

PROJET DE FIN D'ETUDES :  
DEVELOPPEMENT D'UNE BOUEE DERIVANTE POUR  
MESURES DE VAGUES



**Pierre THOMAS** : FIPA promotion 2015 – option Systèmes Embarqués

Projet de fin d'études effectué du 16/02/15 au 31/08/15

Tuteur d'apprentissage IFREMER : Thierry TERRE

Tuteur ENSTA Bretagne: Yvon GALLOU

**IFREMER**

Laboratoire de physique des océans

ZI pointe du diable

29280 PLOUZANE



## REMERCIEMENTS

Je remercie mon maître d'apprentissage, Mr Thierry TERRE, de m'avoir suivi pendant ces trois années. Il m'a donné de bons conseils lorsque j'en avais besoin et m'a transmis une partie de ses connaissances techniques.

Je tiens tout particulièrement à remercier Mr Fabrice ARDHUIN et Mr Mickaël ACCENSI pour m'avoir proposé ce projet de fin d'études. Le développement de la bouée dérivante m'a demandé une grande implication et de la polyvalence, j'ai beaucoup appris.

Je souhaite remercier Mr Michel HAMON pour l'explication des techniques utilisées au sein du projet SYREDOMY, pour l'aide en programmation et en électronique en général.

Je remercie également Mr Olivier PEDEN de m'avoir expliqué différents aspects de la mécanique en océanographie, pour avoir fabriqué les pièces nécessaires à l'avancement du projet et pour les bons moments passés au bureau.

Je veux également témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes :

- Sébastien CHALONY, Jérémy OHANA et Alan TASSIN pour leurs explications sur le fonctionnement des matériels d'essais (hexapode, bassin), pour avoir été présent lors des tests et pour leur aide dans l'analyse des données.
- Louis MARIE, Alexey MIRONOV et Alan TASSIN pour m'avoir aidé à effectuer l'analyse spectrale des données et pour m'avoir transmis leurs connaissances.
- Michel REPECAUD et Loïc QUEMENER pour avoir permis le premier déploiement de la bouée dérivante.
- Stéphane LEIZOUR, Floriane DESPREZ DE GESINCOURT et le groupe technique du LPO pour leur sympathie.

Je voudrais aussi remercier Mr Olivier MENAGE d'entretenir la collaboration entre l'Ifremer et l'ENSTA Bretagne et de m'avoir permis l'utilisation du matériel de l'ENSTA Bretagne au cours du projet de fin d'études.

Je tiens à montrer toute mon affection aux personnes travaillant au Laboratoire de Physique des Océans pour leur sympathie, leur soutien technique et humain.

Je remercie également Mr Yvon GALLOU, mon tuteur école, pour avoir suivi mon évolution à l'ENSTA Bretagne et au sein de l'Ifremer.

Enfin, je remercie l'équipe pédagogique de l'ENSTA Bretagne pour m'avoir transmis le savoir nécessaire au métier d'ingénieur.



## RESUME

Le Laboratoire de Physique des Océans (LPO) 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. Le choix de développer ce système de mesure très peu répandu a été fait car 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'un accéléromètre et d'un GPS. L'accéléromètre permettra la connaissance des mouvements de la bouée et le GPS permettra de connaître 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 LPO possède du matériel qui sera utilisé pour les premiers essais. Nous pourrons ainsi enregistrer les premières données et faire avancer le projet de bouée dérivante plus rapidement.

## ABSTRACT

The « Laboratoire de Physique des Océans » of the Ifremer institute wishes to develop a drifting buoy which allows the measuring of the state of the sea. The buoy's goal is to study interactions between the current speed and waves. It will essentially be deployed off the coast of Brest but can also be deployed in all kinds of places in the sea depending on what is needed. This is a brand new product because most existing measurement buoys are moored.

The study of the sea state will be performed using an accelerometer and a GPS. The accelerometer will provide information about the buoy's movements and the GPS will let us know about the movement of the buoy relative to the earth. This is made possible by referencing data on geographic position, direction and relative speed.

The technical team has equipment to perform initial tests. These tests will enable the team to gather preliminary data which in turn will help the project to progress more quickly.

## SOMMAIRE

INTRODUCTION .....	7
I. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE.....	8
I.1 Présentation générale de l'IFREMER .....	8
I.2 Le Centre de Brest.....	9
I.3 Le Laboratoire de Physique des Océans .....	9
I.4 L'équipe technique du LPO .....	10
II. BOUEE DERIVANTE POUR MESURES DE VAGUES.....	11
II.1 Contexte.....	11
II.2 Cahier des charges .....	12
II.3 Moyens à disposition .....	16
II.4 Organisation et démarches de travail.....	19
III. FONCTIONNEMENT ET CONFIGURATION DU SYSTEME .....	21
III.1 Fonctionnement de l'accéléromètre .....	21
III.2 Configuration de l'accéléromètre .....	22
III.3 Enregistrement des données sur la carte µSD.....	23
III.4 Achat d'un magnétomètre/boussole.....	23
IV. TESTS, ANALYSE DE DONNEES ET VALIDATION DU PROTOTYPE.....	24
IV.1 Essais sur le positionneur hexapode.....	24
IV.2 Premières données en mer.....	31
IV.3 Essais au bassin .....	35
IV.4 Test de consommation .....	41
IV.5 Campagne de mesures sur la côte Atlantique française .....	42
IV.6 Campagne de mesures en mer d'Iroise .....	44
V. REFLEXIONS ET CONCEPTION MECANIQUE .....	46
V.1 Rappel du cahier des charges .....	46
V.2 Réflexions sur différents types de bouées.....	46
V.3 Solutions techniques retenues .....	48
V.4 Conception de la bouée .....	49
V.5 Fabrication de la bouée .....	50
VI. DIFFICULTES RENCONTREES.....	51
VI.1 Programmation en langage Python .....	51
VI.2 Tests sur l'hexapode et au bassin à houle .....	51
VI.3 Analyse et validation des données .....	51
VI.4 Imprimante 3D.....	51
VII. LES AMELIORATIONS FUTURES .....	52
VII.1 Synchronisation des bouées .....	52
VII.2 Compas magnétique .....	52
VII.3 Calcul des spectres.....	52
VII.4 Essai du nouveau prototype en imprimante 3D.....	52
VII.5 Electronique.....	52
VIII. CONCLUSION .....	53
VIII.1 Sur le projet .....	53
VIII.2 Sur le plan personnel .....	53
IX. LEXIQUE .....	55
X. TABLE DES REFERENCES .....	56

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : implantation de l'Ifremer (source : Ifremer) .....	8
Figure 2 : zones de déploiement en octobre 2015.....	11
Figure 3 : diagramme de contexte de la bouée dérivante .....	12
Figure 4 : diagramme pieuvre .....	13
Figure 5 : diagramme FAST de FP1.....	14
Figure 6 : diagramme FAST de FP2.....	14
Figure 7 : diagramme FAST de FP3.....	14
Figure 8 : architecture physique.....	15
Figure 9 : carte ALEES vue de dessus.....	16
Figure 10 : carte ALEES vue de dessous .....	16
Figure 11 : carte SYREDOMY .....	17
Figure 12 : carte GPS .....	17
Figure 13 : carte adaptation modem Iridium .....	17
Figure 14 : sphère en verre .....	18
Figure 15 : planning réel du projet de fin d'études.....	20
Figure 16 : principe de fonctionnement d'un accéléromètre MEMS [1] .....	21
Figure 17 : magnétomètre boussole [2].....	23
Figure 18 : le positionneur hexapode.....	24
Figure 19 : partie mesure et partie création du logiciel « Symétrie ».....	24
Figure 20 : meilleure configuration trouvée pour les tests.....	25
Figure 21 : dérivées première et seconde du positionnement de l'hexapode .....	25
Figure 22 : mesure ST LIS3DH ; hexapode avec amplitude = +200mm ; fréquence=0.6Hz .....	26
Figure 23 : mesure du ST LIS3DH, test avec amplitude=200mm ; fréquence=0.8Hz .....	28
Figure 24 : intérieur de la bouée et orientation des axes de l'accéléromètre.....	31
Figure 25 : bouée prête à déployer.....	31
Figure 26 : trajet de la bouée entre 13h21 et 13h41 .....	31
Figure 27 : mesure des accélérations sur l'axe vertical (axe de la houle).....	32
Figure 28 : spectre d'accélérations .....	32
Figure 29 : spectre d'élévation de la houle .....	33
Figure 30 : hauteur significative de la houle .....	33
Figure 31 : spectres d'accélérations lors de la mesure du niveau de bruit.....	34
Figure 32 : vue globale d'un essai .....	35
Figure 33 : 1 <sup>ère</sup> , 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> configuration.....	36
Figure 34 : étalonnage des caméras.....	36
Figure 35 : fonction de transfert pour les houles régulières (échelle linéaire).....	39
Figure 36 : fonction de transfert pour les houles régulières (échelle logarithmique) .....	39
Figure 37 : câblage du test de consommation .....	41
Figure 38 : configuration de la bouée .....	42
Figure 39 : spectre d'élévation du deuxième déploiement .....	42
Figure 40 : zone de déploiement et tracé GPS de la bouée .....	44
Figure 41 : mesure de la bouée dérivante .....	44
Figure 42 : bouée "Pierres Noires" .....	45
Figure 43 : comparaison des spectres d'élévation en échelle linéaire et logarithmique.....	45
Figure 44 : différentes vues de la demi-sphère inférieure.....	49
Figure 45 : différentes vues de la demi-sphère supérieure .....	49
Figure 46 : différentes vues de l'assemblage .....	50



Tableau 1 : les tests effectués sur l'hexapode .....	28
Tableau 2 : valeurs efficaces des différents capteurs .....	29
Tableau 3 : valeurs de l'amplitude de la fondamentale .....	29
Tableau 4 : bruit moyen basses et hautes fréquences.....	30
Tableau 5 : paramètres des essais pour houle régulière avec ancrage .....	37
Tableau 6 : paramètres des spectres « Jonswap » pour houle irrégulière avec ancrage .....	37
Tableau 7 : paramètres des essais pour houle régulière sans ancrage (dérive) .....	37
Tableau 8 : effet de la dérive en pilonnement .....	38
Tableau 9 : fonction de transfert.....	40
Tableau 10 : synthèse des résultats .....	42
Tableau 11 : comparaison des bouées à disposition.....	47
Tableau 12 : synthèse des coûts [5] .....	47



## INTRODUCTION

Au cours de la formation d'ingénieur par alternance (FIPA) à l'ENSTA Bretagne, les étudiants alternent pendant 3 ans entre séquences académiques et séquences professionnelles. Des alternances d'environ deux mois sont effectuées pendant les deux premières années. Pour la dernière année, il y a deux périodes de 6 mois, la dernière étant consacrée au projet de fin d'études.

Le projet de fin d'études est un projet mené par l'étudiant ingénieur dans un établissement industriel ou de recherche. Le projet doit avoir un intérêt indéniable pour l'entreprise d'accueil et ne doit pas se résoudre à une seule facette du métier d'ingénieur. Le projet de bouée dérivante pour mesures de vagues s'inscrit tout à fait dans l'intérêt de l'Ifremer et fait appel à de la polyvalence (gestion de projet, programmation, tests, validations techniques, intégration système, reporting)

Mes trois années d'apprentissage et le projet de fin d'études ont été effectués à l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) au centre Bretagne à Plouzané.

Dans ce rapport, je présente le travail réalisé pendant mon projet de fin d'études. Je montre les différentes étapes mises en place pour mener à bien le prototype de bouée dérivante. J'explique les choix effectués pour réaliser un système répondant au cahier des charges. Je dévoile les différents tests entrepris pour valider les composants de la bouée. Je parle aussi des difficultés rencontrées et des méthodes pour arriver à les surmonter.

## I. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

### I.1 Présentation générale de l'IFREMER

L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER est né en 1984 par la fusion de deux organismes, le [CNEOX](#) (Centre National pour l'Exploitation des Océans) et l'[ISTPM](#) (Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes).

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. (MAAF)
- 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 et conforter les capacités et connaissances acquises de chacun mais également de simplifier les procédures de l'institut. Les départements de l'Ifremer sont les suivants :

- Ressources Biologiques et Environnement (RBE)
- Ressources physiques et Écosystèmes de fond de Mer (REM)
- Océanographie et Dynamique des Écosystèmes (ODE)
- Infrastructures Marines et Numériques (IMN)

## 1.2 Le Centre de Brest

Le Centre de Brest (*Annexe 2 : Ifremer centre de Brest*) est situé au technopôle Brest-Iroise à Plouzané. Il gère et anime les équipes d'Ifremer basées en Bretagne. Ce site est le plus grand centre d'IFREMER, en taille (45 000 m<sup>2</sup>) et en personnel (700 salariés permanents). Le centre de Brest 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.

D'autres organismes de recherche sont également présents sur le site : la direction de l'IPEV (Institut Polaire Français Paul-Émile Victor), le centre de Bretagne de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), le laboratoire de Pathologies des poissons de l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments), une unité du CNRS, la composante océan de la Division Technique de l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers du Centre National de la Recherche Scientifique). 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.

## 1.3 Le Laboratoire de Physique des Océans

Le Laboratoire de Physique des Océans (LPO) est une UMR (Unité Mixte de Recherche) sous la tutelle de quatre instituts : CNRS, IFREMER, IRD et UBO. Il fait partie du département « Océanographie et Dynamique des Écosystèmes » (ODE). En tant qu'unité de recherche, le LPO 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 trois équipes de recherche (*Annexe 3: organigramme du LPO*) 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, ADCP, etc. Ces instruments à la pointe de la technologie permettent de mesurer les principaux constituants physiques des océans comme : le vecteur vitesse du courant, la conductivité, la température et 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 pouvoir prédire l'évolution de la circulation océanique et les changements climatiques.

La composante de soutien intègre une équipe technique (ou groupe technique) dans laquelle je travaille (*Annexe 3 encadré en rouge sur l'organigramme*). Nous veillons à mettre à disposition des projets scientifiques, les techniques de mesure en accord avec l'état de l'art, de mettre en œuvre ces techniques lors de campagnes et d'assurer la validation et la qualification des données.



#### *1.4 L'équipe technique du LPO*

L'équipe technique se compose de 8 ingénieurs (mécanique, électronique, chimie, systèmes embarqués et informatique) et 3 techniciens (instrumentation scientifique, techniques expérimentales, programmation). Autour de ce groupe s'ajoute chaque année de un à trois accueils temporaires (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. Cela 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, nous disposons d'un large spectre d'outils en mécanique et électronique.

## II. BOUEE DERIVANTE POUR MESURES DE VAGUES

### II.1 Contexte

Les chercheurs du LPO qui étudient les interactions entre vagues-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 LPO met en œuvre tout type de mouillages ou châssis instrumentés mais ne dispose pas actuellement d'un moyen simple à déployer pouvant faire des mesures d'états de mer. Aujourd'hui, il existe des bouées effectuant des mesures en mer mais celles-ci ne permettent pas d'effectuer les mesures recherchées. En effet, la plupart sont amarrées, cela ne permet pas d'être déployé facilement sur un front de courant dont l'emplacement varie en fonction de la marée. De plus, les bouées existantes sur étagère sont trop chères (plusieurs dizaines de milliers d'euros) et leur grande taille (diamètre supérieur à 70 cm) rend impossible la mesure de petites vagues. Le développement d'une bouée dérivante serait un bon moyen pour répondre à cette problématique scientifique. La collaboration entre les chercheurs et le groupe technique du LPO m'a donné l'opportunité de travailler sur ce tout nouveau système de mesure très peu répandu.

L'étude des mouvements de surface océanique sera faite au moyen d'un accéléromètre et d'un GPS. L'accéléromètre permettra la connaissance des mouvements de la bouée et le GPS permettra de connaître les déplacements de cette bouée par rapport à la terre, cela grâce aux données qu'il délivre (position géographique, direction et vitesse).

Une campagne en mer est prévue en octobre 2015 pour déployer plusieurs bouées dérivantes au large de Brest. Les déploiements s'effectueront sur 3 zones : le front d'Ouessant, le passage du Fromveur et le chenal du Four.

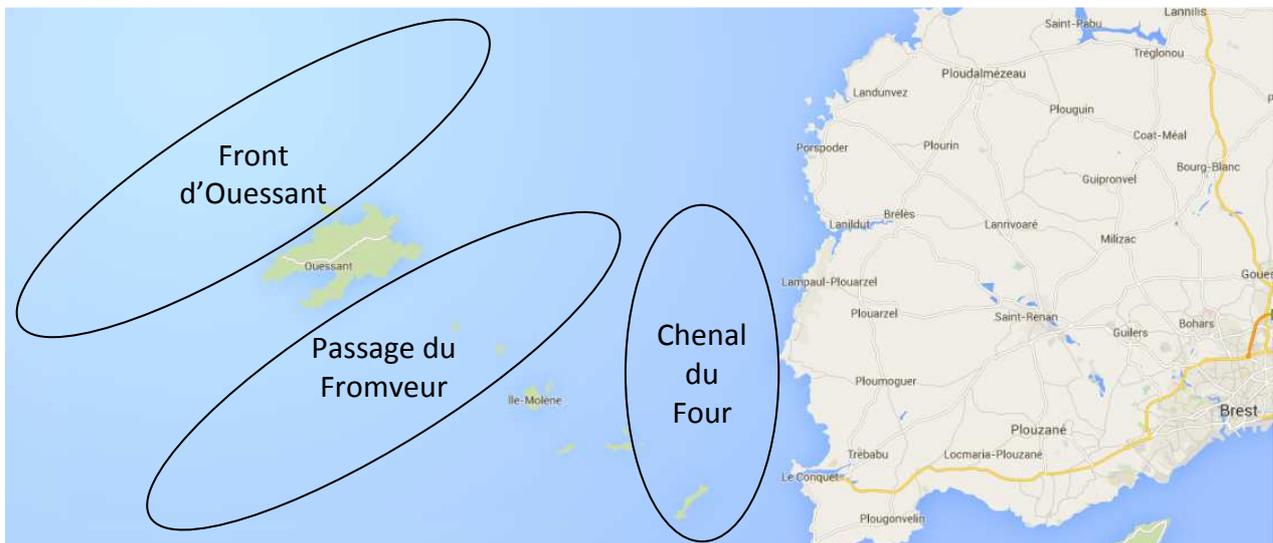


Figure 2 : zones de déploiement en octobre 2015

Ces 3 zones intéressent les chercheurs car il y a de fortes variations de courant (vitesse et direction) avec 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 (*Annexe 5 : image SAR de la mer d'Iroise*) et des modèles numériques d'hydrodynamique et de propagation de vagues forcés par des données satellitaires (*Annexe 6 : modélisation numérique du courant de la mer d'Iroise*).

Les bouées dérivantes fourniront des données in-situ avec une haute résolution. Elles quadrilleront les différentes zones, cela permettra une meilleure interprétation des données SAR et une meilleure modélisation des interactions vagues-courant.

## II.2 Cahier des charges

Le cahier des charges a été établi à partir du diagramme de contexte ci-dessous :

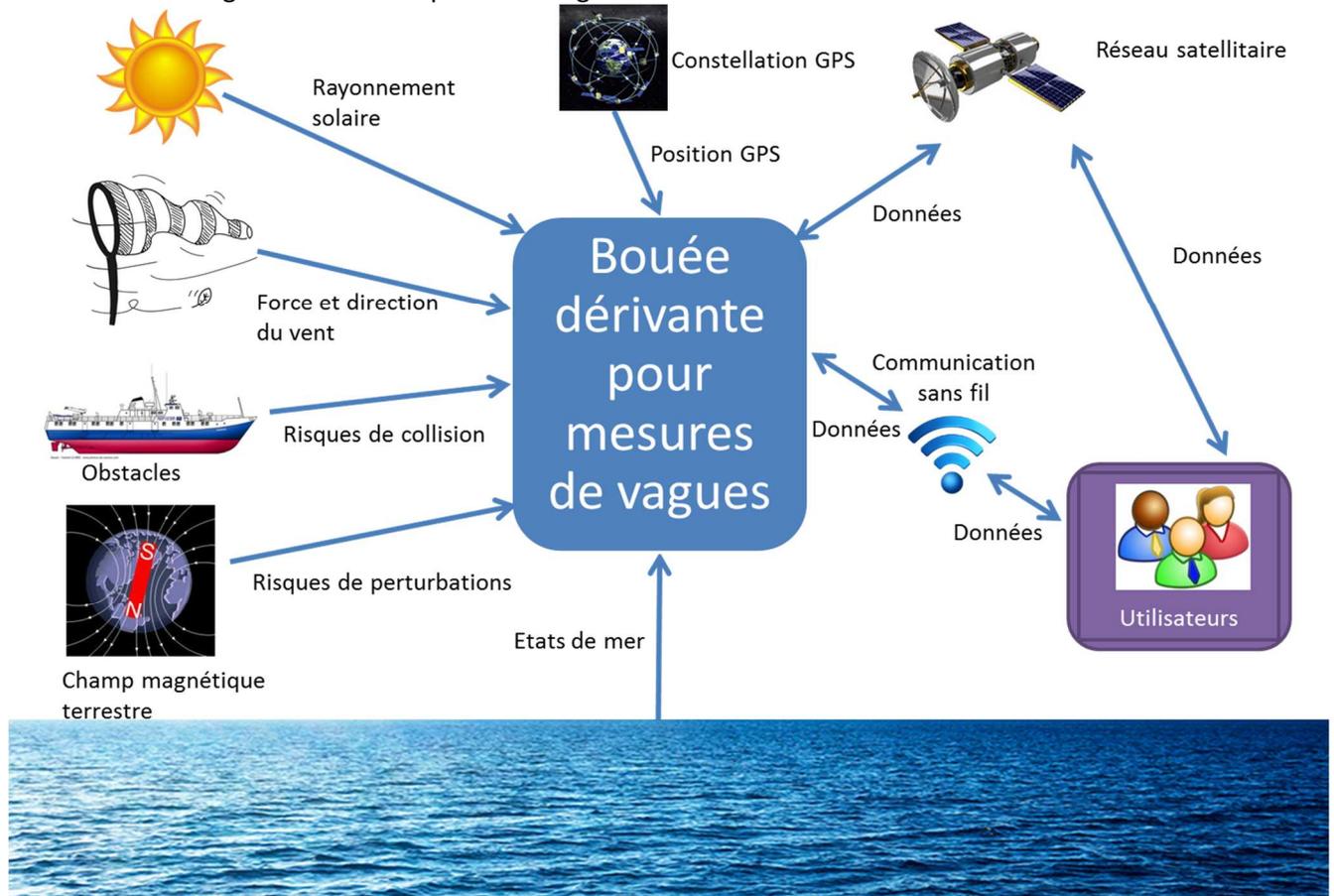


Figure 3 : diagramme de contexte de la bouée dérivante

Le diagramme de contexte ci-dessus présente l'environnement extérieur en contact avec le système (« bouée dérivante pour mesures de vagues »). Nous observons les différents « acteurs » à prendre en compte pour l'élaboration de l'analyse fonctionnelle. Nous distinguons des éléments naturels tels que le soleil, le vent, le champ magnétique et les états de mer. Des éléments matériels sont également présents comme le réseau satellitaire, la constellation GPS, le système de communication sans fil et les obstacles. Enfin nous avons des acteurs humains, les utilisateurs, qui communiqueront avec la bouée.

La méthode APTE (APplication aux Techniques d'Entreprise) avec une approche descendante (top-down) a été utilisée pour décomposer le système. C'est-à-dire que nous débutons avec la base du projet pour arriver à des éléments de plus en plus détaillés. Ici, nous partons d'une vision globale du projet, établissons ensuite les fonctions du système et allons jusqu'aux composants physiques. L'analyse fonctionnelle a été établie grâce au diagramme de contexte, on retrouve en premier lieu le diagramme pieuvre en Figure 4.

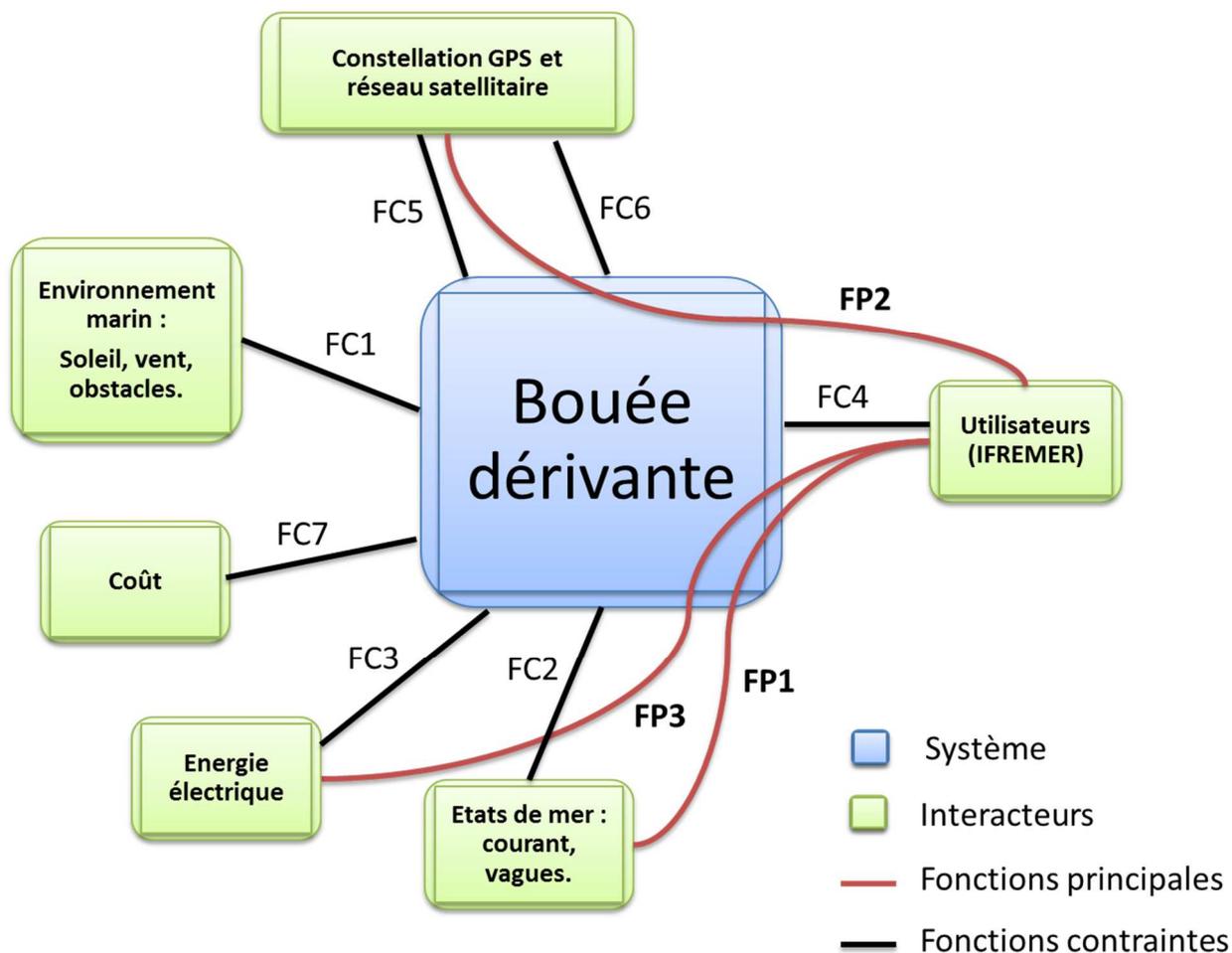


Figure 4 : diagramme pieuvre

**Fonctions principales :**

- FP1 : Réaliser des acquisitions
- FP2 : Transmettre/recevoir des données
- FP3 : Gérer la consommation

**Fonctions contraintes :**

- FC1 : Résister à l'environnement
- FC2 : Epouser la forme de la houle
- FC3 : Economiser l'énergie
- FC4 : Avoir une utilisation et un déploiement simples
- FC5 : Laisser passer les ondes électromagnétiques
- FC6 : Synchroniser les horloges des bouées
- FC7 : Le coût doit être inférieur à 1k€

Dans la continuité de l'approche top/Down, le raffinement des fonctions a ensuite été réalisé à partir du diagramme pieuvre. Les diagrammes FAST (Function Analysis System Technique) ci-dessous illustrent ce raffinement :

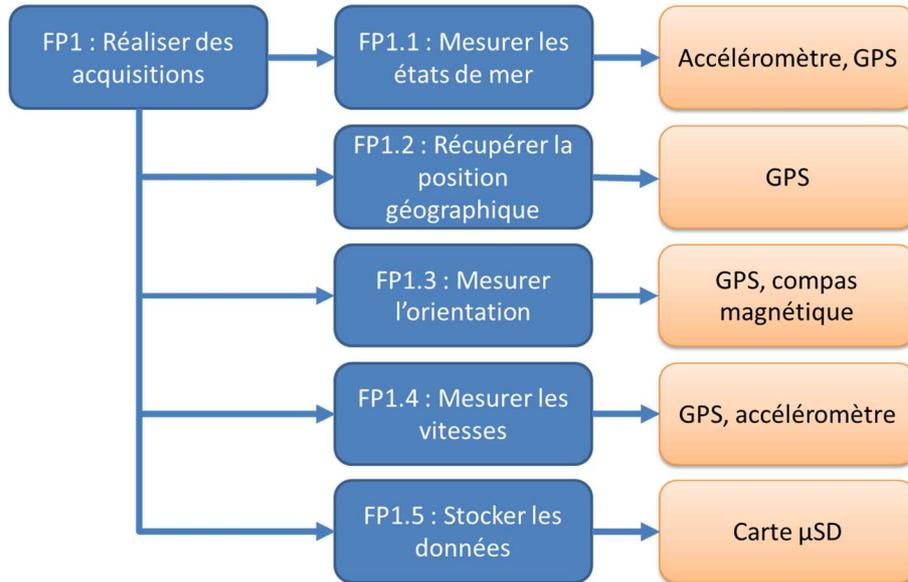


Figure 5 : diagramme FAST de FP1

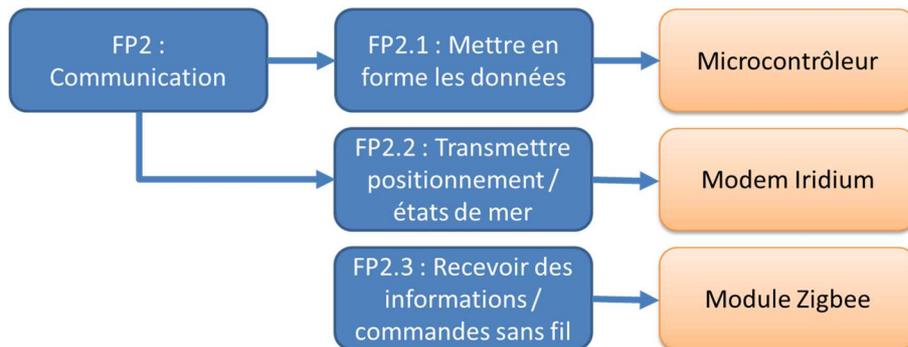


Figure 6 : diagramme FAST de FP2

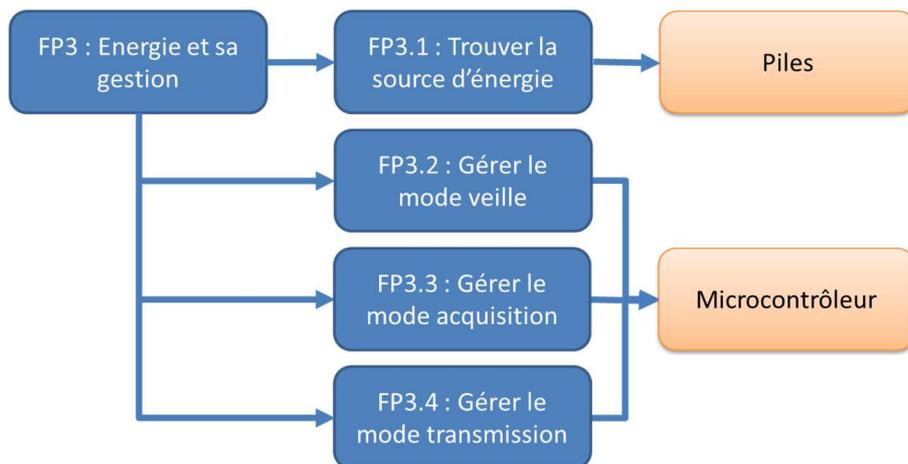


Figure 7 : diagramme FAST de FP3

Chaque fonction raffinée est rattachée à un composant physique permettant de satisfaire la fonction. Par exemple la fonction FP1.1 (mesurer les états de mer) aura comme composant un accéléromètre.

Dans un premier temps, la bouée dérivante pour mesures de vagues sera basée sur un projet déjà existant et maîtrisé par le laboratoire, le projet SYREDOMY (SYstème de REcupération de DONnées par Messenger hYperfréquence). J'ai utilisé les parties matérielles et logicielles de ce projet (*Partie II.3 : Moyens à dispositions*), le principe de fonctionnement de ce projet est en *Annexe 7*. Le fait de disposer de matériels déjà fonctionnels a permis de réutiliser des solutions technologiques répondant à nos besoins. Nous avons alors avancé plus rapidement dans le développement du premier prototype de bouée.

A partir des fonctions raffinées et du projet SYREDOMY, une architecture physique a été élaborée, la voici ci-dessous :

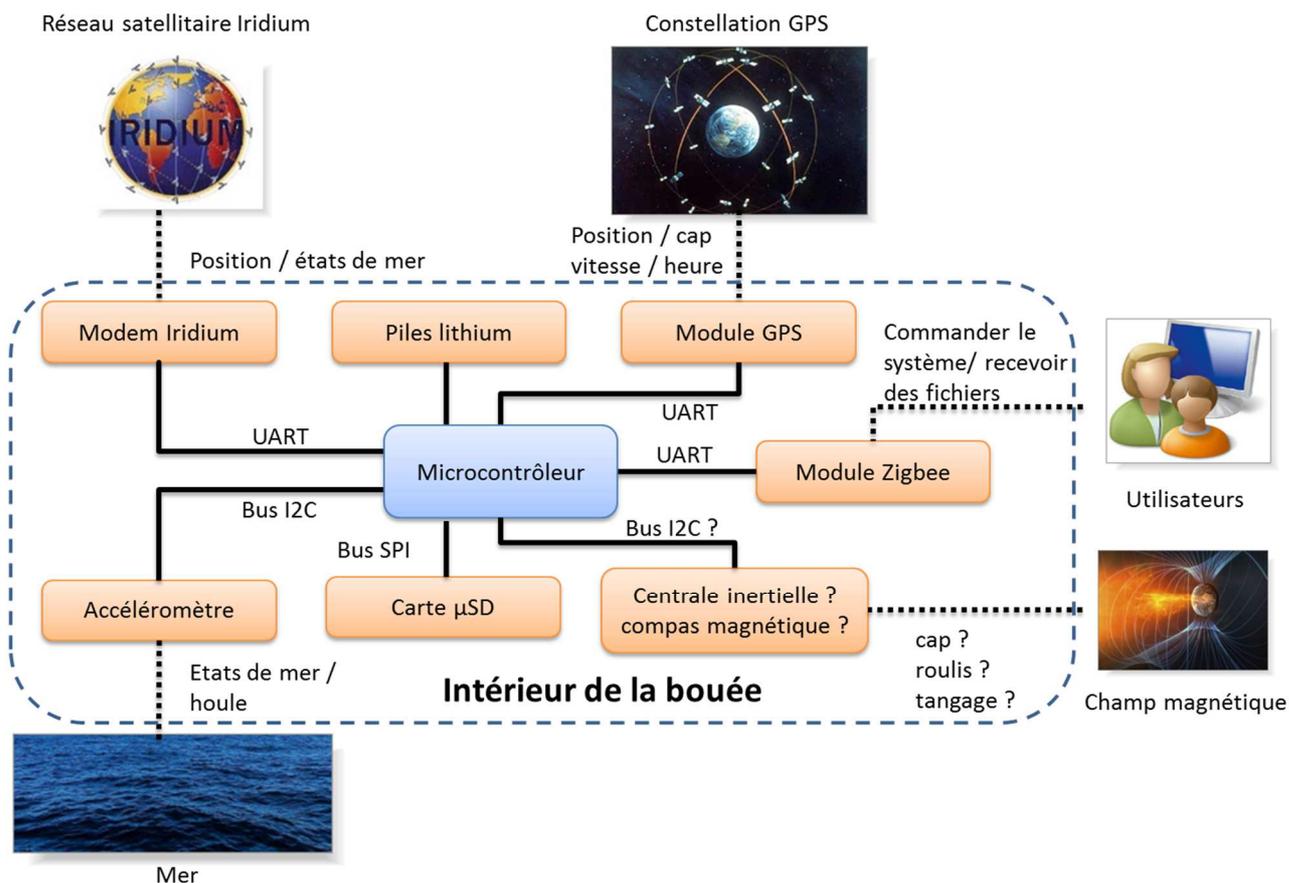


Figure 8 : architecture physique

L'accéléromètre et le module GPS seront les composants principaux de ce projet puisqu'ils fourniront les informations sur les états de mer grâce aux mouvements de la bouée et son déplacement. Mais ce projet étant novateur et très peu répandu, des limitations matérielles peuvent être rencontrées lors de la conception et des déploiements, il est possible qu'il soit nécessaire d'intégrer des composants supplémentaires pour améliorer la précision des mesures (plage de fréquence, bruit, sensibilité). Un compas magnétique ou une centrale inertielle améliorerait ces caractéristiques mais le système complet devra respecter la contrainte « coût » et être inférieur à 1K€.

Un ordre de grandeur a été établi pour les caractéristiques du système et ses mesures, il faudra se rapprocher au maximum de ses contraintes :

- L'accéléromètre doit pouvoir mesurer des vagues ayant des périodes entre 0.5 secondes et 20 secondes, soit une gamme de fréquence entre 2Hz et 0.05Hz.
- Le système devra avoir une autonomie de 15 jours pour le déploiement en octobre 2015.
- Les coordonnées GPS devront être transmises par satellite toutes les 10 minutes

### II.3 Moyens à disposition

Comme expliqué en partie II.2, les matériels utilisés sont déjà existants et maîtrisés par le groupe technique.

#### Moyens matériels

Le matériel utilisé pour le premier prototype est le suivant :

➤ 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 par le service Electronique, Informatique et Mesure in-situ (EIM) 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. Voici la carte électronique en *Figure 9 et 10*.



Figure 9 : carte ALEES vue de dessus

Description des ressources matérielles de la carte ALEES :

- 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 reel RTC (Real Time Clock)
- USB
- Périphériques ultra faible consommation



Figure 10 : carte ALEES vue de dessous

L'accéléromètre ST LIS3SH implanté sur la carte ALEES (*encadré sur la Figure 10*) permet de mesurer les accélérations sur les trois axes (X, Y, Z). Les informations transitent entre le  $\mu$ contrôleur et l'accéléromètre de la carte ALEES par l'intermédiaire d'un bus I2C (Inter Integrated Circuit). C'est un accéléromètre basse consommation (entre 2 et 6  $\mu$ A sous une tension de 2,5 V et selon la fréquence d'échantillonnage). L'échelle des accélérations est programmable de 2 à 16 g ( $1g=9,81m/s^2$ ). Ce composant permet aussi de détecter 6 positions de l'accéléromètre. Il dispose également d'un bus SPI mais ce bus n'est pas utilisé car celui-ci est câblé avec le bus I2C de la carte ALEES.

➤ Carte électronique SYREDOMY :

La carte SYREDOMY sera connectée à la carte ALEES (carte microcontrôleur), on peut voir les connecteurs qui accueillent la carte ALEES sur la *Figure 11* (encadrés en rouge).

Elle nous permettra :

- De communiquer et de commander le système à distance grâce à une liaison sans fil de type Zigbee.
- D'alimenter et de communiquer avec les cartes GPS et IRIDIUM grâce aux sorties de puissance et aux liaisons séries.



Figure 11 : 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. Il faudra modifier le programme de la bouée dérivante pour transmettre la position avec un modem IRIDIUM (*Figure 13 : carte adaptation modem Iridium*) au lieu d'un modem ARGOS ayant une couverture temporelle et spatiale moindre. Le modem Iridium transmettra la position sur une boîte mail, nous pourrons ainsi retrouver la bouée en mer en temps réel à condition d'avoir un accès à la messagerie.



Figure 12 : carte GPS

➤ Carte électronique permettant de transférer des données par satellite

Le modem IRIDIUM implanté sur cette carte communiquera la position GPS de notre système afin de le retrouver aisément en mer.



Figure 13 : carte adaptation modem Iridium

➤ Logiciel

Nous disposons du logiciel complet du projet SYREDOMY. Les différentes couches, les bibliothèques 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 à la bouée dérivante. Les outils de développement utilisés sont :

- Compilateur langage C GCC
- IDE Eclipse
- JLINK JTAG debugger

- Sphère en verre de 10 pouces

La sphère en verre est habituellement utilisée en grande profondeur (de 4000 jusqu'à 10000 mètres) et coûte chère (800 €), elle n'est pas destinée à être utilisée pour la bouée dérivante à long terme. Elle a été utilisée lors des essais pour fixer les cartes électroniques, le bloc batterie et les antennes (Xbee, GPS, Iridium). Nous pourrions ainsi valider les mesures des différents matériels en déployant le système en mer.



Figure 14 : sphère en verre

Le plan de câblage des matériels ci-dessus est en *Annexe 9 : plan de câblage du système*

Pour exploiter ce matériel, je dispose de l'IDE (Integrated Development Environment) Eclipse pour programmer les cartes électroniques en langage C ainsi que l'IDE Spyder pour l'analyse des données en langage Python. J'ai aussi à ma disposition un ordinateur portable pour effectuer des tests en dehors du bureau. Le groupe technique a en sa possession un compteur d'énergie qui me sera utile pour analyser la consommation du système.

En dehors du groupe technique, l'Ifremer dispose de moyens d'essais pour effectuer des tests dans des conditions contrôlées :

- Positionneur hexapode (plateforme mobile à 6 vérins)
- Bassin à houle
- Caisson de pression

### Moyens humains

Ce projet est complexe et des questions se posent dans de nombreux domaines (électronique, mécanique, hydrodynamique, traitement du signal, analyse de données). J'ai fait appel aux personnes ayant de l'expertise dans ces domaines mais aussi à mes connaissances. Le groupe technique m'a mis en relation avec différentes personnes qui m'ont donné des conseils pour le développement de cette bouée.

Au cours de ce projet, plusieurs moyens d'essais ont été utilisés. L'accès au positionneur hexapode (*Partie IV.1 Essais sur le positionneur hexapode*) a été possible grâce au « Laboratoire Comportement des Structures en Mer ». Ce même laboratoire nous a aussi donné l'opportunité d'utiliser le bassin à houle (*Partie IV.3 Essais au bassin*).

Nous avons aussi fait appel au « Laboratoire Détection, Capteurs et Mesures » avec lequel nous avons enregistré les premières données in-situ (*Partie IV.2 Premières données en mer*). Les résultats de cette mise à l'eau ont été utiles pour la compréhension et la validation du matériel.

### Moyens financiers

Le projet de fin d'études s'inscrit dans le projet IGALTI (InfraGravity waves and satellite ALTImetry). Il est financé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) à hauteur de 20k€ hors taxes.

Lors de mon arrivée, 22 packs de cartes électroniques comprenant les cartes ALEES, SYREDOMY et IRIDIUM avaient été commandés pour le projet de bouée dérivante. Cela pour un montant hors taxes de 370€/pack (8140€). Pour la partie mécanique, 5 sphères Nautilus avec leurs équipements ont été achetées pour un coût global de 5000 € hors taxes.

## II.4 Organisation et démarches de travail

Le travail réalisé pour ce projet est principalement une étude de faisabilité des mesures de vagues par l'accéléromètre implanté sur la carte ALEES (*Partie IV*). L'étude et la conception mécanique de la bouée ont aussi été réalisées (*Partie V*).

A mon arrivée au laboratoire au mois de février, 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 priorités ont été mises sur la validation des mesures de l'accéléromètre. En effet, c'est le composant principal du projet et s'il ne répond pas au cahier des charges, il faudra penser à une autre solution comme changer de composant ou alors concevoir une carte électronique dédiée à la mesure de vagues.

Pour la campagne d'expérimentation d'octobre 2015, 5 bouées doivent être prêtes à déployer. Les tâches ci-dessous ont été réalisées pour atteindre cet objectif. Je détaille le déroulement de ces tâches :

1) Développement du code pour l'analyse des données : les mesures de l'accéléromètre et du GPS ont été analysées grâce au langage Python. J'ai eu besoin de l'aide de personnes expérimentées dans ces domaines pendant les premiers mois du projet pour apprendre ce langage.

2) Essais sur l'hexapode de l'Ifremer et analyse des données : la préparation de cet essai a demandé une discussion préalable avec les demandeurs du projet pour l'établissement de la liste des tests. En parallèle, j'étais en relation avec le « Laboratoire Comportement des Structures en Mer » pour anticiper la fixation des capteurs sur l'hexapode et comprendre le fonctionnement de celui-ci. L'analyse des données a été complexe à mettre en place, il fallait se poser les bonnes questions pour pouvoir quantifier les mesures et effectuer une analyse spectrale sur celles-ci. J'étais en relation avec les chercheurs en océanographie physique et le groupe technique lorsque je rencontrais des difficultés. Les mesures effectuées sur l'hexapode étaient satisfaisantes pour continuer l'étude de faisabilité. Des tests supplémentaires ont dû être mis en place.

3) Analyse des données du premier déploiement en mer : pendant l'analyse des mesures faites sur l'hexapode, un chercheur m'a proposé son aide dans l'analyse du premier déploiement en mer. Le premier spectre de vague a été fourni par la bouée dérivante mais nous ne savions pas si ce spectre représentait l'état de mer réel. Ce déploiement a aussi permis la vérification du fonctionnement global du système (position GPS, mesure des accélérations). C'est à l'issue de ce test que nous avons plus de convictions quant à la faisabilité du système.

4) Réflexions sur la mécanique et l'hydrodynamisme de la bouée : la forme de la bouée et le poids de celle-ci vont influencer les mesures du système complet. Une étude a été faite avant la conception de celle-ci en comparant les bouées à notre disposition au laboratoire.

5) CAO (Conception Assistée par Ordinateur) de la bouée : la bouée a été conçue en autonomie, j'ai utilisé mes connaissances en dessin technique. Par contre, j'ai eu besoin de l'expertise du groupe technique pour les cotations/tolérances à respecter.

6) Essai au bassin à houle de l’Ifremer et analyse des données : des discussions avec le personnel du bassin ont été nécessaires pour la préparation de la maquette. Je suis allé sur place pour comprendre le déroulement de l’essai et définir le matériel nécessaire. Le groupe technique et le personnel du bassin ont ensuite préparé la maquette. L’analyse des données s’est faite en collaboration avec le « Laboratoire Comportement des Structures en Mer », j’étais plus autonome que pour les précédents essais. Cet essai a permis de connaître la réponse du système dans différents types de houle et son comportement hydrodynamique.

7) Test de consommation et dimensionnement des piles avant les essais en mer : ce test a été fait pour anticiper la première campagne en mer. L’utilisation du compteur d’énergie du groupe technique était un avantage, l’autonomie du système a été calculée rapidement.

8) Première campagne de mesures en mer et analyse des données : J’ai participé à une campagne de 3 jours en mer pour déployer la bouée dérivante pour mesures de vagues. Nous avons préparé la bouée pour qu’elle se rapproche au maximum de la configuration pour la campagne d’octobre. Les différents déploiements de cette campagne ont permis la mesure de différents états de mer.

9) Fabrication d’un premier prototype de bouée par imprimante 3D : L’utilisation novatrice d’une imprimante 3D a permis la fabrication d’un prototype. Par manque d’expertise sur cette technologie, du temps a été nécessaire pour comprendre le fonctionnement de la machine et ses différents réglages avant de lancer une première fabrication.

10) Campagne en mer d’Iroise et analyse de la mesure : une mesure en mer non loin de la bouée de mesure « Pierres Noires » a été faite. La comparaison des données de houle (hauteur et période) de cette bouée amarrée avec la bouée dérivante a permis la validation des mesures du prototype.

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

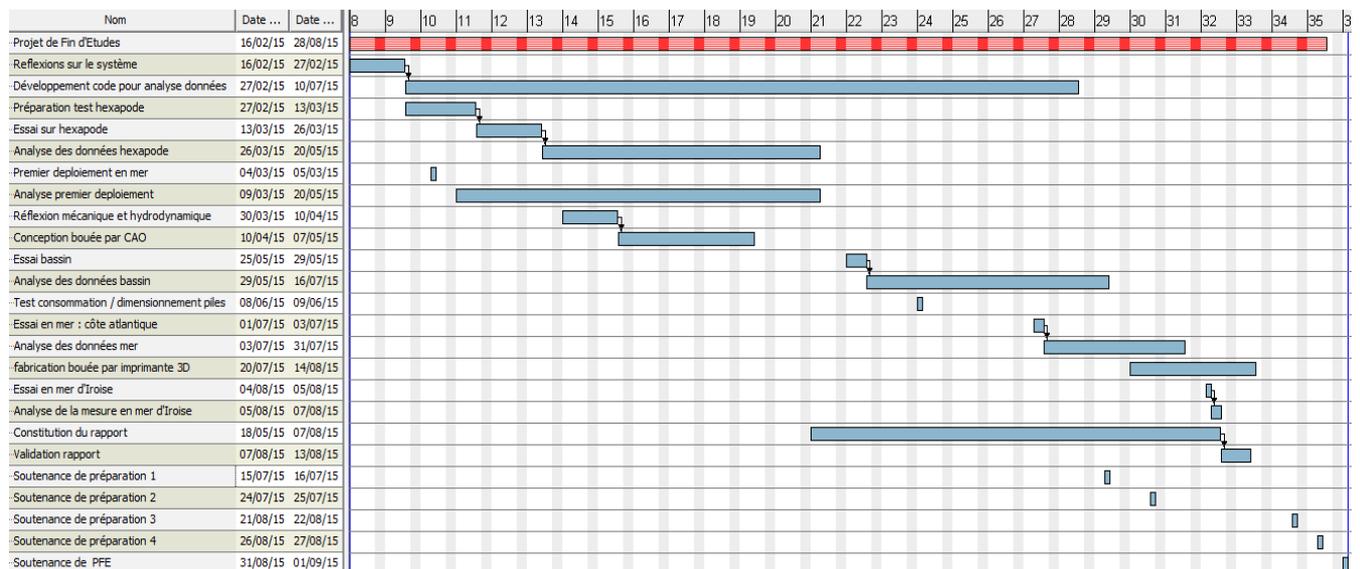


Figure 15 : planning réel du projet de fin d'études

### III. FONCTIONNEMENT ET CONFIGURATION DU SYSTEME

Au cours de mon apprentissage, j'ai suivi le projet SYREDOMY et ajouté des fonctionnalités au programme en langage C. Par exemple, le groupe technique souhaitait exploiter l'accéléromètre de la carte ALEES. J'ai ajouté les fonctions au programme pour mettre en œuvre ce composant, maintenant il est fonctionnel et configurable selon l'application visée. Cela a contribué à l'avancement du projet de fin d'études sans savoir qu'une bouée dérivante devait être développée par la suite. Le travail effectué pour sa mise en œuvre est expliqué ci-dessous. Je rappelle que le principal objectif de ce projet de fin d'études est une étude de faisabilité des mesures de vagues par l'accéléromètre implanté sur la carte ALEES. Cette partie réalisation électronique indique le fonctionnement et la configuration de l'accéléromètre, elle n'a pas été traitée pendant le projet de fin d'études.

#### **III.1 Fonctionnement de l'accéléromètre**

La première chose était de prendre connaissance du fonctionnement de ce composant en lisant la documentation technique. Ensuite de mettre en place le programme en langage C pour le configurer et extraire les données d'accélérations. Une fois l'extraction effectuée, il faut enregistrer les accélérations sur la carte  $\mu$ SD située sur la carte ALEES. La méthode d'enregistrement est optimisée pour enregistrer les données rapidement et éviter le gaspillage d'énergie.

##### Principe de Fonctionnement :

C'est un accéléromètre MEMS (MicroElectroMechanical System ou microsystème électromécanique). Il est composé d'une partie mécanique et d'une partie électrique. La partie mécanique a un système de peignes conducteurs électriques en silicium (*Figure 16 : Principe de fonctionnement d'un MEMS*). Le premier peigne (en rouge) est fixe. L'autre en bleu est mobile, suspendu à une lamelle flexible et constitue une masse sensible à l'accélération. Une accélération va déplacer un des deux peignes par rapport à l'autre. Ce déplacement sera proportionnel à l'accélération et va modifier la capacité qui existe entre les deux peignes. La partie électrique va quant à elle donner l'énergie nécessaire pour mesurer la variation de cette capacité, on mesure ainsi le déplacement du premier peigne par rapport au second et on obtient l'accélération.

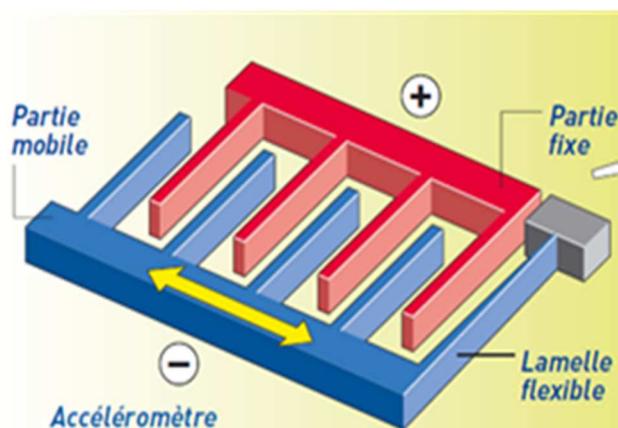


Figure 16 : principe de fonctionnement d'un accéléromètre MEMS [1]

#### Câblage :

Le câblage de l'accéléromètre ST LIS3DH implanté sur la carte ALEES est en *Annexe 10 : câblage de l'accéléromètre*. L'accéléromètre utilise un bus I2C et est relié au microcontrôleur, se référer à l'*Annexe 10* pour plus de détails sur le câblage.

#### Communication :

L'établissement d'une communication entre le µcontrôleur et l'accéléromètre se fait par le bus I2C. Pour que l'esclave comprenne le maître et inversement, il faut transmettre des trames précises. Soit on transmet une trame d'écriture pour configurer des registres, soit une trame de lecture pour extraire des valeurs de l'accéléromètre. L'explication de ces trames est en *Annexe 12 : explications des trames de communication*.

### **III.2 Configuration de l'accéléromètre**

Avant de lire les accélérations contenues dans les registres de sortie, il faut configurer l'accéléromètre au moyen d'une trame d'écriture. Il existe des fonctions du constructeur STMicroelectronics pour la configuration et la gestion de l'accéléromètre.

#### Les registres de base :

La fréquence d'échantillonnage ainsi que l'activation des axes sont des paramètres importants à configurer. L'explication pour la configuration de ces paramètres est en *Annexe 13 : configuration de la fréquence d'échantillonnage et des axes de l'accéléromètre*.

La fréquence de l'accéléromètre est configurée à 25Hz et les 3 axes sont activés. Cette configuration a été validée par les essais sur l'hexapode (*Partie IV.1 Essais sur l'hexapode*).

Une autre configuration importante est l'échelle de sortie des accélérations, notre composant peut être réglé de 2g jusqu'à 16g ( $1g = 9.81m/s^2$ ) d'accélération maximale. Comme nous souhaitons mesurer l'état de mer et donc la houle, une accélération maximale de 2g ( $19.6m/s^2$ ) sera suffisante. En effet, une accélération de 2g correspond à un mobile qui passe de 0 à 19.6m/s (70km/h) en 1 seconde, c'est une très forte accélération. Rappelons que l'accélération moyenne se calcule avec la formule suivante :

$$a (m.s^{-2}) = \frac{Vitesse_{fin} (m.s^{-1}) - Vitesse_{initiale}(m.s^{-1})}{Temps_{fin} (sec) - Temps_{initiale}(sec)}$$

Les explications relatives au réglage de l'échelle d'accélérations est en *Annexe 14 : configuration de l'échelle d'accélérations*.

#### Extraction des données :

Lorsque les registres principaux sont configurés, on peut extraire les données d'accélérations. Il y a 6 registres pour les accélérations, deux par axe. Une accélération est codée sur 16 bits au format complément à 2 et est comprise dans ces deux registres. L'extraction des données est expliquée en *Annexe 15 : extraction des données d'accélérations*.

Le programme de configuration de l'accéléromètre est en *Annexe 16 : fonction configuration de l'accéléromètre*.

### III.3 Enregistrement des données sur la carte $\mu$ SD

L'enregistrement sur la carte  $\mu$ SD se fait en 3 étapes : remplissage de la mémoire interne FIFO (First In First Out, premier arrivé premier sorti) de l'accéléromètre, extraction de la FIFO et remplissage d'une mémoire tampon du microcontrôleur puis extraction de cette mémoire et enregistrement dans un fichier texte sur la carte  $\mu$ SD. L'explication des étapes est en *Annexe 17*.

### III.4 Achat d'un magnétomètre/boussole

Un magnétomètre boussole a été commandé, il n'a pas été intégré au système car la priorité était la validation des mesures de l'accéléromètre.

Le magnétomètre/boussole nous permettra de connaître précisément l'orientation de la bouée, cette information alliée aux accélérations et à la position GPS nous permettra de connaître la direction des vagues ou du courant. Le composant devra être câblé sur la liaison I2C de la carte ALEES pour valider son fonctionnement.

Le composant choisi est le HMC5883L :



Figure 17 : magnétomètre boussole [2]

## IV. TESTS, ANALYSE DE DONNEES ET VALIDATION DU PROTOTYPE

### IV.1 Essais sur le positionneur hexapode

L'hexapode de l'Ifremer a été réservé du 16 au 27 mars pour vérifier la pertinence des données de l'accéléromètre implanté sur la carte ALEES.

#### Présentation de l'hexapode :

L'hexapode est une plate-forme à 6 vérins permettant d'effectuer des mouvements représentatifs de l'état de mer. Voici une image de cette machine :

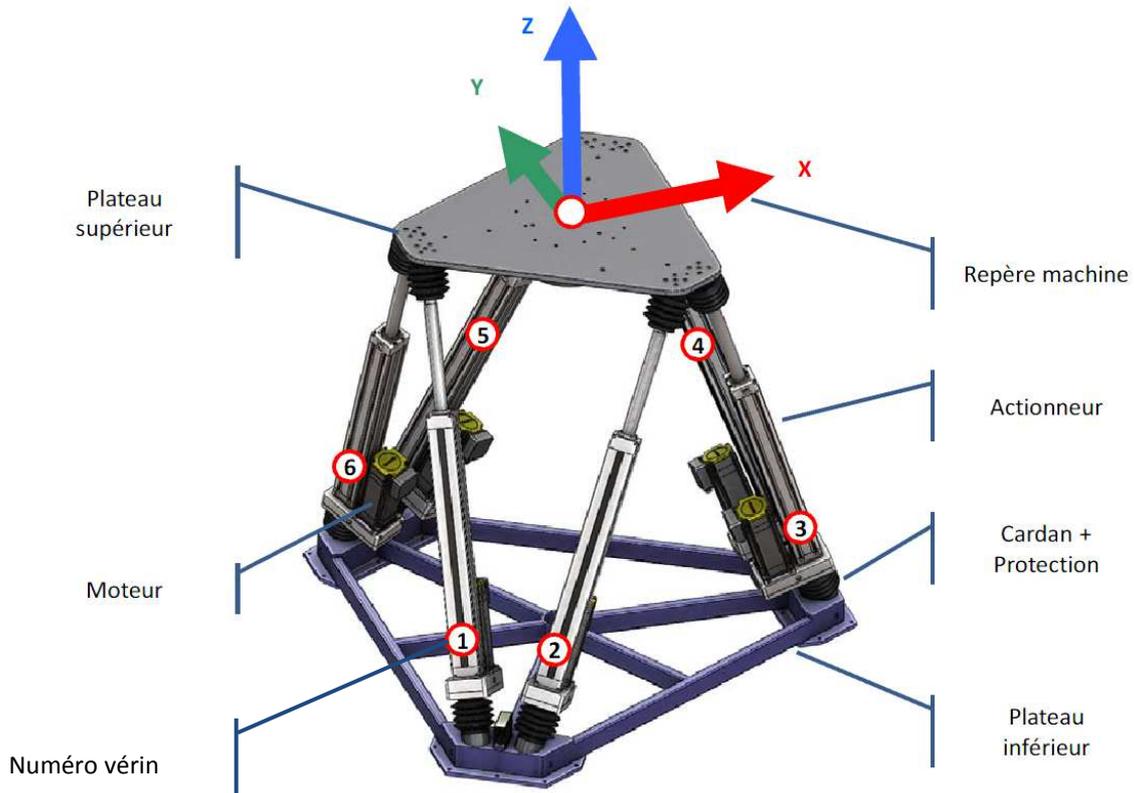


Figure 18 : le positionneur hexapode

Les tests ont été réalisés en prenant soin d'aligner les axes des accéléromètres avec les axes de l'hexapode.

L'hexapode se contrôle à partir d'un logiciel du constructeur « Symétrie ». Il y a une partie création pour générer des signaux à transmettre à l'hexapode et une partie mesure pour enregistrer les positions de l'hexapode durant le test.

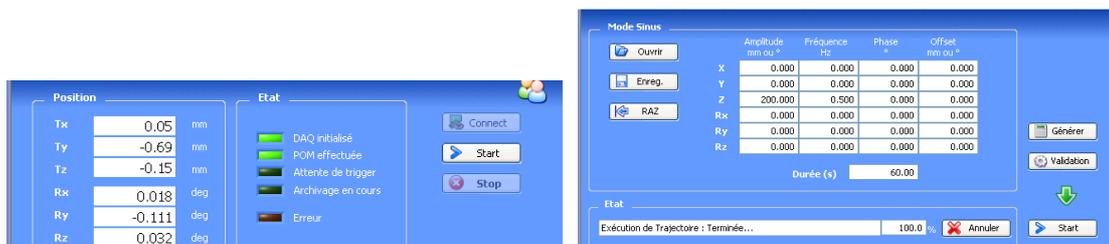


Figure 19 : partie mesure et partie création du logiciel « Symétrie »

Il est aussi possible de créer un fichier texte pour simuler des mouvements plus complexes.

L'objectif de ce test était de vérifier que l'accéléromètre ST LIS3DH (MEMS numérique) puisse faire des mesures de qualité suffisante pour le projet mesure vagues. Pour cela, nous avons comparé notre accéléromètre avec 2 autres matériels :

- Les centrales inertielles XSENS MTI-30 et MTIG-700 (MEMS analogiques) de l'ENSTA Bretagne
- La carte développée par le Laboratoire d'Océanographie Spatiale avec un accéléromètre ST LIS344ALH (MEMS analogique)

Du temps a été nécessaire pour trouver la configuration optimale pour les tests car l'hexapode générait des vibrations qui perturbaient les mesures de notre accéléromètre et celui du Laboratoire d'Océanographie Spatiale (LOS). Le choix s'est porté sur un disque de mousse d'une épaisseur de 15mm. De leur côté, les XSENS n'étaient pas perturbées par ces vibrations grâce leurs algorithmes de filtrage.

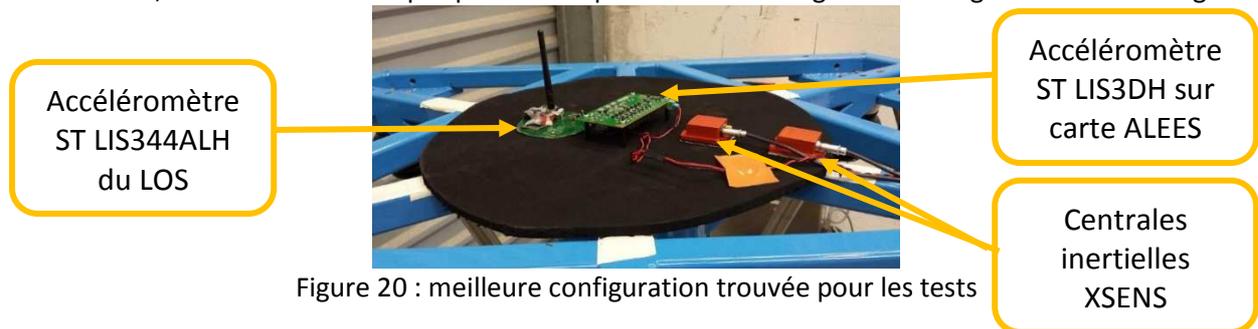


Figure 20 : meilleure configuration trouvée pour les tests

Une fois la configuration optimale trouvée, j'ai dû procéder à la vérification des mesures de chaque accéléromètre pour qu'ils soient comparables aux mesures de l'hexapode.

Le logiciel « Symétrie » fourni la position de l'hexapode en millimètres tandis que les accéléromètres mesurent les accélérations en  $m/s^2$ . Pour pouvoir les comparer, une adaptation du signal de l'hexapode a été faite en utilisant les dérivées. Une première dérivée du signal « position » permet d'obtenir la vitesse puis une deuxième permet de calculer l'accélération. Voici les 3 signaux « position », « vitesse » et « accélération » de l'hexapode pour une amplitude de  $\pm 200mm$  et une fréquence de 0.6Hz :

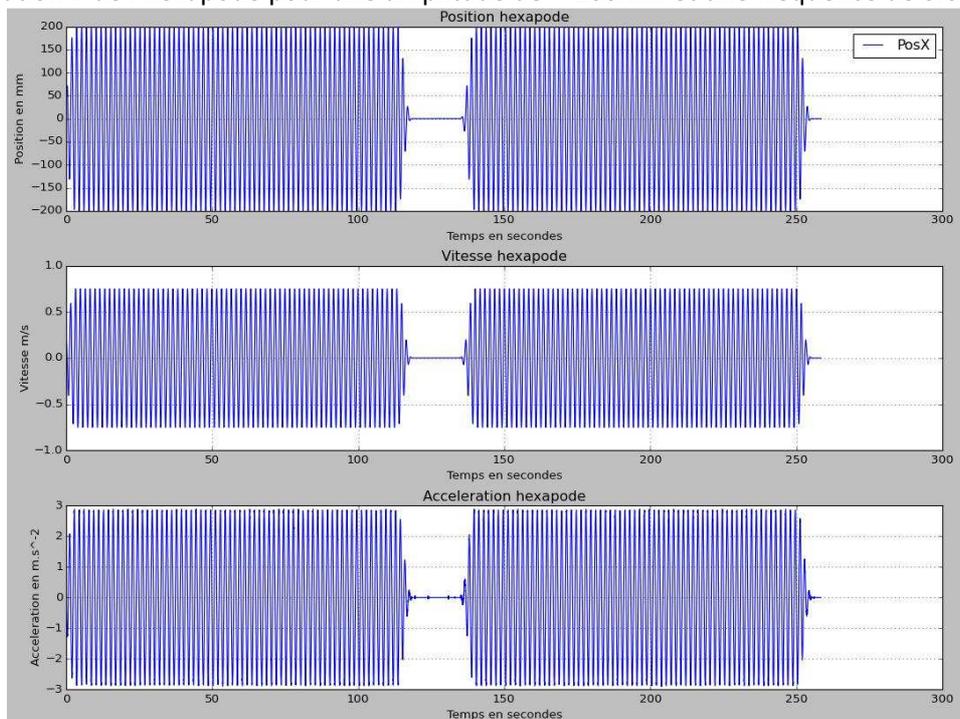


Figure 21 : dérivées première et seconde du positionnement de l'hexapode

On obtient une accélération qui oscille entre +/-2.84 m/s<sup>2</sup>.

On peut vérifier l'amplitude des accélérations en utilisant les dérivées théoriques. Une fonction sinusoïdale est de la forme :

$$f(x) = \hat{A} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$$f'(x) = \hat{A} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad \text{Vitesse = dérivée de la position}$$

$$f''(x) = -\hat{A} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad \text{Accélération = dérivée de la vitesse}$$

Chaque première partie des équations correspond à l'amplitude du signal, si on calcule les amplitudes de la *Figure 21* on obtient : Position=200mm, vitesse=0.753m/s, accélération=-2.842m/s<sup>2</sup>. On retrouve cette valeur max sur la *Figure 21*.

L'accélération de l'hexapode étant calculée, on peut maintenant la comparer à celle des différents capteurs et ensuite effectuer l'analyse spectrale. Pour ce même test, tous les accéléromètres mesurent une accélération maximale de +/-2.8 m/s<sup>2</sup>, exemple ci-dessous avec la mesure de notre ST LIS3DH, cela vérifie le fonctionnement de la fonction dérivée du programme Python.

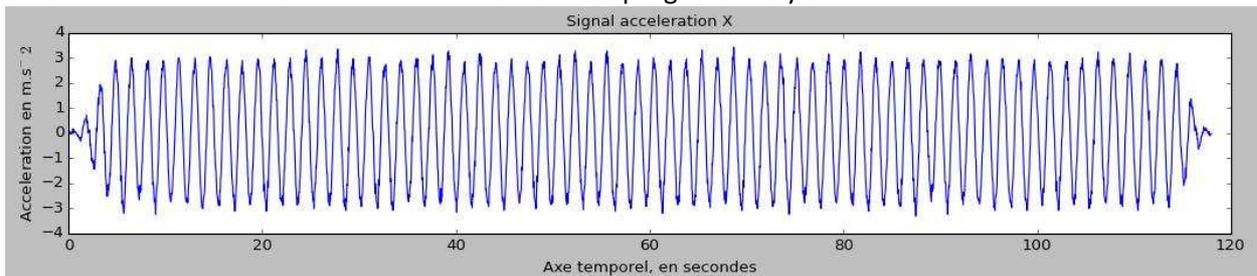


Figure 22 : mesure ST LIS3DH ; hexapode avec amplitude = +/-200mm ; fréquence=0.6Hz

#### Méthodes utilisées pour l'analyse des signaux :

La vitesse et l'accélération de la *Figure 21* ont été trouvées grâce aux dérivations numériques. La fonction du programme utilise la formule suivante :

$$f'(x_i) \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}}$$

Cette équation permet de calculer la valeur de la dérivée en un point *i*. La fonction du programme est en *Annexe 22 : fonction de dérivation numérique*.

Pour quantifier les accélérations de nos 4 capteurs, la valeur efficace (RMS : Root Mean Square) de chaque signal a été calculée sur une durée de 10 secondes. La valeur efficace d'un signal est la racine carrée de la moyenne de cette grandeur au carré, sur un intervalle de temps donné. La fonction du programme est en *Annexe 23 : Fonction valeur efficace*.

Une fois les valeurs d'accélérations validées, on peut procéder à l'analyse spectrale.

Pour l'analyse spectrale, j'ai choisi d'utiliser la fonction `welch` (bibliothèque `scipy` de python) suite aux conseils d'experts en mesure de vagues.

#### Explication de la fonction Welch :

Cette fonction calcule une estimation de la densité spectrale de puissance (DSP) en utilisant la méthode de Welch. Cette méthode enlève la composante continue du signal d'origine, le découpe en segments, réalise un fenêtrage sur chaque segment, calcule le module de la transformée de Fourier au carré de chaque segment puis fait une moyenne.

Elle permet de connaître l'état moyen de l'amplitude du signal d'entrée et cela pour chaque fréquence. Voici un exemple d'utilisation de cette fonction en langage Python:

```
[f, Sx]=signal.welch(signal_acceleroX, fs=25, window='hanning', nperseg=1024, noverlap=512, detrend=mlab.detrend_mean)
```

Explication des paramètres d'entrée :

`signal_acceleroX` : signal pour lequel on souhaite calculer la DSP

`fs = 25` : fréquence d'échantillonnage, ici 25Hz

`window = 'hanning'` : choix de la fenêtre de pondération

`nperseg = 1024` : Nombre de points pour le calcul de la transformée de Fourier

`noverlap = 512` : Nombre de points pour le chevauchement des segments

`detrend = mlab.detrend_mean` : suppression de la moyenne du signal d'entrée et de la pente du signal. Cette fonction permet d'avoir un spectre avec une composante continue nulle.

La fonction renvoie 2 tableaux, un pour le spectre (`Sx` dans l'exemple) et un pour la fréquence (`f` dans l'exemple). Ce premier exemple permet le calcul du spectre d'accélération. On peut ensuite calculer le spectre de déplacement (ou d'élévation) à partir du spectre d'accélération, il faut diviser par  $\omega^4$  à la puissance 4 soit  $(2*\pi*f)^4$ .

Une division par  $\omega^4$  dans le domaine fréquentiel revient à intégrer 2 fois l'accélération dans le domaine temporel, on retrouve donc l'élévation. Voici un exemple de calcul du spectre de déplacement en langage Python:

```
Spectre_deplacement= Spectre_acceleration / np.power(2*math.pi*f,4)
```

Pour l'analyse spectrale, le choix du nombre de points pour le calcul de la transformée de Fourier se fait en fonction du nombre d'échantillons du signal temporel. Pour ces essais sur l'hexapode, j'ai choisi la puissance de 2 inférieure au nombre d'échantillons en temporel.

Exemple : si le signal temporel à 1060 échantillons, le nombre de points choisi est 1024. Le périodogramme Welch va alors effectuer son calcul avec 1024 points sur chaque segment.

Pour les points de chevauchement, je choisis un `noverlap = nperseg / 2`. Le chevauchement permet d'obtenir plusieurs réalisations d'un processus. Avec cette configuration, le nombre de transformation de Fourier et de calcul de moyenne appliqués au signal est multiplié par 2. La conséquence est une réduction du bruit.

Le fenêtrage avec la fenêtre de Hann permet de pondérer le signal avec des lobes secondaires moins importants qu'une fenêtre rectangulaire mais augmente la largeur du lobe principal et donc dégrade la résolution fréquentielle.

Les tests :

Il y a eu 9 tests effectués sur un seul axe (signaux monochromatiques) avec des fréquences comprises entre 0.05 Hz et 2 Hz et des amplitudes crête-à-crête allant de 50 et 400mm.

L'axe X a été choisi car l'hexapode génère moins de vibrations suivant cet axe. Voici les 9 tests :

Axe	Fréquence (Hz)	Temps du test	Amplitude
X	0.05	3 min	400 mm
X	0.1	3 min	400mm
X	0.2	2 min	200mm
X	0.4	2 min	200mm
X	0.6	2 min	200mm
X	0.8	1 min	200mm
X	1	1 min	100mm
X	1.5	30 sec	100mm
X	2	30 sec	50mm

Tableau 1 : les tests effectués sur l'hexapode

Pour chaque test, 3 informations sont calculées pour quantifier les mesures de chaque accéléromètre : la valeur efficace du signal temporel, l'amplitude de la fondamentale et le niveau de bruit en basses/hautes fréquences (avant et après la fondamentale) dans le domaine fréquentiel. Une explication pour le calcul des paramètres est donnée ci-dessous pour le test à 0,8 Hz :

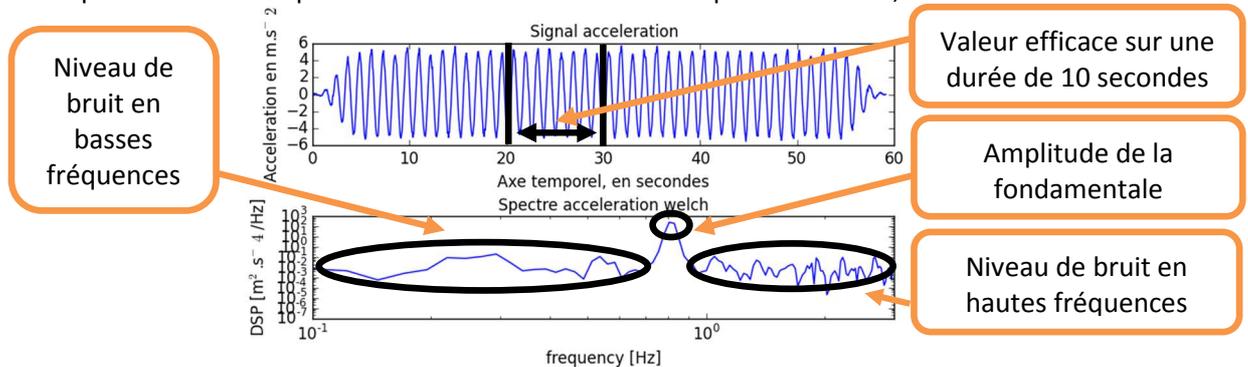


Figure 23 : mesure du ST LIS3DH, test avec amplitude=200mm ; fréquence=0.8Hz

L'analyse des données provenant de l'hexapode, des XSENS et du LIS3DH a été faite en langage Python. L'accéléromètre du LOS, lui, a été traité avec le logiciel Matlab. La méthode Welch a été utilisée pour tous les traitements.

Les accéléromètres étaient réglés de la même manière, l'échelle d'accélération entre +/- 2 g et la fréquence d'échantillonnage à 10Hz.

Un point important à signaler :

Pendant les tests, la liaison hyperfréquence qui sert à récupérer les données d'accélérations du ST LIS344ALH (accéléromètre du LOS) n'a pas renvoyé tous les points de mesure, ce problème est apparemment lié à un manque de visibilité entre les antennes d'émission et de réception. Ces pertes de données d'accélérations induisent une réduction de la fréquence d'échantillonnage. Une interpolation a été faite par le LOS pour récupérer une partie des échantillons perdus mais la fréquence d'échantillonnage reste inférieure à 10Hz pour chaque essai. J'ai donc recalculé la fréquence d'échantillonnage apparente pour chaque essai et mis cette fréquence en paramètre d'entrée de la fonction Welch pour que la raie fondamentale soit à la fréquence du test effectué sur l'hexapode.

Sur les 9 tests effectués et analysés, 4 sont montrés (Annexes 24 à 28). Ils reflètent la gamme de fréquence à mesurer en rapport avec le cahier des charges :

- +/-50 mm amplitude avec une fréquence de 2Hz (période de 0.5 seconde)
- +/-100 mm amplitude avec une fréquence de 0.8Hz (période de 1.25 seconde)
- +/-200 mm amplitude avec une fréquence de 0.2Hz (période de 5 secondes)
- +/-400 mm amplitude avec une fréquence de 0.05Hz (période de 20 secondes)

Pendant l'analyse, je me suis rendu compte que pour les plus hautes fréquences (entre 0.8 et 2 Hz), les valeurs d'accélération du STLIS3DH étaient plus faibles que les autres accéléromètres. Nous avons pensé à un problème de temps de réponse du capteur, à un problème de réglage d'échelle ou encore à un problème de fréquence d'échantillonnage. Des tests ont alors été réalisés avec 3 configurations différentes pour comprendre cette différence de valeur efficace. Les configurations étaient les suivantes : la première à +/-2g et 10Hz de fréquence d'échantillonnage, la deuxième avec une échelle plus grande (+/-4g au lieu de +/-2g) puis ensuite avec une fréquence d'échantillonnage plus grande (25Hz au lieu de 10Hz). Voici les résultats :

Test Axe	Amplitude mm	Fréquence Hz	Durée	RMS LIS3DH 2g 10Hz m/s <sup>2</sup>	RMS LIS3DH 4g 10Hz m/s <sup>2</sup>	RMS LIS3DH 2g 25Hz m/s <sup>2</sup>	RMS XSENS MTI30 m/s <sup>2</sup>	RMS LIS344ALH m/s <sup>2</sup>	RMS hexapode m/s <sup>2</sup>
X	400	0,05	3 min	0,10	0,25	0,04	0,03	0,09	0,04
X	400	0,1	3 min	0,22	0,32	0,23	0,11	0,17	0,11
X	200	0,2	2 min	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2
X	200	0,4	2 min	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9
X	200	0,6	2 min	1,8	1,8	1,9	2,0	1,9	2,0
X	200	0,8	1 min	2,9	2,9	3,5	3,6	3,5	3,6
X	100	1	1 min	2,1	2,1	2,7	2,8	2,7	2,8
X	100	1,5	30 sec	3,9	3,9	5,8	6,2	6,2	6,3
X	50	2	30 sec	2,9	2,9	4,7	5,4	5,0	5,5

Tableau 2 : valeurs efficaces des différents capteurs

Les résultats montrent des mesures satisfaisantes en augmentant la fréquence d'échantillonnage à 25Hz (en vert) contrairement à 10 Hz (en rouge) si l'on compare avec les valeurs RMS de l'hexapode (consigne en bleu). La fréquence choisie au départ était donc trop faible pour pouvoir restituer toutes les amplitudes d'accélération mais bonne pour restituer le contenu fréquentiel. Nous avons choisi de rester avec une fréquence de 25Hz et une échelle de mesures entre + et - 2g. Les Annexes de 25 à 28 montrent les mesures pour un réglage à 25 Hz.

On constate que l'accéléromètre du LOS obtient les bonnes valeurs d'accélération. Après discussion avec le LOS, le LIS344ALH (accéléromètre analogique) échantillonne à 400Hz. les mesures sont ensuite filtrées par des condensateurs, converties en numérique, moyennées puis échantillonnées à 10Hz. Cela explique pourquoi les valeurs des accélérations sont bonnes.

Les autres informations calculées sont l'amplitude de la fondamentale sur le spectre d'accélération ainsi que le niveau de bruit moyen en basses et hautes fréquences.

Voici les résultats des mesures de chaque accéléromètre concernant l'amplitude de la fondamentale (pic) et des bruits autour de cette fondamentale :

Test Axe	Amplitude mm	Fréquence Hz	Durée	pic LIS3DH 2g 10Hz m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	pic LIS3DH 2g 25Hz m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	pic MTI m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	pic LIS344ALH m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	pic hexapode m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz
X	400	0,05	3 min	0.066	0.088	0.052	0.06	0.081
X	400	0,1	3 min	0.708	1.168	0.791	0.8929	1.124
X	200	0,2	2 min	2.602	2.757	2.506	1.4	2.240
X	200	0,4	2 min	37.708	39.584	54.231	23.8139	40.579
X	200	0,6	2 min	208.499	216.416	213.091	inexploitable	inexploitable
X	200	0,8	1 min	233.180	272.557	428.846	245	323.075
X	100	1	1 min	144.750	186.422	248.761	159	210.330
X	100	1,5	30 sec	251.519	387.023	517.980	143	465.549
X	50	2	30 sec	139.927	277.760	465.866	inexploitable	inexploitable

Tableau 3 : valeurs de l'amplitude de la fondamentale

Les amplitudes du *Tableau 3* sont beaucoup plus faible en configuration +/-2g et 10Hz pour le LIS3DH et le LIS344ALH. La configuration avec une fréquence d'échantillonnage de 25 Hz se rapproche de l'hexapode qui est la valeur de référence à atteindre. Les XSENS obtiennent des valeurs plus élevées que la consigne.

Test Axe	Amplitude mm	Fréquence Hz	Temps	bruit BF LIS3DH 2g 10Hz m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	bruit HF LIS3DH 2g 10Hz m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	bruit BF LIS3DH 2g 25Hz m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	bruit HF LIS3DH 2g 25Hz m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	niveau bruit BF MTI m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	niveau bruit HF MTI m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	bruit BF LIS344ALH m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz	bruit HF LIS344ALH m <sup>2</sup> .s <sup>-4</sup> /Hz
X	400	0,05	3 min	0.005	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.006	0.001
X	400	0,1	3 min	0.003	0.003	0.006	0.004	0.000	0.000	0.006	0.007
X	200	0,2	2 min	0.020	0.004	0.047	0.006	0.000	0.000	0.004	0.0161
X	200	0,4	2 min	0.013	0.004	0.010	0.004	0.000	0.000	0.076	0.182
X	200	0,6	2 min	0.030	0.009	0.011	0.003	0.000	0.000	inexploitable	inexploitable
X	200	0,8	1 min	0.030	0.009	0.027	0.005	0.000	0.000	0.289	3.789
X	100	1	1 min	0.018	0.006	0.008	0.003	0.000	0.001	0.193	2.373
X	100	1,5	30 sec	0.030	0.007	0.037	0.005	0.002	0.010	2,6	13,1
X	50	2	30 sec	0.025	0.010	0.019	0.006	0.009	0.049	inexploitable	inexploitable

Tableau 4 : bruit moyen basses et hautes fréquences

On remarque des niveaux de bruit très bas voir nuls pour la XSENS MTI30 (en vert) et des niveaux de bruit très supérieurs en hautes fréquences pour le LIS344ALH (en rouge). Notre accéléromètre à un bruit faible mais qui n'est pas négligeable.

#### Conclusion sur les tests hexapode :

Avant d'utiliser la fonction Welch de Python, j'avais mis en place une fonction de calcul de la DSP étape par étape (choix du nombre d'échantillons, calcul de la TF, suppression de la deuxième partie du spectre, calcul du module au carré de la TF). En comparant ma méthode à celle de Welch, les amplitudes étaient similaires, mais ma méthode ne calculait pas la moyenne sur les segments donc mon spectre avait une variance plus élevée.

Les mesures du LIS3DH sont satisfaisantes si on le compare avec les autres capteurs. Les valeurs efficaces et les amplitudes de la fondamentale se rapprochent de la consigne avec une erreur de 5.6% en moyenne (hors basses fréquences à cause du bruit de l'hexapode). Le niveau de bruit de notre capteur est certes plus important que les XSENS qui ont un filtrage intégré, mais il reste meilleur que l'accéléromètre du LOS.

Les tests effectués sur l'hexapode ont permis de valider les mesures d'accélération avec une fréquence d'échantillonnage de 25Hz et une échelle de mesure entre +/-2g. Il est probable qu'une fréquence supérieure à 25Hz puisse améliorer les mesures de notre accéléromètre, mais l'hexapode n'était plus disponible après notre période d'essai. Il sera donc nécessaire d'effectuer un autre test avec une fréquence d'échantillonnage plus élevée à l'avenir. Cependant, une fréquence plus élevée implique une consommation plus élevée du système et une plus grande quantité de données. Il faudra trouver un compromis entre la consommation du système et la résolution des données.

#### Point sur l'étude de faisabilité :

Les bonnes mesures sur l'hexapode encouragent la mise en place de tests supplémentaires. Ceux-ci permettront de connaître davantage notre capteur mais aussi de vérifier la faisabilité d'une bouée dérivante avec l'accéléromètre implanté sur la carte ALEES.

## IV.2 Premières données en mer

Suite à une sollicitation de notre part, le « Laboratoire Détection, Capteurs et Mesures » a répondu favorablement pour déployer le prototype de la bouée dérivante. Nous avons saisi cette opportunité afin d'enregistrer les premières données en mer. La bouée a été déployée à Sainte-Anne du Portzic le 4 mars 2015. L'analyse des mesures a été faite en parallèle des essais sur l'hexapode. La bouée avait la même configuration mécanique que pour le projet SYREDOMY. C'est à dire la sphère en verre avec à l'intérieur le support de fixation qui accueille les cartes électroniques SYREDOMY, ALEES, Iridium et GPS. Voici la vue intérieure ainsi que l'orientation des axes de l'accéléromètre pour ce déploiement :

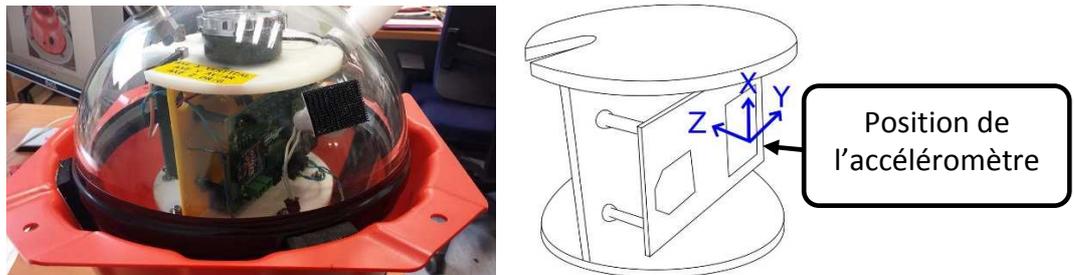


Figure 24 : intérieur de la bouée et orientation des axes de l'accéléromètre

Les cartes électroniques SYREDOMY et ALEES étaient assemblées, voir *Annexe 29 : carte SYREDOMY et ALEES assemblées*. La carte GPS se situait de l'autre côté du support de fixation. La carte ALEES a enregistré les données d'accélération et les données provenant de la carte GPS.

La sphère en verre a été protégée par une coque en plastique. Une collerette a été rajoutée pour que la ligne de flottabilité soit au niveau de cette collerette et pour réduire le roulis/tangage. Elle a été déployée comme sur la *Figure 25*.



Figure 25 : bouée prête à déployer

**L'objectif** du test était d'enregistrer les données issues de l'accéléromètre pour ensuite vérifier leurs pertinences.

La fréquence d'échantillonnage de l'accéléromètre pour ce test est de 10 Hz car nous n'avions pas encore validé la fréquence de 25 Hz avec l'hexapode. La bouée a été déployée entre 13h21 et 13h41 heure locale. Le GPS intégré dans la sphère était actif et a enregistré le trajet de la bouée, la *Figure 26* le montre :



Figure 26 : trajet de la bouée entre 13h21 et 13h41

Le fait de déployer cette bouée a permis l'acquisition des premières données en mer. Sur le graphe ci-dessous apparaissent en bleu les accélérations en pilonnement (mouvements verticaux). L'accélération en g ( $1g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ ) est en ordonnées et l'heure sur les abscisses. Les résultats portent sur l'axe qui était parallèle à la houle. Voici les accélérations relevées sur cet axe :

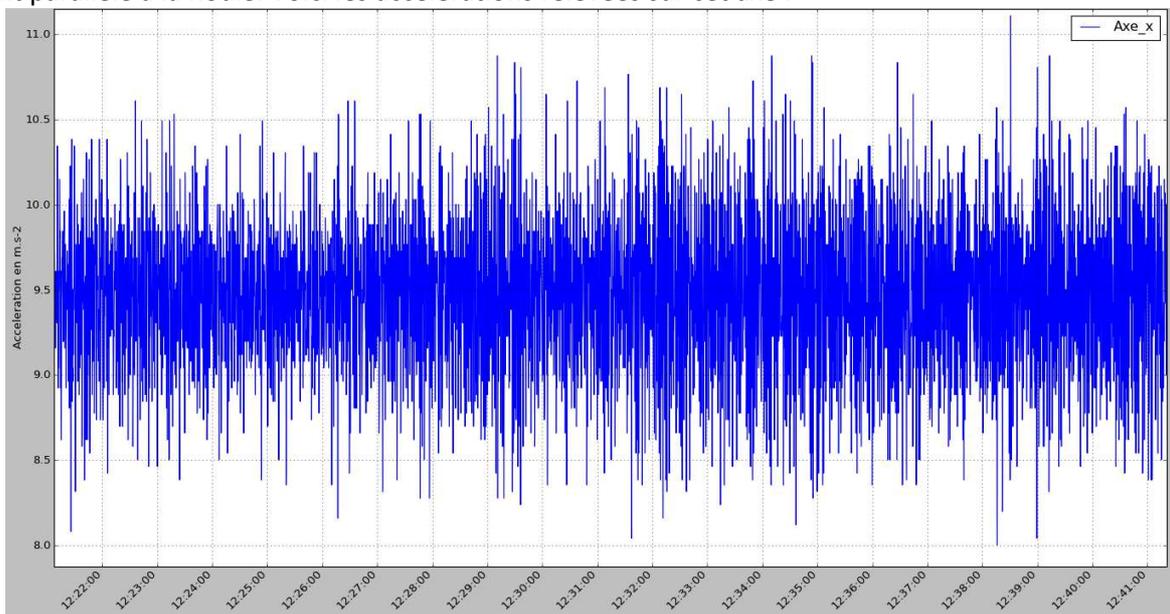


Figure 27 : mesure des accélérations sur l'axe vertical (axe de la houle)

A partir des accélérations données ci-dessus, le spectre des accélérations a été calculé. Cette fois ci, le spectre a été obtenu en utilisant la fonction spectrum sur Matlab mais les résultats étaient très proches de la fonction welch sous Python.

`[Estimation DSP, fréquence]=spectrum(signal d'entrée, Nfft, Noverlap, hanning(2048,'Periodic'), Fs)`

La fonction spectrum retourne un tableau pour l'estimation de la densité spectrale de puissance (DSP) et un tableau pour l'axe fréquentiel correspondant à la DSP. On utilise une fenêtre de hanning de 2048 points, un noverlap de 1024 points.  $F_s=10$  est la fréquence d'échantillonnage en Hz. La Figure 28 représente le spectre d'accélérations, voici la ligne de commande en langage Python pour l'obtenir :

`[Sax,f]=spectrum(aX, 2048, 1024, hanning(2048,'Periodic'), 10)`

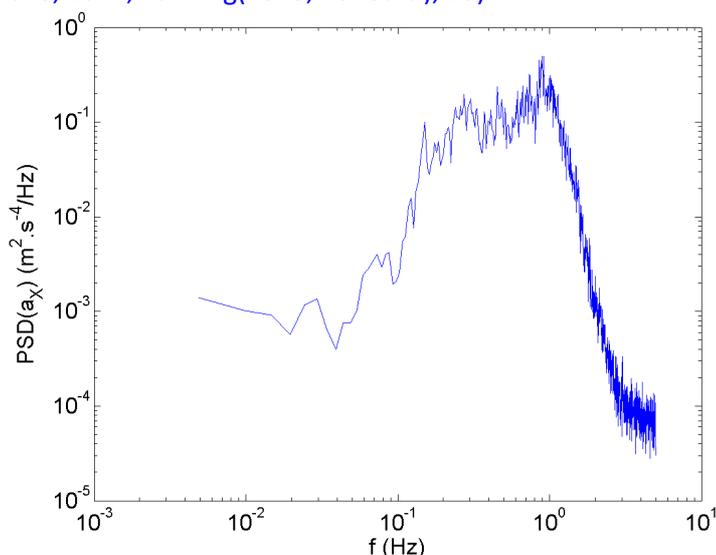


Figure 28 : spectre d'accélérations

Ce spectre représente l'estimation de l'amplitude des accélérations en fonction de la fréquence. Nous obtenons un niveau de bruit non nul mesuré en basses fréquences, cela est propre au capteur car les accélérations devraient théoriquement retombées à zéro. Revenons sur ce bruit à la fin des résultats.

A partir de ce spectre d'amplitude, on divise par  $\omega^4$  avec  $\omega = 2 * \pi * f$  pour retrouver le spectre d'élévation (ou de déplacement). Les unités du spectre d'élévation sont en  $m^2/Hz$ , le voici ci-dessous :

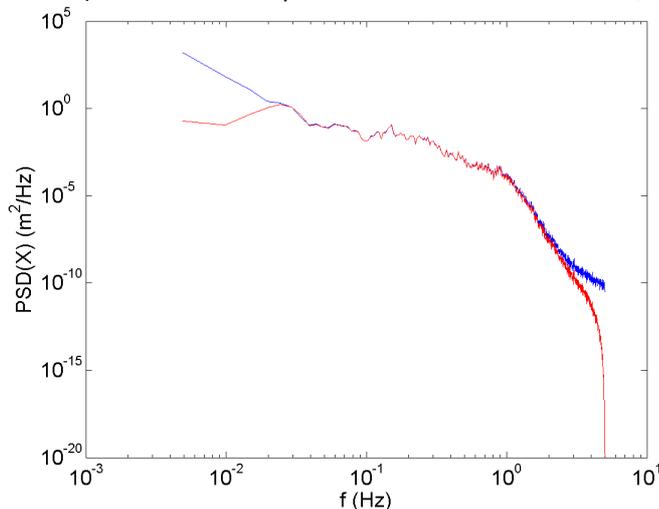


Figure 29 : spectre d'élévation de la houle

Ensuite, on peut retrouver la hauteur de la houle suivant la fréquence observée. A partir du spectre de déplacement, il est possible de retrouver la hauteur significative. La hauteur significative est 4 fois l'écart type de l'élévation de la surface. Voici la formule utilisée pour la retrouver :

$$H_s = 4 * \sqrt{\text{trapz}(f, S_x)} - 4 * \sqrt{\text{cumtrapz}(f, S_x)}$$

Explication des paramètres :

sqrt = racine carrée

trapz = intégrale d'un tableau de valeur, utilise la méthode trapézoïdale

cumtrapz = intégrale cumulée, utilise la méthode trapézoïdale

Sx = spectre de déplacement de l'axe X (axe de la houle pour ce test)

f=fréquence

On retrouve ainsi la hauteur significative ci-dessous :

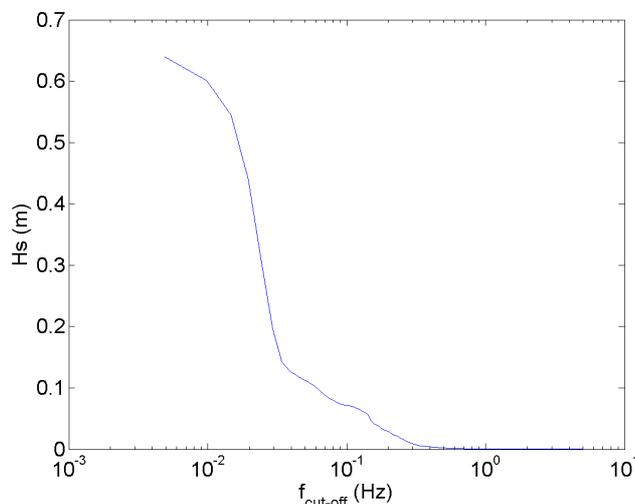


Figure 30 : hauteur significative de la houle

Le problème que nous rencontrons ici est que la hauteur significative augmente fortement et est trop élevée en basse fréquence. Cela est dû au niveau de bruit de l'accéléromètre présent en basse fréquence. Si le bruit en basse fréquence est élevé sur le spectre d'accélération, il sera d'autant plus élevé voir proche de l'infini sur le spectre d'élevation. En effet nous divisons le spectre d'accélération par  $\omega^4$  ou  $(2 * \pi * f)^4$ , ce qui veut dire qu'en basse fréquence nous divisons le niveau de bruit par une fréquence proche de 0 et élevée à la puissance 4. La conséquence est cette brusque augmentation en basse fréquence qui représente le bruit et non la hauteur significative.

Un test sur plan fixe a été effectué pour mesurer l'amplitude de ce niveau de bruit et le prendre en compte dans les prochains calculs. Ce test est très simple, l'accéléromètre est sur un plan horizontal fixe et fait des mesures au repos (non soumis à accélération).

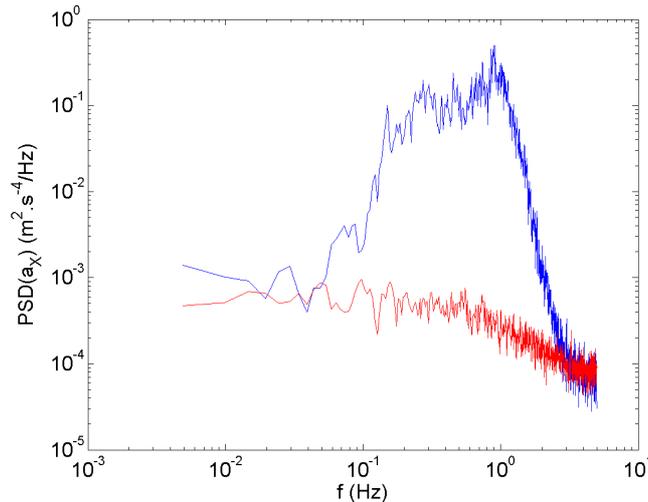


Figure 31 : spectres d'accélération lors de la mesure du niveau de bruit

Sur la figure ci-dessus :

- en **bleu** le spectre d'accélération calculé à partir des mesures en mer
- en **rouge**, le spectre d'accélération des mesures au repos

La courbe **rouge** montre le niveau de bruit propre au capteur, cela signifie que nous pourrions détecter des accélérations que si celles-ci sont supérieures à ce niveau de bruit.

Par la suite, il faudra filtrer ce bruit. Nous avons pensé à 2 méthodes de filtrage :

- 1) Couper les basses fréquences dès qu'on atteint un certain niveau de bruit.
- 2) Couper à partir d'une fréquence choisie, comme nous savons que la gamme de fréquence de vagues se situe entre 0.05 et 2 Hz, on pourrait par exemple utiliser un filtre passe haut ayant une fréquence de coupure de 0.05 Hz pour garder les mesures au-dessus de 0.05Hz.

La meilleure solution serait la première méthode car elle s'adapterait vraiment au capteur que nous avons sur la carte ALEES. La deuxième solution pourrait s'adapter à différents capteurs.

#### Conclusion sur le premier déploiement :

Les premiers résultats en mer ont permis de vérifier le fonctionnement général du système (mesures d'accélération, positions GPS) et d'en savoir plus sur l'accéléromètre. On sait que le capteur a un niveau de bruit qui lui est propre et qu'il sera nécessaire de mettre en place un filtrage en basses fréquences.

#### Point sur l'étude de faisabilité :

Ce déploiement a permis l'obtention du premier spectre de vagues et nous a permis d'avoir plus de convictions pour la faisabilité du projet. Les essais se sont donc poursuivis pour en savoir davantage sur les caractéristiques de notre accéléromètre et du système complet. Ces essais ont eu lieu dans des conditions contrôlées (*Partie IV.3 Essais au bassin*).

### IV.3 Essais au bassin

Des tests ont été effectués au bassin de l'Ifremer du 26 au 29 mai pour continuer l'analyse des mesures de l'accéléromètre implanté sur la carte ALEES. Cet essai fait suite aux tests effectués sur l'hexapode et au premier déploiement en mer.

#### Objectif :

Le but du test était de calculer la fonction de transfert du système. Cela en comparant les mesures de l'accéléromètre avec les appareils à notre disposition. Des sondes à houle mesuraient la hauteur de la houle et nous pouvions aussi connaître les mouvements de la bouée dérivante grâce à un système de trajectométrie.

Un compte-rendu d'essai a été écrit par le « Laboratoire Comportement des Structure en Mer », celui-ci m'a aidé pour l'analyse des mesures.

#### Configuration de l'essai :

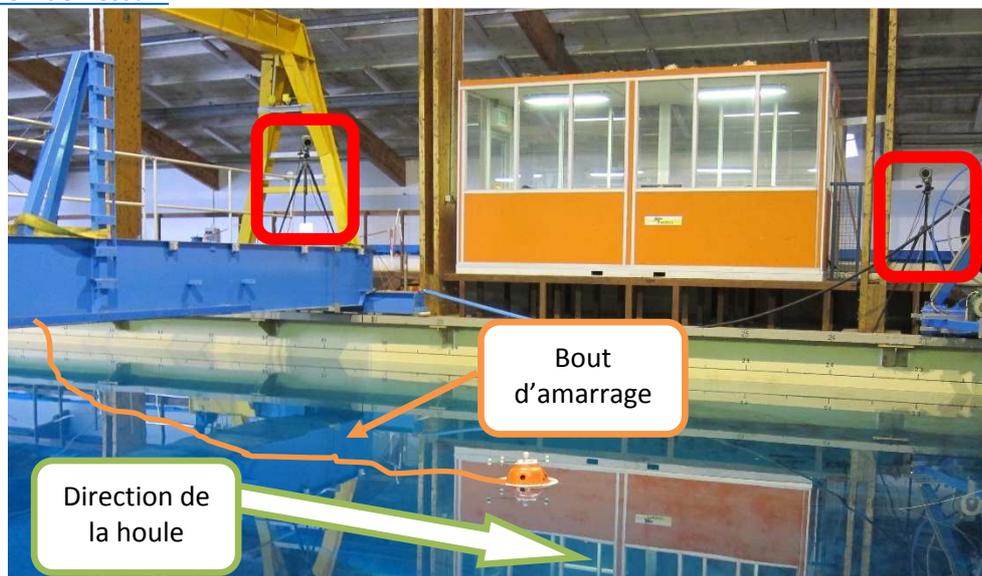


Figure 32 : vue globale d'un essai

Pour le système de trajectométrie, 3 caméras (2 sont encadrées en rouge sur la *Figure 32*) étaient placées pour capter les balles réfléchissantes fixées sur la bouée. Elles ont permis de connaître les rotations et les translations de la bouée dans le bassin. Les 3 caméras fonctionnent par triangulation.

Deux sondes à houle étaient présentes, une sur le côté du bassin et une au milieu du bassin en amont. La bouée était positionnée au même niveau que la sonde côté, on a alors comparé les mesures de la sonde avec les mesures de l'accéléromètre. Pour que la bouée reste dans le volume repérable par la trajectométrie, un bout d'amarrage sur ressort retenait la bouée dans la direction de la houle induisant quelque fois un léger biais sur les mesures.

### Configuration mécanique de la bouée :

La configuration mécanique était la même que pour le premier déploiement en mer (*Partie IV.2 Premières données en mer*).

Nous avons testé plusieurs configurations pour stabiliser la bouée et avoir le minimum de roulis/tangage. Les tiges de la structure faite au départ étaient trop longues (*Figure 33*) et rendaient instable la bouée. La 2<sup>ème</sup> configuration avec des bâtonnets en bois (*Figure 33*) n'était pas correctement détectée par la trajectométrie. La configuration retenue pour les tests correspond à la 3<sup>ème</sup> (*Figure 33*) avec des tiges carbonées de longueur ajustable pour un meilleur équilibre.

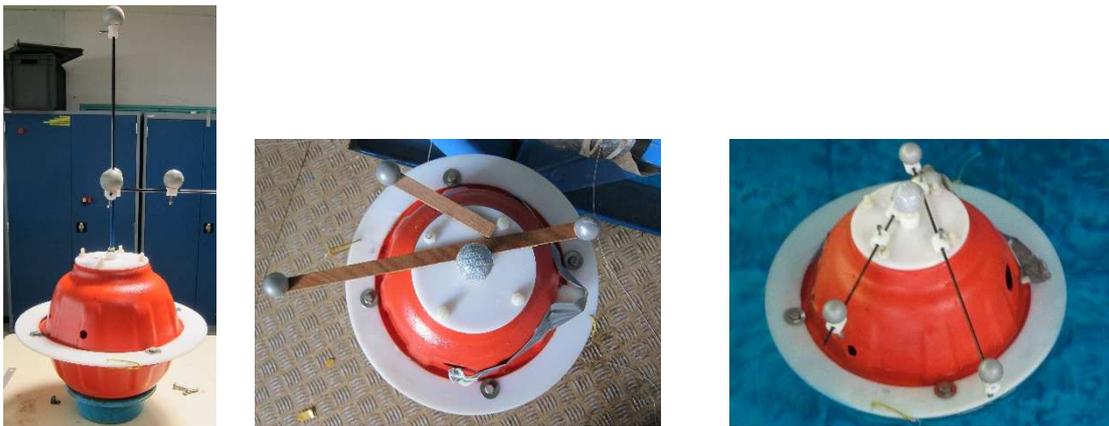


Figure 33 : 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> configuration

### Étalonnage du système de trajectométrie :

Pour que la triangulation opère de manière satisfaisante, les caméras ont été étalonnées par rapport au repère de base (*Figure 34 : étalonnage des caméras*).

Ensuite nous avons testé le système de trajectométrie avant de mettre la bouée dans l'eau. On doit pour cela déplacer une barre qui a 2 balles réfléchissantes aux extrémités dans la zone où la bouée va se déplacer (*Figure 34 : étalonnage des caméras*).

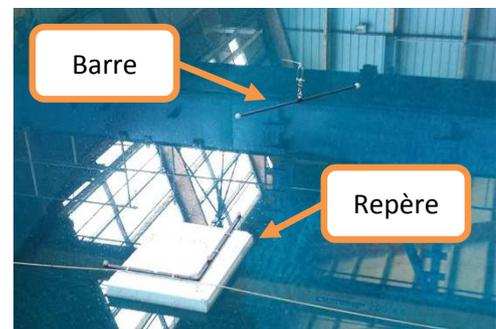


Figure 34 : étalonnage des caméras

### Les essais :

25 tests ont été effectués avec la troisième configuration. 3 types d'essais sont à relever : houle régulière avec ancrage de la bouée (avec le bout d'amarrage, *Figure 32*), houle irrégulière représentant un état de mer réaliste et houle régulière sans ancrage (en dérive, sans bout d'amarrage). Différentes périodes de houle (entre 0.8 et 3.5 secondes) et différentes amplitudes de houle (entre 5 et 55 cm crête à creux) ont pu être testées.

Voici les tests classés en fonction du type :

N° essai	Hauteur crête à creux	Période T	Fréquence	Durée
	cm			
15	20,0	1,25	0,80	50
16	10,0	1,25	0,80	50
18	55,0	2,00	0,50	30
19	10,0	0,80	1,25	32
20	5,0	0,80	1,25	32
21	7,5	1,00	1,00	40
22	15,0	1,00	1,00	40
23	20,0	1,66	0,60	50
24	40,0	1,66	0,60	50
25	27,5	2,00	0,50	30
26	27,5	2,50	0,40	40
27	55,0	2,50	0,40	40
28	20,0	3,00	0,33	40
29	40,0	3,00	0,33	50
30	12,5	3,50	0,29	60
31	25,0	3,50	0,29	60
36	35,0	1,50	0,67	60

Tableau 5 : paramètres des essais pour houle régulière avec ancrage

N° essai	Hs	Tp	Freq	Gamma	Durée
	cm				
17	10,0	1,50	0,67	3,3	300
32	7,0	1,20	0,83	3,3	300
33	17,0	1,95	0,51	3,3	300
34	27,0	2,50	0,40	3,3	300
35	27,0	3,00	0,33	3,3	300

Tableau 6 : paramètres des spectres « Jonswap » pour houle irrégulière avec ancrage

Pour la houle irrégulière (spectre de « Jonswap ») : Hs est la hauteur significative, Tp est la période de pic et Gamma le paramètre de largeur du spectre.

N° essai	Hauteur	Période T	Fréquence	Durée
	cm			
37	7,5	1	1,00	40
38	20	1,66	0,60	50
39	40	1,66	0,60	50
40	10	0,8	1,25	60

Tableau 7 : paramètres des essais pour houle régulière sans ancrage (dérive)

## Méthodes d'analyses et résultats :

### → Pour la houle régulière et irrégulière :

Pour tous les tests, les dérivées numériques ont été appliquées sur les positions de la sonde à houle et du système de trajectométrie. La dérivée seconde de la position permet de calculer les accélérations de la sonde à houle et de la bouée grâce à la trajectométrie. La formule utilisée est la même que pour les essais sur l'hexapode (*Partie IV.1 Essais sur l'hexapode*).

Après calcul des accélérations de la sonde à houle et de la trajectométrie, nous pouvons les comparer aux mesures de l'accéléromètre. Les dérivées ont été utilisées pour les trois types de test.

Les essais en houle régulière et irrégulière ont été traités de la même manière que les essais précédents. Après avoir sélectionné une partie du signal temporel d'une durée égale à la durée du test, un périodogramme moyenné de type Welch est appliqué pour calculer une estimation de la densité spectrale de puissance. Une fenêtre de pondération de type Hann a été choisie. La comparaison est faite avec les 3 signaux à notre disposition, celui de la sonde à houle, de la trajectométrie et de l'accéléromètre. Les mesures des trois axes ont été comparées.

Les mêmes informations que les tests hexapode ont été calculées : la valeur efficace du signal temporel, la valeur du pic de la fondamentale et le niveau de bruit en basses/hautes fréquences dans le domaine fréquentiel. La valeur efficace est calculée sur une durée de 10 secondes pour les houles régulières et n'est pas calculée pour la houle irrégulière car la durée des essais était trop importante (300 sec). Les résultats de chaque test sont sous forme graphique puis numérique (*Annexes 30 à 34*).

### → Effet de la dérive [3] :

Pour les tests sans ancrage, la bouée se déplace dans le sens de la houle. Cette vitesse de déplacement conduit à un décalage fréquentiel par rapport à la fréquence réelle de la houle. Il est possible de calculer la fréquence de la fondamentale en fonction de la vitesse de déplacement de la bouée comme suit.

Sous l'hypothèse d'une houle de Stokes linéaire se propageant dans la direction  $x_1$  à la pulsation  $\omega_1$  dont la surface libre est décrite par :

$$z(x_1, t) = A \cos(kx_1 - \omega_1 t)$$

Une particule se déplaçant à la vitesse constante  $V_x$  le long de la surface libre dans la direction  $x_1$  est soumise au mouvement vertical suivant :

$$z(V_x t, t) = A \cos(kV_x t - \omega_1 t) = A \cos[-(\omega_1 - kV_x)t]$$

La pulsation apparente suivant la direction  $z$  sera donc égale à  $(\omega_1 - kV_x)$  avec  $k = 2\pi/\lambda$  et  $\lambda = 1,56T^2$ . L'introduction des vitesses moyennes de dérive  $\bar{V}_x$  mesurées sur les 4 essais avec dérive conduit aux fréquences apparentes  $\tilde{f} = (\omega_1 - k\bar{V}_x)/2\pi$  reportées dans le tableau ci-dessous. La tendance du décalage du pic de fréquence observée est conforme à l'estimation (en violet).

N° essai	T consigne (s)	f consigne (Hz)	f mesurée trajecto. (Hz)	f mesurée accéléromètre (Hz)	f théorique (Hz)	Vx moyen (mm/s)
37	1	1	0,93	0,93	0,91	138
38	1,66	0,6	0,58	0,58	0,58	106
39	1,66	0,6	0,55	0,55	0,54	278
40	0,8	1,25	1,05	1,07	1,04	208

Tableau 8 : effet de la dérive en pilonnement

On voit ici que les fréquences mesurées par la trajectométrie (en orange) et l'accéléromètre (en vert) sont plus faibles que celle de la consigne (en bleu), cela est dû à la dérive.

Calcul de la fonction de transfert :

La fonction de transfert  $H(f)$  du système complet a été calculée pour les houles régulières. Cela en divisant la valeur efficace de l'accélération de l'accéléromètre par la valeur efficace de l'accélération de la sonde à houle. Cette formule pour chaque test :

$$H(f) \approx \frac{arms\_accéléromètre}{arms\_sondecôté}$$

**fréquence de coupure :** Les Figures 35 et 36 mettent en évidence une chute de la fonction de transfert en pilonnement à partir de 0,8Hz.

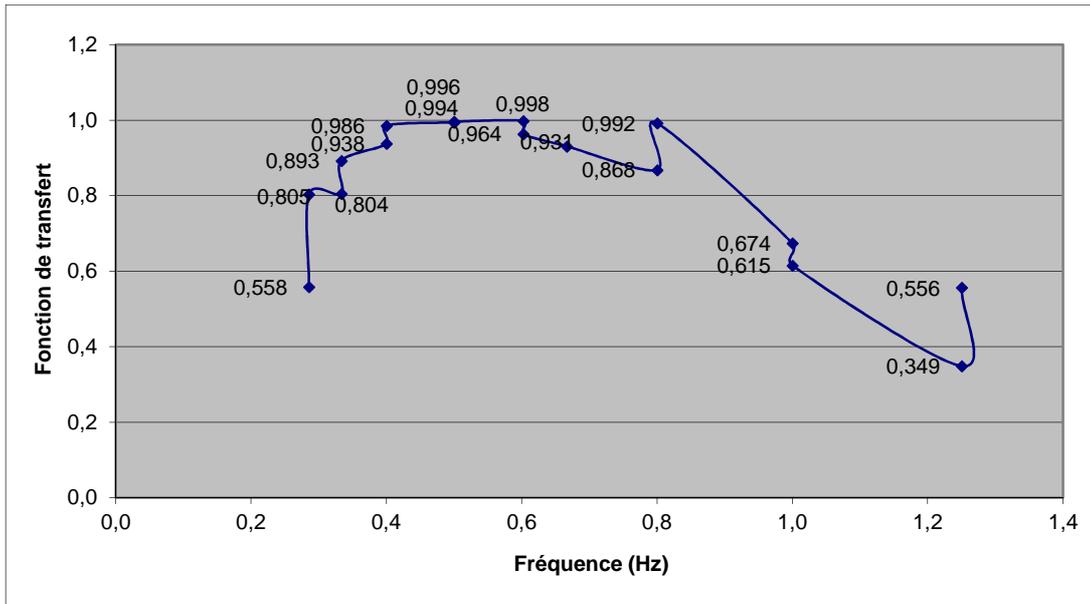


Figure 35 : fonction de transfert pour les houles régulières (échelle linéaire)

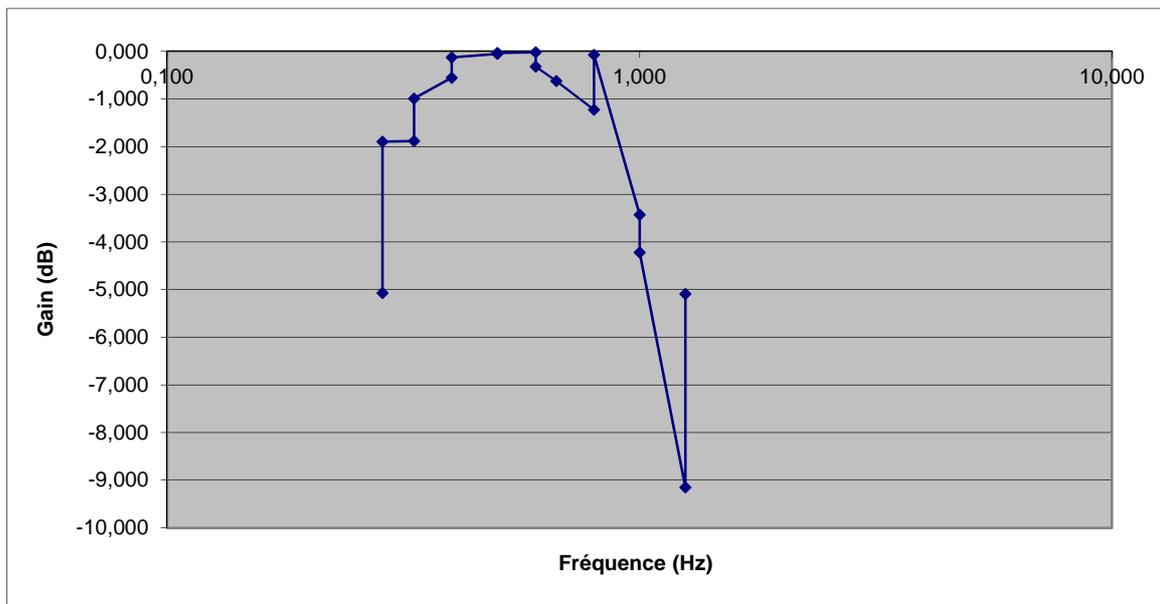


Figure 36 : fonction de transfert pour les houles régulières (échelle logarithmique)

Les fonctions de transfert ci-dessus dévoilent le comportement du système. Elles montrent que la bouée dérivante à une fréquence de coupure à 0.8Hz.

**pen**te : La pente de la fonction de transfert a été calculée pour une hauteur de houle de 10cm ainsi que pour une hauteur de houle de 15cm entre 0,8 et 1,25Hz. Cela à partir du tableau ci-dessous :

Houle régulière avec ancrage						ST LIS3DH	SONDE COTE	Fonction de transfert	Gain (dB)
N° test	Type test	Hauteur cm	Période s	Fréquence Hz	Durée s	Valeur RMS pilonnement m/s <sup>2</sup>			
30	Houle régulière	12,5	3,50	0,286	60	0,13	0,233	0,558	-5,068
31	Houle régulière	25,0	3,50	0,286	60	0,279	0,347	0,804	-1,895
28	Houle régulière	20,0	3,00	0,333	40	0,293	0,364	0,805	-1,885
29	Houle régulière	40,0	3,00	0,333	50	0,59	0,661	0,893	-0,987
26	Houle régulière	27,5	2,50	0,400	40	0,603	0,643	0,938	-0,558
27	Houle régulière	55,0	2,50	0,400	40	1,245	1,263	0,986	-0,125
18	Houle régulière	55,0	2,00	0,500	30	1,937	1,948	0,994	-0,049
25	Houle régulière	27,5	2,00	0,500	30	1,036	1,04	0,996	-0,033
23	Houle régulière	20,0	1,66	0,602	50	1,064	1,066	0,998	-0,016
24	Houle régulière	40,0	1,66	0,602	50	2,205	2,288	0,964	-0,321
36	Houle régulière	35,0	1,50	0,667	60	3,016	3,24	0,931	-0,622
15	Houle régulière	20,0	1,25	0,800	50	1,622	1,868	0,868	-1,227
16	Houle régulière	10,0	1,25	0,800	50	0,864	0,871	0,992	-0,070
21	Houle régulière	7,5	1,00	1,000	40	0,756	1,122	0,674	-3,429
22	Houle régulière	15,0	1,00	1,000	40	1,462	2,376	0,615	-4,218
19	Houle régulière	10,0	0,80	1,250	32	0,871	2,498	0,349	-9,151
20	Houle régulière	5,0	0,80	1,250	32	0,641	1,152	0,556	-5,092

Tableau 9 : fonction de transfert

Pente pour une houle de 10 cm :

$$pente (dB / décade) \approx \frac{20 \cdot \log(0,992) - 20 \cdot \log(0,349)}{1,25 - 0,8} \approx -20,16$$

Pente pour une houle de 15 cm :

$$pente (dB / décade) \approx \frac{20 \cdot \log(0,93) - 20 \cdot \log(0,615)}{1 - 0,8} \approx -17,96$$

La pente de la fonction de transfert après la fréquence de coupure de 0,8Hz est d'environ -19 dB/décade à +/-1dB de marge d'erreur.

### Conclusion des tests au bassin :

#### Sur l'accéléromètre :

Suite aux essais effectués sur l'hexapode, la configuration de l'accéléromètre avec une fréquence d'échantillonnage de 25Hz a montré une nouvelle fois des mesures satisfaisantes. Nous mesurons des valeurs très proches de la consigne. Par contre, les valeurs mesurées sont plus faibles au-delà de 0.8Hz car nous sommes limités par le comportement hydrodynamique de la bouée.

#### Sur les propriétés hydrodynamiques mesurées par le « Laboratoire Comportement des Structure en Mer » :

La réponse en pilonnement de la bouée chute au-delà de 0,8 Hz. La vitesse de dérive de la bouée affecte la fréquence de rencontre des vagues, ce qui se manifeste par un décalage en fréquence du pic de réponse par rapport à la fréquence d'excitation.

#### Sur le système complet :

Pour mesurer les bonnes amplitudes aux fréquences de vagues supérieures à 0.8Hz, il faudrait une structure plus petite qui puisse épouser parfaitement le mouvement des vagues et ainsi avoir une meilleure fonction de transfert.

La conception d'une bouée plus petite était prévue, elle a été fabriquée pendant ce projet de fin d'étude mais elle n'a pas encore été testée (*Partie V. REFLEXIONS ET CONCEPTION MECANIQUE*).

#### IV.4 Test de consommation

Un test de consommation a été effectué en extérieur avant la première campagne en mer (Partie IV.5 Campagne de mesures sur la côte Atlantique française). La photo du test est en Annexe 35 : test de consommation en extérieur.

Le test s'est déroulé avec le câblage suivant :

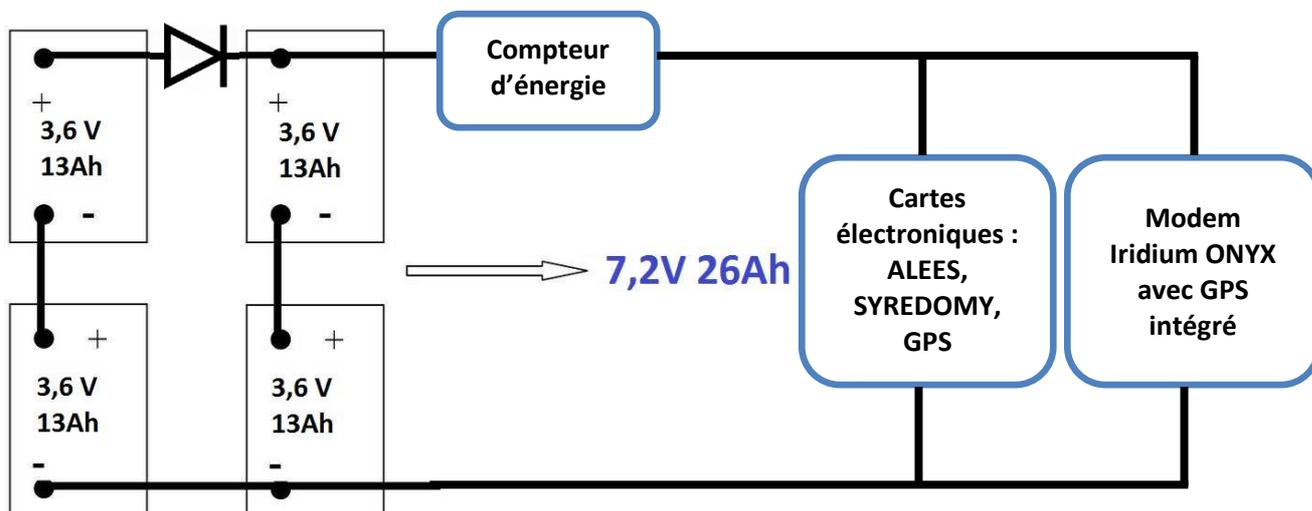


Figure 37 : câblage du test de consommation

#### Objectif du test :

Il faut vérifier que le système tient l'autonomie souhaitée par le cahier des charges, c'est-à-dire 15 jours d'autonomie pour la mission d'octobre 2015.

#### Conditions du test :

Il y avait 4 piles lithium, la tension aux bornes des piles était de 7,2V. La capacité d'après le constructeur est de 26Ah. L'accéléromètre effectuait des mesures à 25Hz et le GPS transmettait ses trames toutes les secondes. Le modem ONYX émettait la position GPS toutes les 10 minutes et le système ne passait jamais en mode veille. Le système est resté alimenté pendant 1 heure.

#### Résultats du test :

temps (h)	consommation (Ah)	capacité des piles(Ah)	autonomie (heures)	autonomie (jours)
1	0,037	26	705,0	29,4

Les tests ont montrés une autonomie de 30 jours environs. Le cahier des charges indique que l'autonomie doit être de 15 jours. Nous avons donc choisi 2 piles en série (autonomie de 15 jours) pour effectuer la première campagne de mesure en mer les 1, 2 et 3 juillet (Partie IV.5 Campagne de mesures sur la côte Atlantique).

#### Point sur l'étude de faisabilité :

Les essais au bassin ont prouvé que l'on pouvait mesurer des vagues jusqu'à 0,8Hz avec la bouée actuelle et le test de consommation a validé l'autonomie du système. Il nous fallait ensuite savoir si les mesures de l'accéléromètre permettaient bien de mesurer différents états de mer. Deux déploiements en mer ont donc eu lieu (Partie IV.5 Campagne de mesures sur la côte Atlantique française et Partie IV.6 Campagne de mesures en mer d'Iroise).

#### IV.5 Campagne de mesures sur la côte Atlantique française

La première campagne en mer s'est déroulée du 1 au 3 juillet. Le but de celle-ci était de mesurer différents états de mer avec la configuration qui sera utilisée pour la campagne d'octobre.

##### Configuration de la bouée :

Comme les essais précédents, l'électronique de la bouée est intégrée dans la sphère en verre, nous ajoutons la coque et la collerette (Figure 38). Par contre, nous avons changé la disposition interne pour mieux répartir le poids et pour mettre l'accéléromètre encore plus proche du centre de la sphère. L'axe qui mesurait le pilonnement était l'axe Z.



Figure 38 : configuration de la bouée

##### Déroulement d'un essai :

Avant la mise à l'eau de la bouée dérivante, il faut alimenter le système. L'alimentation du système passe par un relais reed, le système est éteint s'il y a un aimant présent devant ce relais. Pour chaque essai, il faut retirer l'aimant présent devant le capteur et ainsi alimenter la bouée. Ensuite nous attendons quelques minutes sur le bateau avant le déploiement pour que la position GPS soit trouvée. Pour 2 déploiements, le GPS n'a pas trouvé sa position. Il faut attendre au moins 5 minutes dans une zone dégagée de tout obstacle avant le déploiement. Il y a eu 5 déploiements au total.

##### Calcul de la hauteur significative de la houle :

La hauteur significative est 4 fois l'écart type de l'élévation de la surface. Ce calcul a été appliqué sur le spectre d'élévation de chaque déploiement. Une explication sur le spectre d'élévation du troisième déploiement est faite ci-dessous :

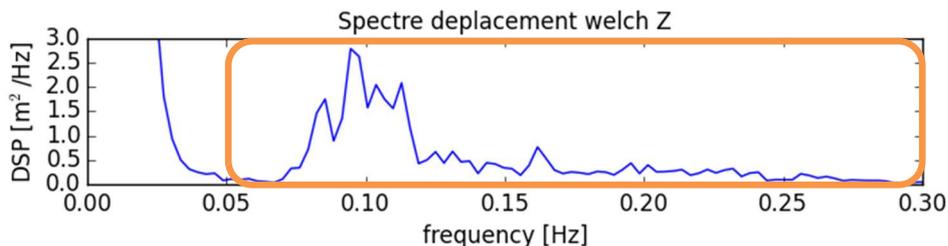


Figure 39 : spectre d'élévation du deuxième déploiement

Le bruit de l'accéléromètre est compris dans les fréquences inférieures à 0,05 Hz (toujours causé par la division par  $\omega^4$ ). La hauteur significative est donc calculée dans la zone encadrée en orange pour éviter d'inclure le bruit de l'accéléromètre. Le deuxième déploiement a montré une hauteur significative de 1.8m et une période de houle de 11 secondes.

##### Comparaison des données et résultats :

Les mesures de la bouée ont été comparées avec le site de prévision [www.previm.org](http://www.previm.org). Les données des vagues (hauteur, période, direction) proviennent du modèle numérique WAVEWATCHIII® et sont calculées au LPO. Les données de vent nous sont fournies par le service MétéoFrance. Les détails des cinq déploiements sont en Annexes 36 à 40. La comparaison des mesures de la bouée dérivante par rapport aux prévisions est reportée synthétiquement dans le tableau ci-dessous :

N° déploiement	1	2	3	4	5
Prévisions (hauteur/période)	2-2,25m/ 12-13sec	2-2,25m/ 11-12sec	1,25-1,5/ 11-12sec	0,75-1,25m/ 9-10sec	0,5-0,75m/ 9-10sec
Bouée (hauteur/période)	2m/12sec	1,8m/11sec	1,4/10sec	0,8m/ 6-10,5sec	0,4m/10sec

Tableau 10 : synthèse des résultats



#### Conclusion sur les essais en mer :

La bouée a été déployée 5 fois, il n'y a eu aucuns soucis d'ordre technique pendant ces déploiements et la bouée a effectué des mesures en continue. C'est donc encourageant pour la campagne programmée en octobre 2015.

Les mesures de la bouée correspondent avec les prévisions du site [www.previmer.org](http://www.previmer.org) et l'état de mer observé sur place. Il faut rappeler que les données du site sont seulement des prévisions, on ne peut donc pas s'en servir comme référence pour valider les mesures de la bouée. La raison pour laquelle nous avons comparé les mesures de la bouée avec WAVEWATCHIII® est qu'à terme, la bouée dérivante permettra l'amélioration de ce modèle numérique.

Une solution pour savoir si les mesures de notre bouée dérivante sont bonnes est de déployer celle-ci non loin de la bouée « Pierres Noires ». La bouée « Pierres Noires » est exposée à la houle et aux forts courants, elle est donc intéressante pour comparer ses mesures avec la nôtre. Nous avons saisi l'opportunité pour la déployer dans cette zone pendant le mois d'août, les résultats sont disponibles en *partie IV.6 Campagne de mesures en mer d'Iroise*.

#### IV.6 Campagne de mesures en mer d'Iroise

Le 4 août, une mesure a été faite non loin de la bouée « Pierres Noires ». Nous avons anticipé le choix de cette date en regardant les prévisions pour avoir une houle longue et de forte amplitude. Nous étions à 1 mile de la bouée, l'état de mer ne permettant pas l'accès au plus près de celle-ci. Nous avons comparé les mesures de cette bouée avec la bouée dérivante. L'objectif était la validation du prototype. La configuration est la même que pour les essais effectués sur la côte Atlantique (*Partie IV.5 Campagne de mesures sur la côte Atlantique française*).

La bouée a été mise à l'eau à 9 heure TU, la position était N 48° 17,212' W 4° 56,534'. Elle a été récupérée à 10 heure TU en position N 48° 16,358' W 4° 55,674'. Nous avons noté l'état de mer apparent suivant : houle de nord-ouest de 11 sec de période, 5m de hauteur, une mer de vent d'environ 7 secondes de période s'y ajoute, le vent vient de l'ouest et sa force est de 8 nœuds.

Le trajet effectué par la bouée était le suivant :



Figure 40 : zone de déploiement et tracé GPS de la bouée

La bouée a parcourue une distance d'environ 1866 mètres en 1 heure d'après les positions enregistrées par le GPS. La vitesse de dérive est donc d'environ 1 nœud. La mesure de la bouée dérivante est la suivante :

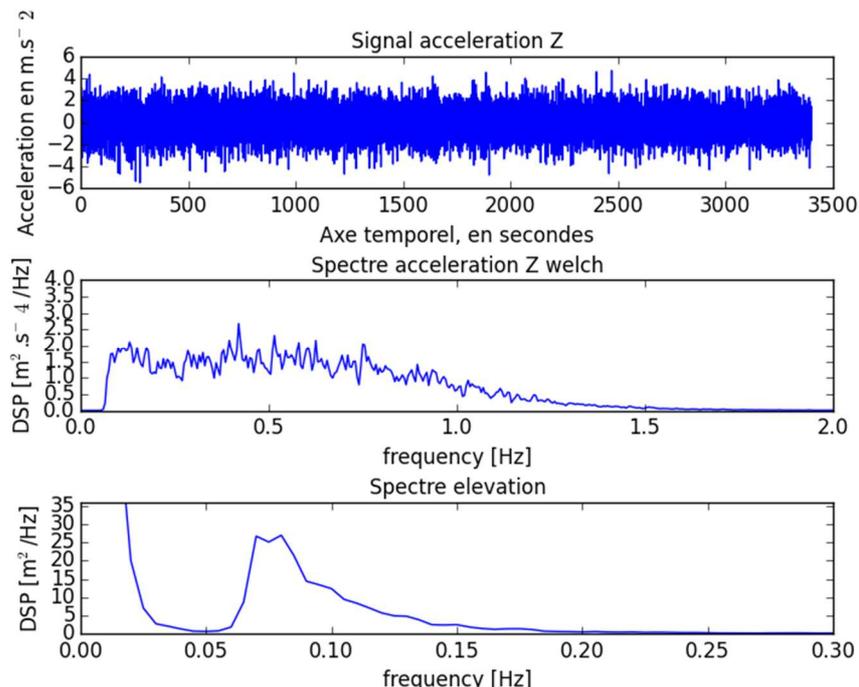


Figure 41 : mesure de la bouée dérivante

Nous obtenons ici une houle longue, la période moyenne dans la bande de fréquence de 0.07 à 0.58 Hz est de 10,8 secondes. La hauteur significative calculée est de 4,1 mètres.

La bouée Pierres Noires est une bouée Datawell de 90 cm de diamètre amarrée à la position N 48° 17,420' W4° 58,100'. Les données de cette bouée sont envoyées à l'Ifremer par le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).



Figure 42 : bouée "Pierres Noires"

Voici la comparaison des spectres d'élévations entre la bouée « Pierres Noires et la bouée dérivante :

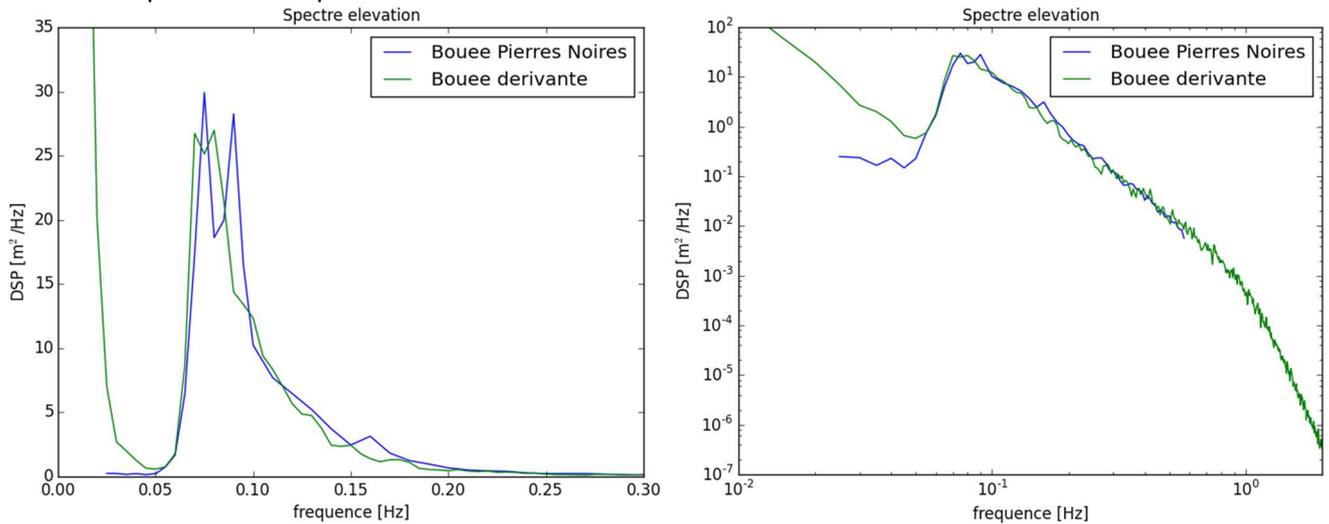


Figure 43 : comparaison des spectres d'élévation en échelle linéaire et logarithmique

La bouée « Pierres Noires » calcule une hauteur significative de 4,3m et une période moyenne de 10.4 secondes dans la même bande de fréquence (0.07 à 0.58 Hz). Ce qui est très similaire aux mesures de la bouée dérivante. Cette différence de 4% peut s'expliquer par un décalage en temps de l'acquisition mais aussi à la variabilité statistique de l'état de mer [4].

### Conclusions :

Sur le spectre d'élévation, on voit que l'on pourrait détecter des vagues à partir de 0.05Hz (20 secondes de périodes). Cela répondrait au cahier des charges mais nous n'avons pas pu rencontrer ce type de houle qui est peu fréquente sur notre façade océanique. La fréquence minimale observée par notre système est 0,071 (14 secondes de période). Pour la fréquence maximale, nous pouvons mesurer des vagues jusque 0.8Hz (1.25 sec de période) avec le système actuel. Le fait de construire une bouée plus petite nous permettra d'obtenir une limite plus haute dans les hautes fréquences. On pourrait ainsi répondre au cahier des charges en atteignant les 2Hz de fréquence maximale.

Après plusieurs essais pour définir les caractéristiques de l'accéléromètre avec l'essai sur l'hexapode et l'essai au bassin. Les mesures en mer sur la côte Atlantique et en mer d'Iroise ont permis la validation du prototype de bouée dérivante. Nous savons que les mesures fournies par celle-ci (période de houle, hauteur significative, position GPS) sont de bonne qualité.

## V. REFLEXIONS ET CONCEPTION MECANIQUE

### V.1 Rappel du cahier des charges

Des contraintes doivent être respectées pour le développement mécanique, celles-ci ont été écrites dans le cahier des charges (*Partie II.2 : Cahier des charges*). La bouée doit :

- Être étanche
- Résister aux chocs/collisions
- S'ouvrir et se fermer facilement
- Avoir un système d'alimentation facile d'accès
- Être stable et suivre parfaitement la forme des vagues
- Laisser passer les ondes électromagnétiques pour communiquer avec le système depuis l'extérieur

### V.2 Réflexions sur différents types de bouées

Il y a eu un travail important de réflexion sur la mécanique et l'intégration de l'électronique dans le contenant.

Les premières interrogations portaient sur le système d'ouverture/fermeture de la bouée. Celui-ci doit être simple mais surtout ne pas se fragiliser sur le long terme. Il doit aussi garder une bonne étanchéité. Nous avons différentes sortes de bouée au LPO, les avantages et inconvénients ont pu être dressés.

Type de bouée	Avantages	Inconvénients
	On pourrait séparer la sphère en deux et y installer les composants. Ensuite fermer les deux parties avec une vis passant par le trou central et coller celles-ci pour rendre la sphère étanche.	Le trou est traversant, il est difficile de positionner le matériel convenablement à l'intérieur.
	Système facile en fermeture/ouverture grâce au filetage.	Il faut mettre de la colle pour assurer une étanchéité entre le couvercle et le corps. La forme est non sphérique.
	Étanche et lest déjà incorporé au fond de la sphère.	Système d'ouverture/fermeture difficile car il y a 24 vis à visser/dévisser. Le plastique et les vis ne dureront pas avec un usage trop répété.

	<p>Fermeture/ouverture facile avec jonc et étanchéité avec un joint piston.</p>	<p>Forme cylindrique trop étroite.</p>
	<p>Pièce fabriquée par imprimante 3D, il faut dessiner les pièces par CAO. Les réalisations sont personnalisées et avec des formes spécifiques. Le coût de fabrication est faible en étant propriétaire d'une imprimante.</p>	<p>Nous n'avons pas d'expériences sur cette technologie (précision, étanchéité, durabilité, résistance aux chocs).</p>

Tableau 11 : comparaison des bouées à disposition

Il ne faut pas perdre de vue que le coût global de la bouée doit être inférieur à 1k€. Voici la synthèse de coût :

Description	Coût (€)
Sphère Nautilus 10"	800
Prise de vide	150
Support intérieur sphère	150
Relais reed	20
Altimètre	15
Carte ALEES	100
Carte SYREDOMY	225
Carte Iridium	70
Carte GPS	140
Modem Iridium	320
Antenne Iridium	50
Antenne XBEE	10
Antenne GPS active	25
Carte mémoire microSD 8Go	40
Pack pile (6 LSH20)	90
<b>TOTAL</b>	<b>2205</b>

Tableau 12 : synthèse des coûts [5]

La synthèse ci-dessus liste le matériel utilisé pour les premiers essais de la bouée dérivante. Pour réduire les coûts, nous pouvons nous affranchir de 5 matériels et les remplacer par du matériel plus approprié.

La Sphère Nautilus 10" est une sphère en verre déjà utilisée au laboratoire et le système de fermeture est assez simple, c'est pour cette raison que nous la réutilisons. Mais son inconvénient principal est qu'elle coûte chère (800€) car elle est faite pour aller en profondeur (jusqu'à 10000 mètres).

La bouée dérivante restera en surface et nous recherchons un contenant le moins cher possible, il n'y a donc pas d'intérêt à garder la sphère en verre sur le long terme. Le fait de s'affranchir de la sphère retire 800 euros sur le coût total de la bouée. Associer à celle-ci, il y a la prise de vide qui permet d'assembler les deux demi-sphères et l'altimètre pour contrôler le vide intérieur. Retirer ce matériel enlèverait 965 € (800+ 150+15).

Nous pouvons aussi retirer 2 voire même 4 piles à la suite du test de consommation (*Partie IV.4 Test de consommation*) ainsi que le support interne, cela retirerait 180 € (150+30). Avec ces suppressions, le coût de la bouée serait de 1060 € (2205-965-180) sans compter le coût de l'impression 3D d'environ 40€. On se rapproche de l'objectif, mais le but étant d'arriver à un prototype fonctionnel et le plus rapidement possible, nous utilisons le matériel existant. Ce matériel pourra être remplacé plus tard afin de continuer cette réduction des coûts. Par exemple, les cartes SYREDOMY et ALEES coûtent 325 € (225+100) et une partie des composants n'est pas utilisée. On pourrait penser au développement d'une autre carte électronique spécifique au projet qui ferait atteindre l'objectif.

### V.3 Solutions techniques retenues

Suite aux réflexions autour de la forme de la bouée, de son système de fermeture et de son coût, la décision prise est de réaliser la bouée dérivante grâce à une imprimante 3D.

Le groupe technique ne possédait pas d'imprimante 3D, mais nous avons obtenu un soutien financier pour l'acheter. En effet, un appel à projet du laboratoire auquel a été soumis la proposition d'achat l'a rendu possible en avril.

La conception de la bouée sera assistée par ordinateur (CAO) en prenant en compte les avantages des bouées présentes au laboratoire pour répondre au cahier des charges.

Pour répondre à la contrainte « Etre stable et suivre parfaitement la forme des vagues », plusieurs choix ont dû être faits. Pour la forme de la bouée, nous avons opté pour une sphère. Le choix de la forme sphérique a été fait car les moments d'inertie au centre d'une sphère par rapport aux 3 axes sont égaux, les mesures de notre accéléromètre ne seront pas influencées s'il se trouve au centre de la sphère. D'autres paramètres sont à prendre en compte, la flottabilité de la bouée va influencer la stabilité pour suivre la surface et la taille de la bouée : plus la bouée sera petite et mieux on mesurera les petites vagues. Notre bouée aura une taille appropriée pour pouvoir intégrer les cartes électroniques, elle sera plus petite que la sphère Nautilus (210mm extérieur) au lieu de 400mm avec la protection et la colerette. Du lest sera fixé à l'intérieur de la bouée afin que la ligne de flottabilité soit au milieu de la sphère. Il est préférable de fixer le lest plutôt que de l'attacher sur un bout à l'extérieur de la bouée, cela ferait apparaître une fréquence de résonance. La stabilité sera meilleure en ajoutant une collerette autour de la bouée, celle-ci a été anticipée dans la conception mais n'a pas été fabriquée.

En réponse à la contrainte d'étanchéité, différents matériaux utilisés par les imprimantes 3D sont étanches. Celui que nous allons utiliser pour la fabrication de la bouée est le PLA (acide polylactique), ce matériau sert déjà pour fabriquer des bouteilles ou encore des gobelets. Ce matériau laisse aussi passer les ondes électromagnétiques pour communiquer avec le système depuis l'extérieur de la bouée. Pour assurer l'étanchéité entre les 2 demi-sphères, un joint de 190mm de diamètre et de 5mm d'épaisseur a été choisi.

Pour répondre à la contrainte « avoir un système d'alimentation facile d'accès », il y aura une vis en plastique à dévisser pour accéder à l'alimentation. Le système d'alimentation est composé de 4 piles

(2\*2 piles en série et les bancs de piles en parallèle) qui se trouvera autour d'un support cylindrique pour une bonne répartition du poids. Les piles contribueront aussi au rôle de lest.

Pour la contrainte d'ouverture/fermeture, 2 bouées du laboratoire peuvent y répondre : soit le système avec le joint piston et le jonc, soit le système avec bouchon fileté. La solution qui permet une simplification et une rapidité des manipulations est le système avec joint + jonc, le joint permet l'étanchéité du système et le jonc empêche la séparation des 2 demi-sphères. Nous n'aurons pas besoin de mettre de la colle pour assurer l'étanchéité. De plus, ce système de fermeture s'abimera de manière moindre dans le temps qu'avec les autres possibilités.

Nous n'avons pas assez d'expérience en impression 3D pour connaître la résistance des matériaux après impression. Celle-ci va varier en fonction de la qualité du matériau utilisé et des réglages choisis pour l'impression (température de chauffe, épaisseur des parois, etc.). Nous avons choisi une épaisseur totale de 7 mm et des parois de 2mm pour le premier prototype.

#### V.4 Conception de la bouée

Le logiciel SolidWorks a été utilisé pour la conception de la bouée. Grâce à mes précédentes formations, j'ai acquis des compétences en CAO. Celles-ci m'ont permis de dessiner la bouée en autonomie.

Ci-dessous, voici des images de la demi-sphère inférieure, de la demi-sphère supérieure et de l'assemblage des pièces conçues sur SolidWorks. Les mises en plans sont en *Annexe 41 et 42* :



Figure 44 : différentes vues de la demi-sphère inférieure

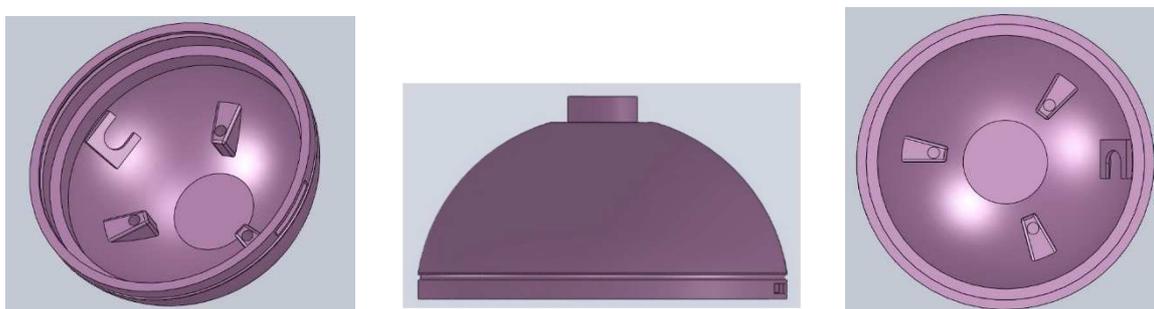


Figure 45 : différentes vues de la demi-sphère supérieure

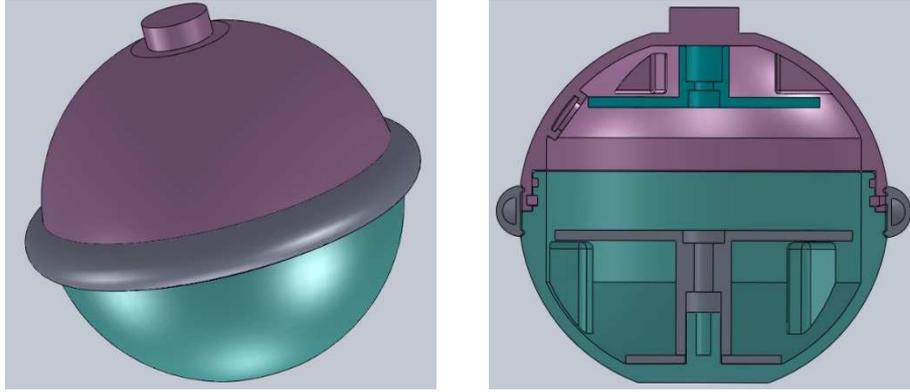


Figure 46 : différentes vues de l'assemblage

Dans cette sphère, des supports ont aussi été fabriqués par imprimante 3D. Le support de couleur grise que l'on aperçoit sur la vue en coupe de la *Figure 46* sera vissé et reposera sur les 3 embases de la demi-sphère inférieure. Il accueillera les cartes SYREDOMY+ALEES ainsi que les piles en dessous du support. L'autre support de couleur turquoise sera fixé de la même manière et accueillera les cartes GPS et IRIDIUM ainsi que leurs antennes. Un support a été prévu pour fixer un relais reed (visible sur la *Figure 45*), celui-ci sert à alimenter ou couper l'alimentation sans ouvrir la bouée. Nous avons ajouté une collerette extérieure pour une meilleure stabilité, elle sera aussi fabriquée par imprimante 3D mais avec une matière plus souple appelée « ninja-flex » ou « soft-PLA ». Cette collerette permettra aussi une meilleure résistance aux chocs et évitera le passage de gouttes d'eau.

#### V.5 Fabrication de la bouée

Avant l'impression des pièces, des étapes préliminaires sont nécessaires. Premièrement, il faut convertir le fichier SolidWorks au format .STL afin qu'il soit lisible par un logiciel de stéréolithographie. La stéréolithographie permet de fabriquer des objets solides à partir de modèles numériques. Ensuite, on peut définir les paramètres d'impression à partir du logiciel. Dans ces paramètres, on retrouve la vitesse d'impression, l'épaisseur des couches, le taux de remplissage de la pièce etc. La pièce peut ensuite être imprimée par la machine. Le logiciel utilisé se nomme Cura, une image de ce logiciel est en *Annexe 43 : fichier .STL ouvert sur le logiciel Cura*.

Les photos des pièces imprimées et assemblées sont en *Annexe 44*.

## VI. DIFFICULTES RENCONTREES

### *VI.1 Programmation en langage Python*

Une période d'environ 3 mois a été nécessaire pour acquérir de l'autonomie en langage Python. La mise en place du programme était complexe, j'ai lu des documentations pour m'imprégner de ce langage de programmation et demander de l'aide aux personnes expérimentées quand j'en avais besoin. Une recherche a dû être faite pour se procurer les modules complémentaires et ainsi permettre les calculs de spectres.

### *VI.2 Tests sur l'hexapode et au bassin à houle*

Les circonstances de chaque test étaient différentes, on peut s'attendre à des surprises même en anticipant le matériel nécessaire et les différentes étapes. Pour les tests effectués sur l'hexapode, on ne pouvait pas anticiper le fait que l'hexapode générait des vibrations, nous étions les premiers à rencontrer ce problème. Pour la maquette au bassin, la structure de trajectométrie a posé problème et a fait décaler le planning des essais. Il a fallu à chaque fois trouver les bonnes solutions pour palier aux problèmes rencontrés.

### *VI.3 Analyse et validation des données*

La première configuration de l'accéléromètre avait une fréquence d'échantillonnage trop faible (10Hz), ce problème a été remarqué pendant l'analyse des données car la valeur efficace des accélérations était trop faible par rapport aux autres accéléromètres. Du temps supplémentaire a été demandé pour effectuer d'autres essais avec les différentes configurations.

La mise en place des fonctions pour l'analyse de données a été complexe, j'ai repris les cours de l'ENSTA Bretagne pour mettre en place les calculs de densité spectrale.

L'analyse de spectres de vagues est un domaine spécifique de l'analyse spectrale. J'ai eu de l'aide avec les chercheurs qui étudient les interactions vagues-courant pour avoir les bases et pour mettre en place le calcul de hauteur significative.

### *VI.4 Imprimante 3D*

La plupart des projets utilisant les imprimantes 3D n'ont pas autant de contraintes que la bouée dérivante. Très peu de pièces en France sont réalisées pour avoir un assemblage étanche en imprimante 3D. Ce problème est sûrement lié au fait que c'est une technologie très récente et peu éprouvée.

Il nous a fallu environ 2 mois pour maîtriser le fonctionnement de l'imprimante et les paramètres d'impressions. Au début nous avions des différences de cotations entre le plan SolidWorks et la pièce imprimée en 3D. Nous avons ensuite compris que l'on pouvait améliorer les tolérances du fichier .STL. Le fait de fondre du plastique implique un niveau de précisions aléatoire et les tolérances sont moins fines que pour les pièces métalliques. La première version avait des tolérances pour un assemblage métallique, nous avons mis à jour ce point pour la deuxième version.

## VII. LES AMELIORATIONS FUTURES

Actuellement, le système est encore au stade de prototype et utilise la sphère en verre. Nous avons pensé aux améliorations à mettre en place dans la continuation du projet :

### ***VII.1 Synchronisation des bouées***

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

### ***VII.2 Compas magnétique***

Le compas magnétique a été acheté (*Partie III.4 : Achat d'un magnétomètre/boussole*), il faut l'intégrer au système et valider son fonctionnement pour avoir un cap plus précis que celui actuellement fourni par le GPS. Il faudra vérifier que les mesures délivrées par ce compas sont bonnes et que les mesures ne sont pas perturbées par les composants de la bouée (piles, cartes). Un étalonnage sera nécessaire.

### ***VII.3 Calcul des spectres***

Pour le moment, l'analyse spectrale est post-traitée et les données présentes dans la carte  $\mu$ SD sont trop volumineuses pour être envoyées par le réseau satellitaire Iridium. Les spectres de vagues pourraient être calculés directement sur la carte électronique en langage C puis envoyés par Iridium.

### ***VII.4 Essai du nouveau prototype en imprimante 3D***

La fabrication de plusieurs sphères a été réalisée par imprimantes 3D, il faut tester ce nouveau contenant afin de vérifier les améliorations apportées par celui-ci.

### ***VII.5 Electronique***

Les cartes électroniques du projet SYREDOMY ont été utilisées pour comprendre toutes les problématiques du projet mesure vagues. Une fois que les composants utiles seront validés, nous pourrons concevoir une carte électronique dédiée à la bouée dérivante. Le coût du système serait moindre.

## VIII. CONCLUSION

### *VIII.1 Sur le projet*

Beaucoup de tâches étaient à accomplir pendant ces 6 mois et à mon arrivée les priorités étaient difficiles à fixer. Au fur et à mesure, cette difficulté s'est estompée car les discussions et les réunions m'ont permis de définir des échéances et ainsi d'avancer de manière méthodique sur le projet.

Le développement de la bouée dérivante a fait appel à de la polyvalence, j'ai eu la chance d'effectuer des tâches très diversifiées en informatique avec le développement logiciel, en électronique avec la mise en place d'essais et en Mécanique avec la conception et la fabrication de la bouée dérivante.

Ce projet étant très peu répandu, la conception et la validation du prototype a demandé l'utilisation de moyens technologiques pointus (hexapode, bassin à houle). Sans ces technologies, nous n'aurions pas pu effectuer une validation rigoureuse du prototype et dans des conditions contrôlées. Nous avons maintenant connaissance des caractéristiques de notre système.

L'utilisation de l'imprimante 3D montre encore une fois la technicité du projet. Le processus de fabrication a mis plusieurs mois avant d'être établi du fait du manque de connaissance sur cette technologie et des contraintes imposées par le cahier des charges. Nous sommes confiants sur l'étanchéité et la robustesse des pièces, cette réalisation donne une valeur ajoutée au projet.

Le Laboratoire de Physique des Océans dispose aujourd'hui d'une bouée dérivante fonctionnelle qui sera déployée en octobre 2015 pour une campagne de mesures. Cependant, cette bouée est 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.

### *VIII.2 Sur le plan personnel*

Ce projet m'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 repris les cours de l'ENSTA Bretagne et ainsi pu lier la théorie à la pratique. Le fait de travailler sur un cas concret m'a fait beaucoup apprendre dans ce domaine. J'ai de meilleures connaissances en analyse spectrale et je suis maintenant capable de les appliquer aux mesures de vagues.

La conception de la bouée par CAO m'a fait réutiliser mes compétences en dessin industriel et pour la fabrication, c'était la première fois que je voyais une de mes réalisations se fabriquer sous mes yeux. Cet accomplissement me donne une grande satisfaction. Des compétences supplémentaires ont été acquises durant ces 6 derniers mois de formation grâce à l'utilisation de cette technologie.

J'ai apprécié le fait de travailler sur ce tout nouveau projet. Pendant mon apprentissage, j'avais principalement travaillé sur le projet SYREDOMY qui était en fin de développement. J'ai donc eu plus de liberté et d'autonomie dans le développement de cette bouée. Le fait d'être acteur du projet m'a permis d'être force de proposition lorsqu'il y avait des discussions autour des problématiques rencontrées.



Ce projet était complet sur multiples points : j'ai rencontré des personnes expertes dans leur domaine qui m'ont partagées leur savoir, utilisé des moyens de hautes technologies, acquis de nouvelles compétences et amélioré certaines. J'ai le sentiment que ce projet et toutes les tâches accomplies seront un tremplin pour décrocher un premier emploi en tant qu'ingénieur.

## IX. LEXIQUE

**FIPA** : Formation d'Ingénieur Par Alternance  
**ENSTA** : Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées  
**IFREMER** : Institut Français pour l'Exploitation de la MER  
**LPO** : Laboratoire de Physique des Océans  
**CNEXO** : Centre National pour l'Exploitation des Océans  
**ISTPM** : Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes  
**MESR** : Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
**MAAF** : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.  
**MEDDE** : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie  
**RBE** : Ressources Biologiques et Environnement  
**REM** : Ressources physiques et Écosystèmes de fond de Mer  
**ODE** : Océanographie et Dynamique des Écosystèmes  
**IMN** : Infrastructures Marines et Numériques  
**IPEV** : Institut polaire français Paul-Emile Victor  
**CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique  
**UBO** : Université de Bretagne Occidentale  
**IRD** : Institut de Recherche pour le Développement  
**UMR** : Unité Mixte de Recherche  
**CTD** : Conductivity Temperature Depth  
**ADCP** : Acoustic Doppler Current Profiler  
**SAR** : Synthetic Aperture Radar (radar à synthèse d'ouverture)  
**APTE** : Application aux Techniques d'Entreprise  
**FAST** : Function Analysis System Technique  
**UART** : Universal Asynchronous Receiver Transmitter  
**SYREDOMY** : SYstème de REcupération de DONnées par Messagers hYperfréquence  
**GPS** : Global Positioning Satellite  
**ALEES** : Advanced Low Energy Electronic System  
**RDT/EIM** : Recherche et Développements Technologiques, service Électronique Informatique et Mesures in situ  
**RTC** : Real Time Clock  
**RAM** : Random Access Memory  
**FATFS** : FAT File System  
**USB** : Universal Serial Bus  
**IDE** : Integrated Development Environment (Environnement de développement)  
**IGALTI** : InfraGravity waves and satellite ALTImetry  
**MEMS** : MicroElectroMechanical System (microsystème électromécanique)  
**I2C** : Inter Integrated Circuit  
**FIFO** : First In First Out FIFO (premier arrivé premier sorti)  
**SPI** : Serial Protocol Interface  
**LOS** : Laboratoire d'Océanographie Spatiale  
**RMS** : Root Mean Square (valeur efficace ou moyenne quadratique)  
**TF** : Transformée de Fourier  
**DSP** : Densité Spectrale de Puissance  
**UTC** : Universal Time Coordinated (Temps Universel Coordonné)  
**CAO** : Conception Assistée par Ordinateur  
**PLA** : acide polylactique

## X. TABLE DES REFERENCES

- [1] : Fonctionnement d'un accéléromètre <http://dirac.epucfe.eu/projets/wakka.php?wiki=P08A08index>
- [2] : <http://www.selectronic.fr/carte-magnetometre-3-axes-hmc5883l.html>
- [3] : Alan TASSIN, CHALONY Sébastien, OHANA Jérémy – Essai d'un prototype de bouée dérivante pour la mesure des vagues
- [4] : G Rodríguez, C Guedes Soares, U Machado - Uncertainty of the sea state parameters resulting from the methods of spectral estimation - Ocean Engineering 1999, 991-1002
- [5] : Michel HAMON – NT14-14\_Spécifications\_Mesures\_Vagues – décembre 2014