler le déclenchement des mesures sur ce signal temporel précis issu du GPS.

Figure 26 : VN100 rugged

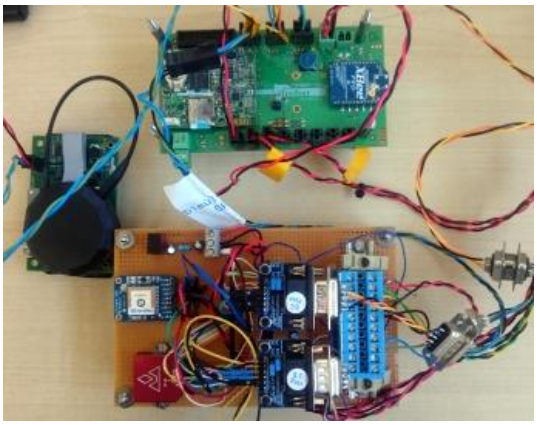


Figure 27 : Prototype fonctionnel

5 TESTS ET VALIDATION

5.1 Test de consommation

Un test de consommation a été effectué en extérieur.

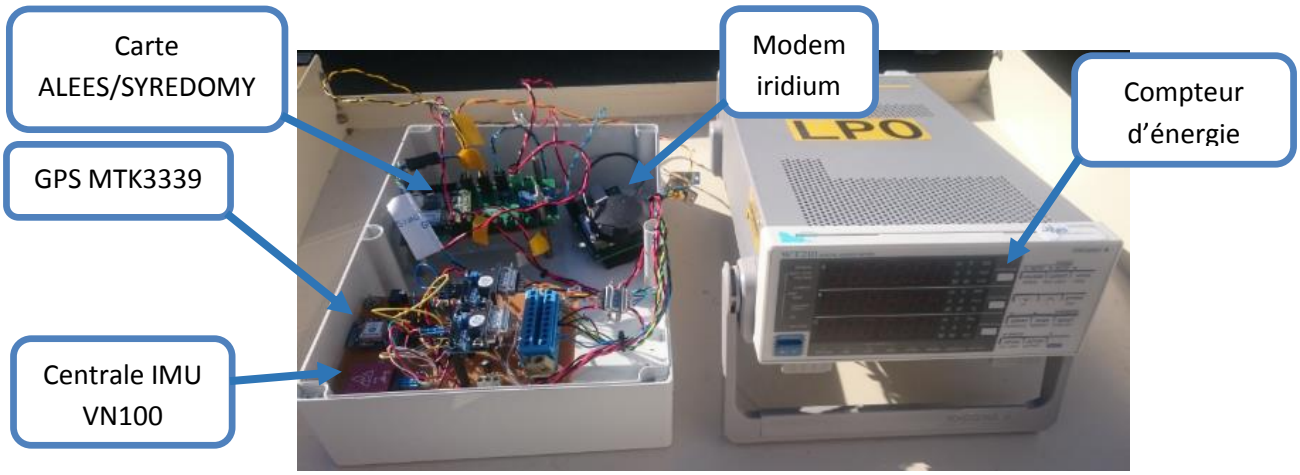


Figure 28: Test de consommation

Les tests sur une durée d'une heure ont montré une consommation d'énergie de 134 mAh @ 7.2V de l'ensemble du dispositif soit une consommation réduite de 10% par rapport au système précédent. Lors d'un déploiement, le système de mesure pourrait être équipé de 4 couples de piles LSH20 en parallèle fournissant 52Ah. Nous pourrions alors espérer atteindre 16 jours d'autonomie dans cet exemple de configuration.

5.2 Campagne de mesures GreenEdge 2016

Figure 29 : Zone de déploiement

Figure 30 : Campagne GreenEdge 2016

La campagne GreenEdge s'est déroulée du 3 juin au 14 juillet 2016 dans la baie de Baffin proche du cercle polaire. Cette mission à bord d'un brise-glace canadien, le NGCC Amundsen, avait pour but d'étudier et de prédire l'évolution du phytoplancton, l'assimilation des nutriments dans l'océan arctique et l'évolution des glaces dans cette zone géographique. Une flotte d'instruments a été déployée pour la mesure de ces paramètres (profileurs, gliders, bouées équipées de thermistance, bouées glace). Les bouées glaces s'inscrivent parfaitement dans ce contexte, elles ont été déployées à plusieurs reprises lors de stations sur la banquise de quelques heures.

5.2.1 Configuration de la bouée glace

Les contraintes de temps de développement étant très importantes, l'électronique de la bouée a été intégrée dans des fûts Curtec à disposition dans le laboratoire. Ils ont l'avantage d'être très légers, de faible encombrement, peu coûteux et étanches pour notre application.

Leur forme cylindrique rend l'intégration mécanique légèrement plus compliqué que des formes cubiques habituelles. Olivier Peden a donc réalisé des supports de carte sur-mesure adaptés au fût à l'aide d'un logiciel de CAO (Conception Assisté par Ordinateur), SolidWorks, et d'une imprimante 3D disponible dans le labo (*Annexe 13*).

Figure 31 : Intégration bouées vagues

Un assemblage 4*2 piles vient alimenter le système, soit une capacité théorique de 52Ah sous 7.2V à 20°C. L'assemblage de piles de technologie « lithium chlorure de Thionyl » demande toutefois une certaine précaution d'utilisation et notamment des protections contre les courants inverses. J'ai donc routé et réalisé une carte de protection à l'aide d'un logiciel de CAO, Altium Designer (voir *Annexe 14*). Outre l'avantage de cette technologie en termes de poids/capacité (100g/13.0Ah), elle est beaucoup plus stable en capacité à des températures de fonctionnement extrêmes que les autres technologies du marché.

Pourtant, un problème de livraison des piles au Canada nous a contraints à revoir notre alimentation du système par des piles alcalines achetées sur place. Les bouées étaient alimentées en 12V par 2 groupes de 6 piles en parallèle.

La centrale inertielle utilisée est de type SBG Ellipse N. Cette dernière est relativement coûteuse (~3500€) mais offre une précision accrue pour la détection de longues périodes de vagues (~10s), elle intègre en interne un filtrage du bruit ambiant.

5.2.2 Déroulement des déploiements

Les bouées ont été déployées par une personne du laboratoire, Claudie Marec, qui ne connaissait pas le projet. Les conditions extrêmes du lieu de mission rendent fastidieux tout support technique à distance. Il a donc été nécessaire de rédiger une documentation détaillée, monter une vidéo d'utilisation des bouées pour qu'il y ait le minimum d'intervention et de manipulation avant le déploiement.

Avant la dépose de l'instrument sur un morceau de banquise flottante, le système doit être alimenté par un petit connecteur de type Molex Microfit. Quelques minutes sont ensuite nécessaires pour le démarrage à froid du GPS afin qu'il acquiert un minimum de 4 satellites. 5 à 10 minutes dans une zone dégagée de tout obstacle suffisent avant de lancer une mission.

Les deux bouées ont été déposées 4 fois sur des périodes de 2 à 3 heures.

Figure 32 : Protocole de mise en route avant déploiement

Figure 33 : Récupération des bouées

5.2.3 Conclusion sur les résultats de la campagne

Les deux bouées ont été déployées 4 fois et aucun souci d'ordre technique n'a été constaté lors des déploiements. L'acquisition de données provenant de la centrale inertielle s'est déroulée de manière nominale. L'envoi de leur position GPS respective toutes les 10 minutes par iridium s'est faite correctement sur la boite mail de réception. A noter tout de même quelques pertes d'une heure dans la réception. Ce problème est certainement dû à la couverture satellitaire du réseau Iridium à ces latitudes.

La valorisation des données scientifiques résultantes sont en cours.

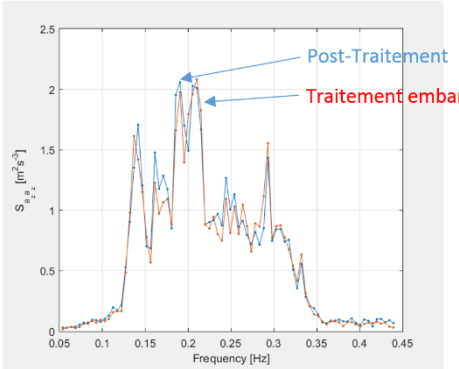


Figure 34 : Traitement embarqué VS post-traitement du 18/06/2016 à 13h58

6 DIFFICULTES RENCONTREES

6.1 Traitement du signal

L'analyse de spectres de vagues est un domaine spécifique de l'analyse spectrale. La mise en place des fonctions pour l'analyse de données a été complexe, les cours de l'UBO (Université de Bretagne Occidentale) m'ont été utiles pour mettre en place les calculs de densité spectrale. Les chercheurs qui étudient les interactions vagues-courant m'ont également aidé à comprendre le post-traitement réalisé et pouvoir le traduire en langage C.

6.2 Programmation

Durant mes 2 premiers mois de stage, j'ai dû approfondir mes connaissances en langage C pour m'imprégner du logiciel embarqué déjà écrit sur notre plateforme. Une fois ce dernier maîtrisé, j'ai pu le faire évoluer et y ajouter les fonctions demandées en toute autonomie.

L'algorithme de réception de la donnée à terre fonctionnant sur un serveur Ifremer est codé en langage Python. Il a fallu prendre connaissance de ce nouveau langage de programmation et se former pour réaliser la mise en forme du résultat.

6.3 Redémarrage non programmé de la carte électronique

Durant la phase de test en endurance, j'ai détecté un redémarrage plus ou moins régulier du système complet (toutes les 4h30 à 5h suivant les tests). Rapidement, j'ai pu localiser la cause autour d'un dépassement de mémoire vive.

D'une manière générale, l'allocation dynamique est à éviter en système embarqué car elle provoque de la fragmentation mémoire. Or l'utilisation de la transformée de Fourier en langage C manipule un grand nombre de tableaux de données nécessitant l'utilisation d'allocation dynamique avec la fonction malloc(). Lors de l'écriture du code, j'ai donc trouvé un compromis en allouant dynamiquement des tableaux de taille identique pour minimiser la fragmentation.

Pour élucider ce problème de redémarrage, il m'a été conseillé d'ajouter des traces, en ajoutant dans le code, la fonction « malloc_stats()». Elle permet de visualiser l'évolution de la RAM au cours de l'exécution du programme et notamment l'utilisation du tas pour détecter des fuites mémoire. Le tas est un emplacement spécifique de la mémoire pour allouer dynamiquement de l'espace mémoire lors de l'exécution de fonctions du type Malloc().

max system bytes	=	135168
system bytes	=	135168
in use bytes	=	3208

Tableau 1 : Résultat de la fonction malloc_stat()

En effet, j'ai pu découvrir une évolution inquiétante de l'indicateur « in use bytes » à chaque séquence et cela, même après avoir isolé la fonction d'analyse spectrale ajoutée.

En poussant le raisonnement, nous avons recherché quelles fonctions faisaient appel à l'allocation dynamique et à notre grande surprise, la fonction malloc() est présente à bien des endroits dans notre logiciel (voir figure 34).

Address	Caller	Instruction	
.text:00002E24	_open_r	BL	malloc
.text:0000DB3A	kf_bfly_generic	BL	malloc
.text:0000DF22	kiss_fft_alloc	BL	malloc
.text:0000E05E	kiss_fft_stride	BL	malloc
.text:0000E14E	kiss_fftr_alloc	BL	malloc
.text:0001515E	gmtime	BL	malloc
.text:00015192	localtime	BL	malloc
.text:00016D66	strtok	BL	malloc
.text:0001AE08	asctime	BL	malloc
.text:0001B5D8	_dtoa_r	BL	malloc
.text:0001C700	_Balloc	BL	malloc
.text:0001C76C	_Bfree	BL	malloc
.text:0001CB04	__pow5mult	BL	malloc
.text:00021006	__register_exitproc	BL	malloc
.text:00021088	__register_exitproc	BL	malloc

Figure 35 : Appel de la fonction malloc() dans le code Mesures vagues

Je n'ai malheureusement pas pu résoudre le problème par manque de temps. Ce problème de redémarrage non programmé de la carte n'est pas bloquant en soit car le microcontrôleur intègre un chien de garde (ou Watchdog) destiné à redémarrer le système, si une action définie n'est pas exécutée dans un délai imparti. De ce fait, nous ne perdons du temps d'acquisition qu'au redémarrage de la carte, c'est à dire environ 50 secondes toutes les 5 heures.

7 LES AMELIORATIONS FUTURES

Pour le moment, les tâches à réaliser par la carte d'acquisition se déroulent de manière séquentielle : acquisition, traitement, envoi iridium. Une parallélisation des tâches permettrait d'optimiser le code en faisant par exemple l'acquisition de l'IMU en parallèle de l'analyse spectrale. De ce fait, nous pourrions acquérir de la donnée en continu.

Un mécanisme d'accès direct à la mémoire (Direct Memory Access, DMA) présent sur notre microcontrôleur placerait le résultat de la conversion dans un tableau d'emplacement prédéfini par l'utilisateur en mémoire sans solliciter le processeur. Nous aurions donc dans notre cas une boucle dans le programme principal qui se contenterait d'exécuter la transformée de Fourier des données contenues dans un tableau et communiquerait le résultat à l'utilisateur, pendant que l'enregistrement des donnée brutes se ferait de manière transparente.

L'application du DMA nous ouvrira de nouvelles perspectives. Une place mémoire plus importante sera alors disponible pour de nouveaux calculs. Aujourd'hui, seul un traitement de l'analyse spectrale est réalisé mais demain avec ces nouvelles ressources disponibles pourquoi ne pas tenter de calculer le spectre de direction des vagues ?

Le but de mon stage était de valider la possibilité de réaliser du traitement embarqué. J'ai choisi de n'envoyer qu'une partie de l'analyse spectrale pour que l'information passe dans un message SBD de 340 octets. Il est possible d'envoyer la DSP sur la plage de fréquence étudiée [0.05 Hz à 2 Hz] soit 2048 octets. Pour se faire, il faudra réaliser des fonctions qui découpent ce fichier de 2048 octets en morceaux de 340 octets et qui le reconstruise à la réception.

D'un point de vue électronique, tout au long de mon stage j'ai pu constater que le principal point bloquant pour le traitement embarqué est la capacité de mémoire RAM disponible. Le remplacement du microcontrôleur par un autre de dernière génération embarquant plus de RAM, ouvrirait d'autres perspectives de traitement.

L'utilisation d'un lien iridium descendant nous permettrait de reconfigurer à distance un certain nombre de paramètres de la bouée (fréquence d'acquisition, mise en veille des capteurs, fréquence d'envoi de position GPS).

Enfin, ce sujet n'a pas été abordé dans ce rapport, la conception mécanique des bouées est également à améliorer:

- Les bouées vagues sont actuellement intégrées dans des sphères en verre étanches Nautilus 10 '' relativement coûteuses. Actuellement, le laboratoire se penche sur cette contrainte de coût pour pouvoir déployer une flotte de bouées plus importante. Des tests de fabrication de sphère en PET (Polytéréphtalate d'éthylène) à l'imprimante 3D sont en cours et plutôt encourageants même s'il persiste quelque problèmes d'étanchéité (annexe 16).
- Les dernières missions en février et en juin dernier nous confirment l'importance de décliner une version de bouée montée sur un drone. Particulièrement pour déposer facilement et sans risque humain les bouées sur de icebergs flottants. Il est donc important de continuer la réflexion sur le vecteur approprié le plus adapté au cahier des charges.

8 CONCLUSION

8.1 Sur le projet

Malgré la validation du prototype par mes prédécesseurs, un nombre importants de tâches étaient à accomplir pendant ces 6 mois. Les priorités ont été rapidement fixées sur la faisabilité du traitement embarqué, tâche non évidente au vu du matériel utilisé. Au fur et à mesure, cette difficulté s'est estompée avec les discussions et les réunions qui ont permis de définir des échéances et d'avancer de manière méthodique sur le projet. Le développement de la bouée dérivante a fait appel à une grande polyvalence :

- En informatique avec le développement logiciel, et le script de visualisation ;
- En électronique avec la mise en place d'un nouveau GPS et l'interfaçage d'une nouvelle centrale IMU.

Le Laboratoire d'océanographie Physique et Spatiale dispose aujourd'hui de 8 bouées dérivantes fonctionnelles qui seront déployées en septembre 2016 pour une campagne de mesure. Cependant, les bouées sont encore à l'état de prototype et des améliorations sont à apporter. Le développement de la bouée dérivante est un projet qui s'étalera sur plusieurs années et d'autres personnes seront amenées à travailler sur celui-ci. Une documentation et une classification ont été mises en œuvre pour que les informations soient accessibles rapidement pour assurer la continuité des développements.

8.2 Sur le plan personnel

Ma formation initiale et mes 10 années d'expériences professionnelles m'ont façonné, au fil des années, un profil plutôt hardware et opérationnel. Le métier de technicien en R&D (Recherche et Développement) en océanographie demande une grande polyvalence. Toutefois, mes principales compétences se tournaient en grande partie dans la conception de carte électronique, dans la CAO et la préparation des campagnes en mer. La reprise d'études avec le master ESCo (Electronique et Système Communicants) en 2014 et ce stage, principalement axé sur le traitement du signal et la programmation m'ont fait totalement sortir de ma zone de confort. Je pense que cette période a été très bénéfique pour moi. Il a fallu me faire violence mais elle m'a permis d'explorer d'autres facettes du métier d'électronicien.

Ce projet a demandé une grande implication, de la polyvalence et des connaissances dans des domaines pointus propres au métier d'ingénieur. Pour l'analyse spectrale des mesures, j'ai approfondi les cours de l'UBO et ainsi pu lier la théorie à la pratique. Le fait de travailler sur un cas concret m'a permis d'acquérir de nombreuses connaissances dans ce domaine. Je suis maintenant capable de les appliquer aux mesures de vagues.

Le fait d'être acteur du projet m'a permis d'être force de proposition lors des discussions autour des problématiques rencontrées.

Je maîtrisais la partie hardware du couple de cartes ALEES/SYREDOMY pour avoir participé à leur développement. Ces 6 mois de stage axés sur leur système embarqué me donne une vision globale de leurs fonctionnements, ce qui me sera très utile lors des futurs développements au sein d'Ifremer.

Ce projet était complet sur de multiples points : la rencontre de personnes expertes dans leur domaine qui m'ont partagé leur savoir, l'utilisation des moyens de hautes technologies, l'acquisition de nouvelles compétences et l'amélioration de certaines connaissances. J'ai le sentiment que toutes les tâches accomplies durant ce projet seront un tremplin pour mon évolution professionnelle.

9 LEXIQUE

Ifremer : Institut **Fr**ançais pour l'**E**xploitation de la **MER**

LOPS : Laboratoire d'Océanographie et de **P**hysique des **O**céans

UMR : Unité **M**ixte de **R**echerche

CNRS : Centre **N**ational de la **R**echerche **S**cientifique

UBO : Université de **B**retagne **O**ccidentale

IRD : Institut de **R**echerche pour le **D**éveloppement

SAR : **S**ynthetic **A**perture **R**adar (radar à synthèse d'ouverture)

IMU : **I**nertial **M**easurement **U**nit

SYREDOMY : SYstème de **RE**cupération de **DO**nnées par **M**essagers h**Y**perfréquence

ALEES : Advanced **L**ow **E**nergy **E**lectronic **S**ystem

RAM : Random **A**ccess **M**emory

IDE : **I**ntegrated **D**evelopment **E**nvironment (Environnement de développement)

I2C : Inter **I**ntegrated **C**ircuit

SPI : Serial **P**rotocol **I**nterface

RDT/I2M : Recherche et **D**éveloppements **T**echnologiques, Service Instrumentation et Ingénierie Marine

GPS : Global **P**ositioning **S**atellite

SBD : Short **B**urst **D**ata

RUDICS : Router-Based **U**nrestricted **D**igital **I**nternetworking **C**onnectivity **S**olutions

NMEA : National **M**arine **E**lectronics **A**ssociation

UART : Universal **A**synchronous **R**eceiver **T**ransmitter

CAO : **C**onception **A**ssistée par **O**rdinateur

ESCo : **E**lectronique et **S**ystèmes **C**ommunicants

UBO : **U**niversité de **B**retagne **O**ccidentale

FFT : Fast **F**ourier **T**ransform

DSP : Densité **S**pectrale de **P**uissance

TFD : **T**ransformée de **F**ourier **D**iscrète

10 TABLE DES REFERENCES

[1]: Ifremer – Michel HAMON – Spécifications Mesures Vagues

[2] : http://jmfriedt.free.fr/fft.pdf

[3] : http://pyageng.mpastell.com/book/spectrum.html

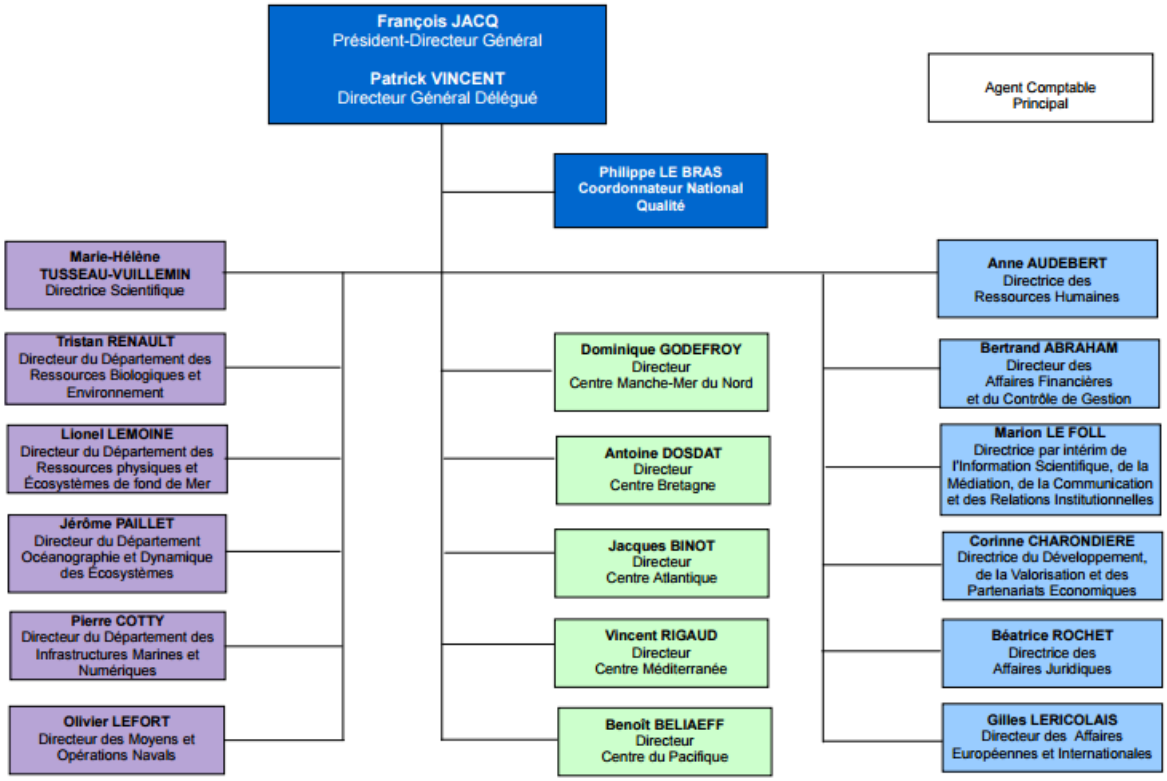
[4]: http://www.timestamp.fr/

[5]: Ellipse Firmware Manual.pdf

[6]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Pulse_par_seconde

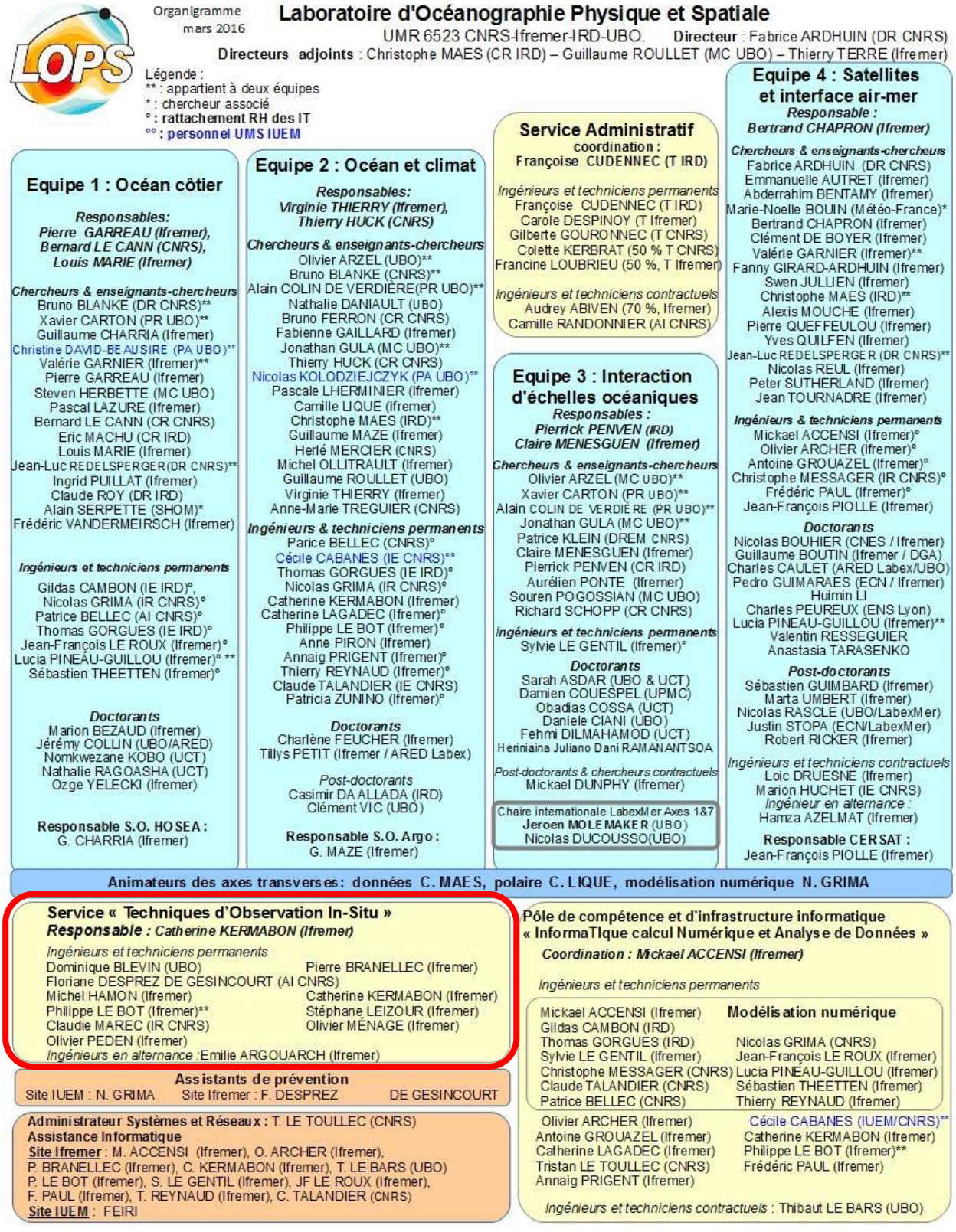
11 ANNEXES

Annexe 1 : Organigramme de l'Ifremer



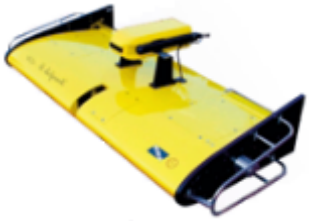
Annexe 2 : Ifremer centre de Brest

Annexe 3 : Organigramme du LPO



Annexe 4 : Systèmes de mesures océanographiques

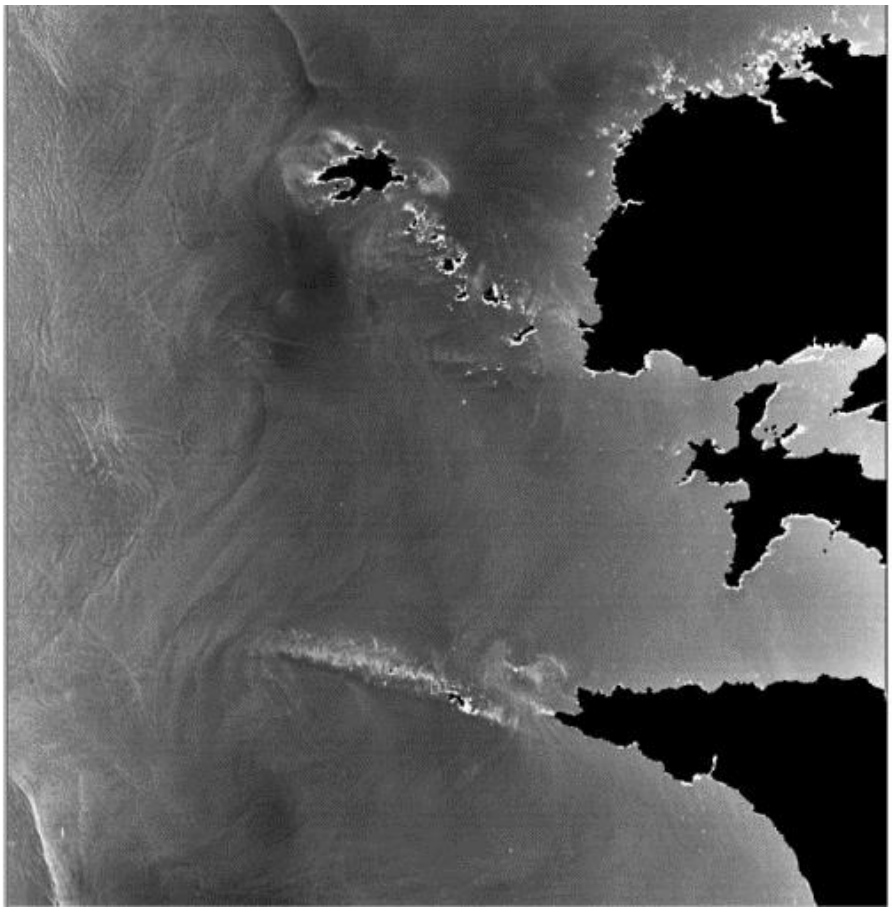
Glider



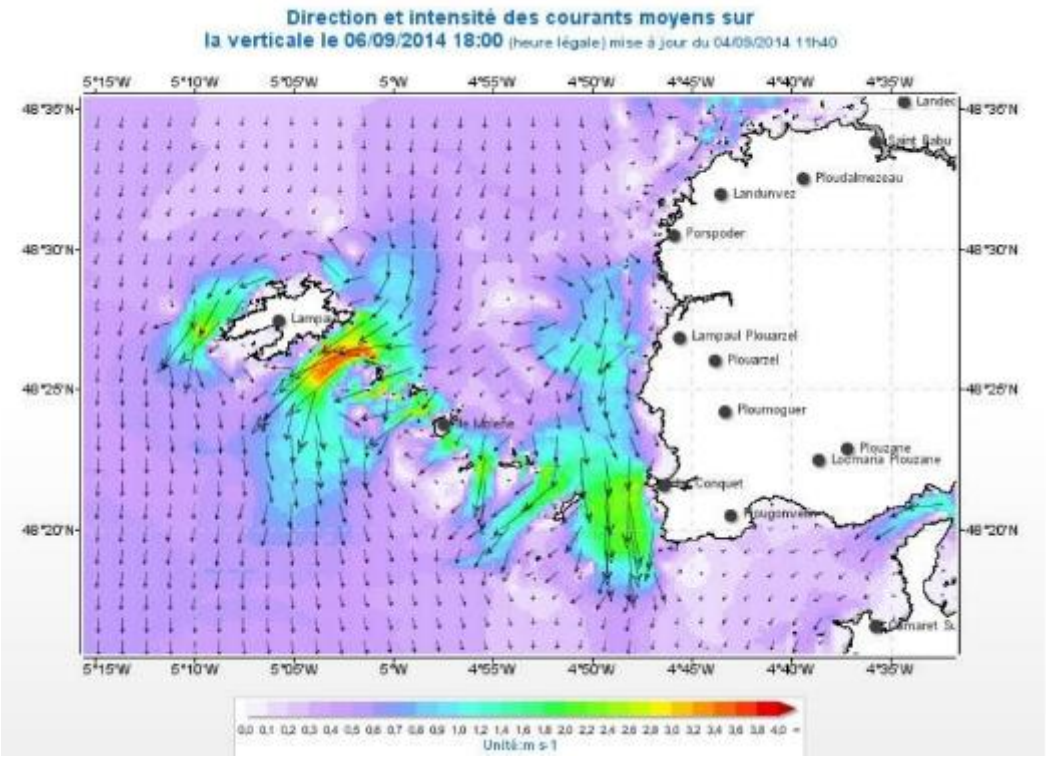
Scanfish

Bathysonde

Annexe 5 : Image SAR de la mer d'Iroise

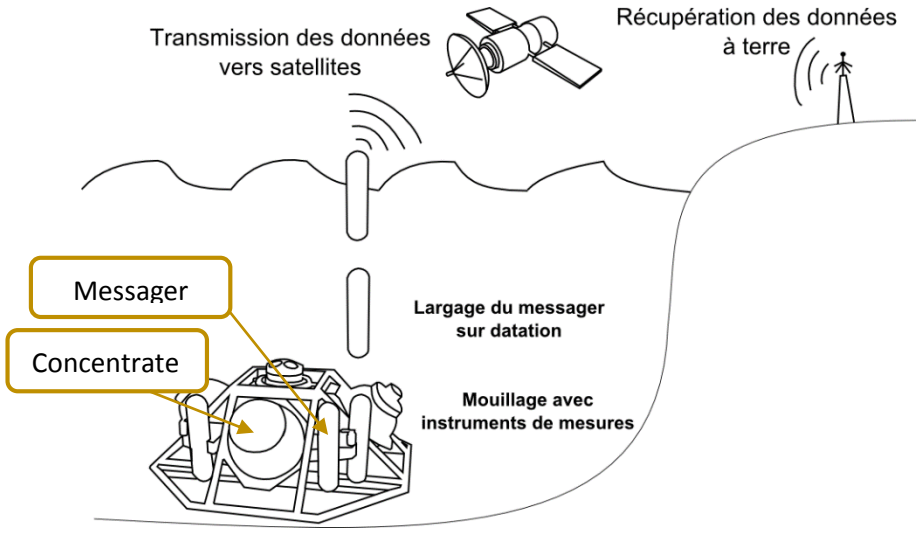


Annexe 6 : Modélisation de la mer d'Iroise



Annexe 7 : Fonctionnement du projet SYREDOMY

Ce projet permet de récupérer les données scientifiques d'un châssis d'instrumentation (ou mouillage) directement à terre sans avoir besoin de récupérer le châssis se situant au fond de la mer. Voici le principe de fonctionnement de ce projet :

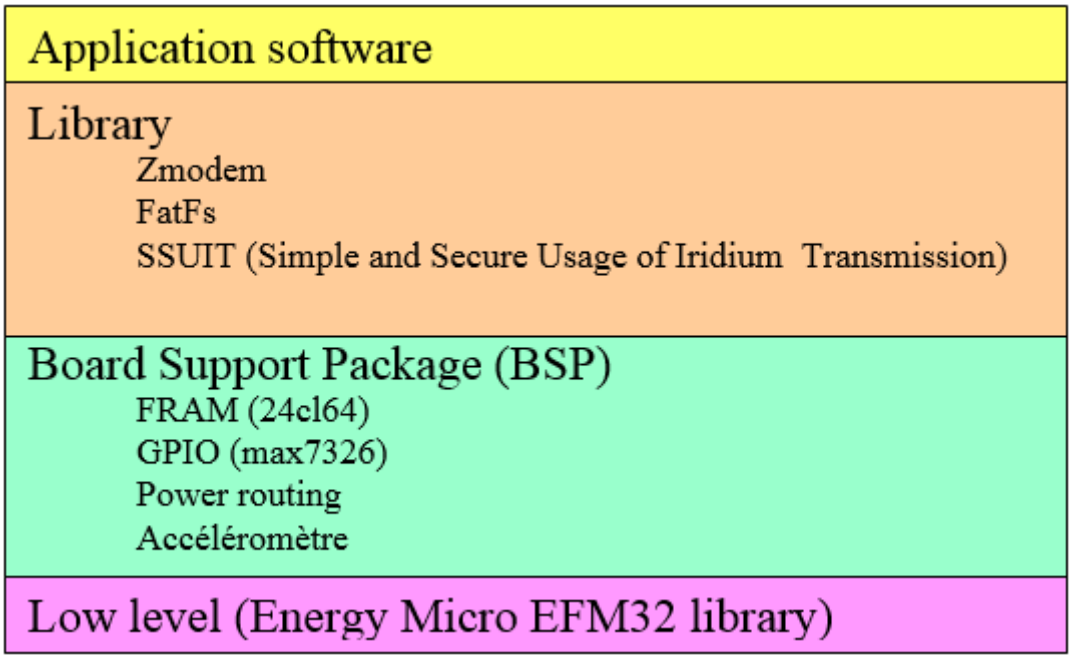


Le système repose sur le fond marin et mesure les caractéristiques physiques de l'océan (vitesse et direction du courant, température, salinité, pression) grâce aux instruments fixés sur le châssis. Les appareils effectuent des mesures régulières qui sont transmises à un concentrateur par liaison filaire. Les données scientifiques enregistrées dans le concentrateur sont ensuite stockées dans des messagers. Le concentrateur communique avec les messagers par un lien hyperfréquence de type ZigBee. Les messagers qui contiennent les données scientifiques sont ensuite largués un à un à une date prédéfinie

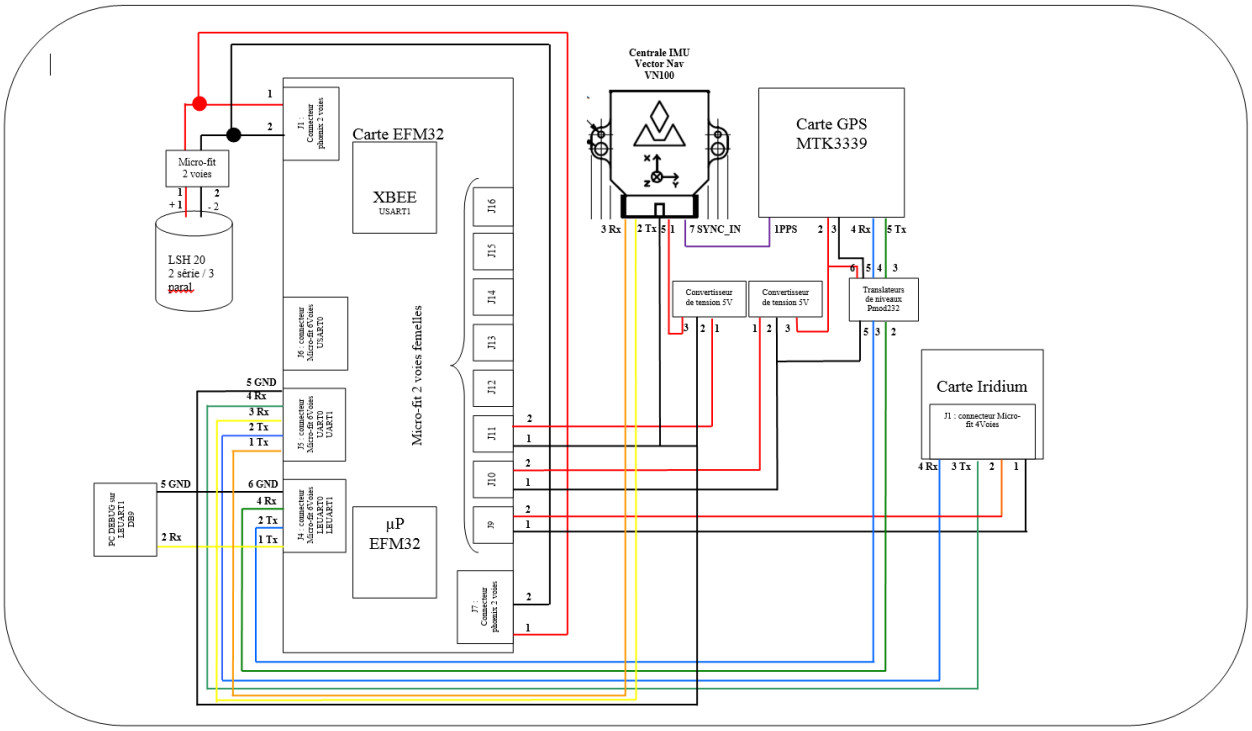
grâce à un système de largage par électro-aimant commandé par le concentrateur. Le messager remonte en surface où il communique ses données à terre grâce à une liaison satellite (réseau Iridium). Les informations sont alors directement transmises au centre.

Annexe 8 : Les différentes couches du logiciel

Source : Michel HAMON – Spécifications_Mesures_Vagues



Annexe 9 : Plan de câblage du système



Annexe 10 : Script de la fonction d'analyse spectrale

```
win_function = 0.5*(1-cos(2*pi*(0:(n_fft-1))'/(n_fft-1))); % hanning window

win_correct_2 = 8/3 ; % 1./mean(win_function.^2);    % 8/3 if hanning

% freq_w = linspace(0,freq_sample/n_fft*(n_fft-1),n_fft)'; % frequency vector
% freq_w = (0:(n_fft-1))'*freq_sample/n_fft;
% freq = freq_w(1:ceil(n_fft/2));

freq = (0:(n_fft/2-1))'*freq_sample/n_fft;

T = (n_fft)/freq_sample;

%%
Sxx_temp_UN = zeros(ceil(n_fft/2),1);

for i_win = 1:n_windows

    ind_start = (i_win-1)*n_fft/2; % index of starting time

    data_x_w = data_x( (ind_start+1):(ind_start+n_fft) ); % select data time period

    somme = sum (data_x_w);
    moyenne = mean(data_x_w);
    data_x_w = data_x_w - moyenne; % remove mean

    data_x_w = data_x_w.*win_function; % apply window

    % Fourier transform
    rx_fft = fft(data_x_w,[],1);
    rx_fft = 1/freq_sample*rx_fft;

    ind_ok = 1:ceil(n_fft/2);

    Sxx_temp_UN = Sxx_temp_UN + conj(rx_fft(ind_ok)).*rx_fft(ind_ok);

end
%%
% Bendat and Piersol, eqn 9.6 (x2 because we are only keeping half the spectra)
correction = win_correct_2/n_windows/T*2;
Sxx = Sxx_temp_UN * correction;
```

Annexe 11 : Fichier issu de l'analyse spectrale embarquée

Timestamp Latitude Longitude

```
e9 9e 7f 57 5a 6e 41 42 0c ee 91 c0 f6 16 bc 38
9d cf 6f 38 f0 e7 8e 38 9a 97 81 38 eb 64 91 38
07 e9 c6 38 91 2d ca 38 40 6d b7 38 16 72 96 38
ee 75 cc 38 6b 09 e9 38 8c 75 91 38 fe 03 54 38
80 b3 fb 38 58 53 20 39 f5 df c7 38 90 9c da 38
66 d0 cf 38 95 f4 ea 38 a1 3c 00 39 1c f4 a3 38
0b 9a 9b 38 e3 d1 ce 38 79 05 16 39 a8 62 23 39
62 04 b9 38 33 9a f6 38 c8 fa e9 38 2f 49 a4 38
8a b0 8c 38 35 6d dd 38 7b 22 02 39 76 c9 df 38
56 20 c7 38 d2 3b e2 38 53 d6 0e 39 23 7d 07 39
0b 75 ed 38 68 f9 15 39 04 f0 e0 38 b9 91 bb 38
76 e8 0a 39 b7 48 01 39 a3 a5 3c 39 09 2d 07 39
da 94 ac 38 ec 28 0c 39 4a ea 01 39 71 d9 ab 38
2d 1a e3 38 e9 71 0d 39 d1 44 e2 38 7c 97 9d 38
f2 47 a7 38 bc df 11 39 ec ec 12 39 63 9e a5 38
71 37 d6 38 99 85 11 39 ce ab df 38 d5 42 ba 38
b9 42 06 39 86 38 a3 38 5a 05 f7 38 8f 40 fd 38
98 87 c9 38 1f d2 b7 38 76 2f 99 38 53 0c f2 38
7a 4a ca 38 14 53 c2 38 06 a7 d9 38 aa 38 a3 38
e8 c6 5d 38 b1 84 a7 38 0b bd 8c 38 6c fc 92 38
3b b0 af 38 13 12 b7 38 93 fa 0b 39
```

Spectre de fréquence

Annexe 12 : protocole de communication RS232

Pour établir une communication effective via RS-232, il est nécessaire de définir le protocole utilisé : notamment, le débit de la transmission, le codage utilisé, le découpage en trame, etc. La norme RS-232 laisse ces points libres, mais en pratique on utilise souvent des UART qui découpent le flux en trames d'un caractère ainsi constituées :

- 1 bit de départ ;
- 7 à 8 bit de données ;
- 1 bit de parité optionnel ;
- 1 ou 2 bits d'arrêt.

Le bit de départ a un niveau logique "0" tandis que le bit d'arrêt est de niveau logique "1". Le bit de donnée de poids faible est envoyé en premier suivi des autres.

La spécification RS-232 prescrit des débits inférieurs à 20 000 bit/s. Cependant, les débits utilisés en pratique varient entre 75 bit/s et 115 200 bit/s.

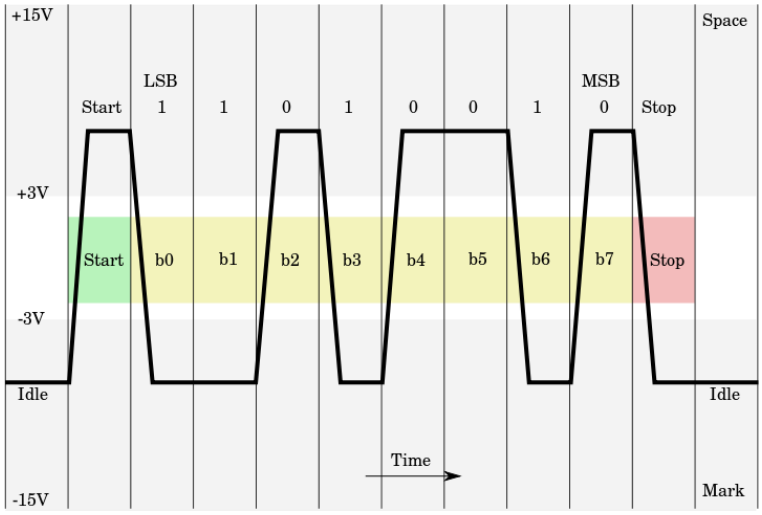
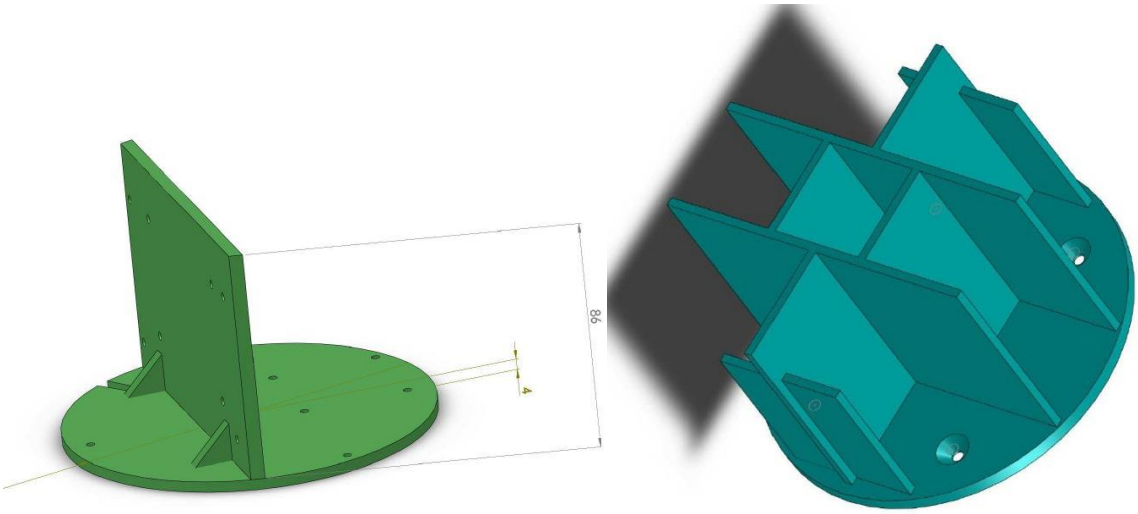
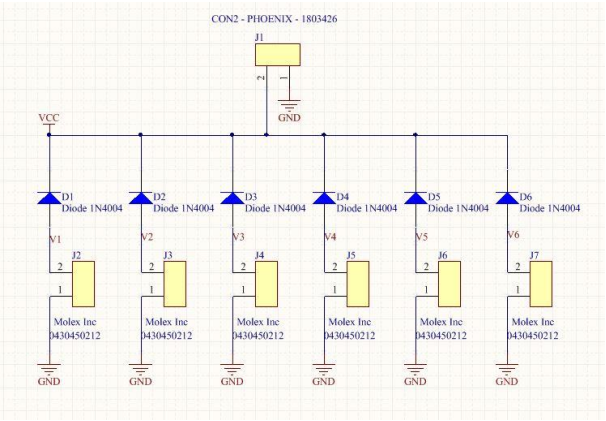


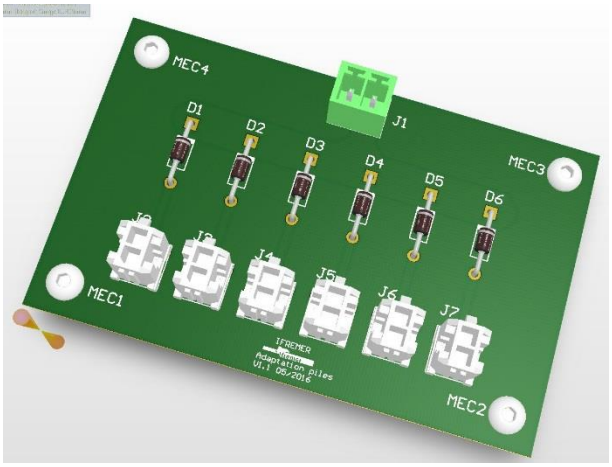
Figure 36 : Oscillogramme de la transmission du caractère K (01001011), avec un bit de start et un bit de stop [8]

Annexe 13 : Support de carte et support de piles réalisés à l'imprimante 3D



Annexe 14 : Carte de protection de piles.





Annexe 15 : Script Python pour mise en forme du fichier d'analyse spectrale reçue

```
# -*- coding: utf-8 -*-

import struct
import matplotlib.pyplot as plt
from datetime import datetime
import numpy as np

# calcul du vecteur fréquence
n_fft = 1024.0
freq_sample = 5.0
debut_freq = 1./20
fin_freq  = 0.44
pas = freq_sample/n_fft

freq = np.arange(0,n_fft/2-1,pas)
freq_ok = []
for i in freq:
    if (i >= debut_freq) and (i <= fin_freq):
        freq_ok.append(i)

f=open("300234010560720_000654.sbd","rb")# ouverture fichier

#lecture et extraction d'info
struct_data=""
n_result = 80
for i in range(n_result):
    struct_data=struct_data+"f"
s=struct.Struct("<Lff")
Ensemble_Time_Position=f.read(12)
Time_Position= s.unpack(Ensemble_Time_Position)

# formatage du time_stamp
Time_timestamp=Time_Position[0]
UTCDATE = datetime.utcfromtimestamp(Time_timestamp)
print ("Date ISO : {}".format(UTCDATE))

# formatage des données GPS
Latitude=Time_Position[1]
Longitude=Time_Position[2]
print ("Latitude : {}".format(Latitude))
print ("Longitude : {}".format(Longitude))
Ensemble_spectre=f.read(320)
f.close()

# plot du spectre de fréquence
s=struct.Struct("<"+struct_data)
spectre=s.unpack(Ensemble_spectre)
fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(freq_ok,spectre,'.-')
ax.grid(True)
plt.xlabel(u'$Fréquence [Hz]$')
plt.ylabel(ur'$S_{a_za_z} [m^2s^{-3}]$')
plt.title("SPECTRE DE FREQUENCE\n"
          "\n"
          "UTC Date : {}\n"
          "Latitude : {} Longitude :
{}\n".format(UTCDATE,Latitude,Longitude))

plt.show() #rend visible les graphiques
```

Annexe 16 : Pièces réalisés à l'imprimante 3D et assemblées

PRIGENT Sébastien

« Evolution d'un système d'analyse de l'état de surface de mer »

Rapport de stage de fin d'études
Master Professionnel ESCo – BREST 2015-2016

Résumé :

Le Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS) de l'Ifremer souhaite mettre au point une bouée dérivante qui permettra d'effectuer des mesures d'états de mer. Cette bouée aura pour objectif l'étude des interactions entre le courant marin et les vagues. Elle sera principalement déployée au large de Brest mais pourra aussi être déployée dans tout type d'endroit en mer selon l'intérêt scientifique. Les bouées de mesure existantes sont pour la plupart amarrées et ne permettent pas d'effectuer les mesures souhaitées.
L'étude des mouvements de surface océanique sera faite au moyen d'une centrale d'attitude et d'un GPS. La centrale d'attitude permettra la connaissance des mouvements de la bouée et le GPS permettra de connaitre les mouvements de cette bouée par rapport à la terre, cela grâce aux données qu'il délivre (Position géographique, direction et vitesse).
Le groupe technique du LOPS a un prototype fonctionnel que l'on fera évoluer pour lui apporter des fonctionnalités supplémentaires comme du traitement du signal en embarqué.

Abstract:

The Ifremer "Spatial and Physical Oceanography Laboratory" has to develop a drifting buoy which would enable measures of sea states. The aim is to study interactions between the marine current and waves. The buoy will be mainly deployed off the Brest coast but can also be put in other places where there is a scientific interest. This is a brand new concept because most existing measuring buoys are moored and they do not permit to measure the requested parameters.
The sea states study will be performed using both an IMU central and a GPS. The IMU central and the GPS will provide information on the buoy's movements and on the buoy's movement relative to the earth, respectively. This is made possible by generated data (geographic position, direction and speed).
The technical team possesses initial equipment which allowed to perform initial tests. Then, the developed prototype will be improved in order to bring additional features as onboard signal processing.

Mots clés : Bouée vagues, traitement embarqué, FFT, analyse spectrale, centrale inertielle, synchronisation temporelle

Keywords: waves buoys, embedded processing, FFT, embedded processing, IMU (Inertial Measurement Unit), time synchronization