

Maël GODARD

ROB 2023

RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ETUDES

**DÉVELOPPEMENT D'UN ROBOT SOUS-MARIN
POUR ÉVALUER LA SIGNATURE ÉLECTRIQUE
SOUS-MARINE D'UN NAVIRE**

AU SEIN DE DGA TECHNIQUES NAVALES, ENCADRÉ PAR
CÉDRIC GOËAU

22 août 2023



Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant pris part à mon projet de fin d'études et m'ayant permis d'en tirer le maximum non seulement d'un point de vue technique mais aussi d'un point de vue humain.

Tout d'abord un grand merci à Mr Cédric GOËAU, expert en électromagnétisme sous-marin et tuteur de mon stage, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet à ses côtés. Son intérêt, sa curiosité et le temps qu'il a consacré sur ce projet ont été des éléments déterminant dans la réussite de ce dernier. Ces quelques mois à partager son bureau et son désir de partager ses connaissances m'ont permis de tirer le maximum de cette expérience. J'emporte avec moi bon nombre de ses conseils qui me seront sans nul doute utiles dans les années à venir.

Je remercie bien entendu aussi le reste de l'équipe ElectroMagnétisme Sous-Marin (EMSM) pour leur accueil et leur support tout au long de ce projet. La bonne ambiance et l'entraide y régnant ont su rendre ces six mois de travail agréables à vivre, bien que ces derniers soient passés trop vite. Merci à Mr Hugues HENOCQ, chef du groupe EMSM, pour sa disponibilité et pour avoir partagé une partie de son expérience avec moi. Merci à Mr Alexis LE POT pour l'intérêt qu'il a porté à ce projet et sa force de proposition ainsi que pour sa compagnie tout au long de ce projet. Merci enfin à Mr Arnaud GUIBERT pour sa bienveillance, son expertise et le temps qu'il a consacré à ce projet. Merci à eux de m'avoir si bien accueilli et de m'avoir permis de m'intégrer aussi facilement à la fois au sein du groupe et du site. Si l'avenir le permet ça sera avec grand plaisir que je travaillerais de nouveau à leurs côtés.

Je remercie également Mr Josse ROBIN, Mr Olivier BESCOND et Mme Justine CORBEL pour les moments passés autour d'un repas, autour d'un café ou au détour d'un couloir. Ces moments ont rythmé ces six mois par des anecdotes, des rires et des bons souvenirs que j'emporte avec moi.

Merci à Mr Rodolphe PELLAE, Mr Frédéric FEZARD, Mr Stéphane LE GALL, Mr Laurent LE DUFF, Mr Damien TRITTER et Mme Corinne CROGUENNEC pour leur support technique tout au long de ce projet et pour avoir rendu possible la session d'essai au petit port de Lanvéoc.

Merci enfin à Mr Antoine PIETRI, Mr Philippe DRIDI et toutes les personnes que j'ai pu côtoyer sur le site de DGA Techniques Navales de Brest. Si j'en repars la tête pleine de bons souvenirs et d'anecdotes c'est aussi grâce à chacun d'entre eux.

Résumé

Dans le contexte militaire de guerre des mines, il est important que les navires présentent une discrétion à la fois acoustique, magnétique et électrique. Si dans le cadre de la discrétisation électrique des moyens de mesure de la signature électrique sous-marine des navires existent, ceux-ci sont peu nombreux et fixes. Les navires n'ont donc pas la possibilité d'effectuer une vérification de leur signature en cours de mission. C'est dans ce cadre que le projet DELFIN de DGA Techniques navales propose une alternative embarquable aux polygones de mesure.

Mots-clés

Champ électrique, signature électrique, électronique embarquée, positionnement acoustique

Abstract

In the military context of the mine warfare it is important for the ships to obtain an acoustic, magnetic and electrical signature as silent as possible. Means to measure ships' submarine electrical signature already exist but these are both fixed and rare. This causes the ships to be unable to check their signature while on a mission. In this context, DGA Techniques navales's project DELFIN aims to present an embedded alternative to the existing measuring facilities.

Key words

Electrical field, electrical signature, embedded electronics, acoustic positioning

Table des matières

Introduction	7
1 Contexte	8
1.1 Présentation de DGA TN et du site de Brest	8
1.2 Évaluation de la signature électrique d'un navire	9
1.2.1 Origines	9
1.2.2 Modélisation du problème	10
1.2.3 Calcul de la signature par résolution du problème inverse	11
1.3 Présentation du sujet : Utilisation d'un ROV	12
2 Description du projet et de ses objectifs	13
2.1 Spécifications du système	13
2.1.1 Électronique embarquée de mesure de champ électrique	13
2.1.2 Solution de positionnement	14
2.2 Présentation et audit de l'existant	14
2.2.1 Présentation du porteur	14
2.2.2 Mesure de champ électrique	15
2.2.3 Solution de positionnement	16
2.3 Objectifs	17
2.4 Planification	17
3 Développements	19
3.1 Électronique de mesure champ électrique	19
3.1.1 Développement d'une nouvelle implémentation	19
3.1.2 Essais préliminaires	21
3.1.3 Interfaçage ROS2	22
3.2 Positionnement acoustique	23
3.2.1 Paramétrage et exploitation des données	23
3.2.2 Interfaçage ROS2	24
3.2.3 Essais préliminaires	25
3.3 Interfaçage avec le BlueROV	25
3.3.1 Interfaçage des systèmes	25
3.3.2 Interfaçage réseau	26
3.4 Développement de l'IHM	28
4 Expérimentations	30
4.1 Essais en bassin	30

4.1.1	Vérification de l'orientation des axes de mesure du champ électrique sous-marin	31
4.1.2	Vérification de l'amplitude des champs électriques mesurés	33
4.1.3	Utilisation des USBL et post-traitement	34
4.2	Essais en mer	36
4.2.1	Phase 1 - Vérification de la précision du positionnement par USBL . . .	37
4.2.2	Phase 2 - Évaluation de la signature électrique sous-marine en présence de deux sources	38
4.2.3	Phase 3 - Évaluation de la signature électrique sous-marine en présence de quatre sources	40
	Conclusion	43
	A Diagramme de corrosion du fer	46
	B Modèle d'une charge ponctuelle	47
	C Documentation High-Precision AD/DA Board	49
	D Planification initiale et finale	50
	E Fonctionnement de l'attente active	52
	F Remote Track Packet	53

Table des figures

1.1	Lignes du courant de corrosion	9
1.2	Lignes de courant après protection cathodique	10
1.3	Modèle d'une paire d'électrodes	11
1.4	Projection à 30m selon une ligne (gauche) et un plan (droite) dans le cas d'un modèle à deux sources	12
2.1	Signature électrique sous-marine générée par une paire d'électrodes sans (à gauche) et avec (à droite) prise en compte de l'interface air/eau	14
2.2	Le BlueROV dans sa configuration initiale	15
2.3	Carte d'acquisition et trièdre	16
2.4	Principe de fonctionnement des USBL	17
3.1	Chronogramme du fonctionnement de la carte d'acquisition	20
3.2	Dispositif d'essais en aquarium	21
3.3	Mesure d'un champ électrique oscillant à 200Hz (gauche) et à 500Hz (droite)	22
3.4	Interface de visualisation de la mesure de champ électrique	22
3.5	Visualisation de l'alignement des repères	25
3.6	Electronique de mesure embarquée	26
3.7	Assemblage final du ROV	27
3.8	Architecture réseau globale	27
3.9	Onglets d'affichage (haut) et de réglage (bas) de l'interface LabVIEW	29
4.1	Solutions de génération de champ électrique sous-marin	30
4.2	Dispositif d'essai pour la vérification de l'orientation des axes de mesure	31
4.3	Vérification de l'orientation des axes de mesure	32
4.4	Vérification de la projection des mesures	32
4.5	Banc de mesure MADEO	33
4.6	Champ électrique sous-marin mesuré par MADEO (gauche) et par le ROV (droite)	34
4.7	Positions enregistrées par l'USBL	35
4.8	Traitement du fichier de mesure	36
4.9	Ponton d'essais	37
4.10	Dispositif d'essai de positionnement	37
4.11	Résultats des essais de positionnement	38
4.12	Dispositif des essais d'évaluation de la signature	39
4.13	Champ électrique théorique (pointillés), mesuré (croix) et calculé (trait plein) avec deux sources	40
4.14	Champ électrique théorique (pointillés), mesuré (croix) et calculé (trait plein) avec quatre sources	41

Acronymes

CPA Closest Point of Approach

DELFIN Démonstrateur de mesures Electriques Léger au profit des Forces IN situ

GBF Générateur Basse Fréquence

IHM Interface Homme-Machine

IMEVE Identification Multipolaire de la base EVE

NED North East Down

ROS2 Robotic Operating System 2

ROV Remotly Operated Vehicle

TCP Transmission Control Protocol

USBL Ultra Short BaseLine

Introduction

La guerre des mines est une des préoccupations de la marine nationale. En effet les progrès technologiques récents ont permis l'évolution et la sophistication des mines, et ce à moindre coût. Ces dernières sont désormais capables de se déclencher sans aucun contact, utilisant la mesure de bruit acoustique, magnétique ou électrique afin de déceler la présence d'un navire. Il est donc nécessaire pour la marine nationale d'être capable de quantifier l'ensemble des grandeurs mesurables, appelé signature, et qui pourrait trahir la présence de ses navires.

Dans le cadre de la discrétion électrique, la DGA dispose de deux polygones de mesures sous-marines fixes situés en France visant à mesurer le champ électrique généré par les navires. Cette signature est cependant variable à la fois dans le temps et en fonction de l'environnement. Les mesures réalisées en France métropolitaine peuvent ainsi perdre en pertinence une fois sur le site d'opération.

Le projet DELFIN vise à répondre à cette problématique en proposant une alternative de mesure de signature électrique qui soit embarquable et donc utilisable en opération. Ce rapport se penchera sur le développement et la caractérisation d'une électronique embarquée de mesure de la signature électrique. Dans cette optique, il est nécessaire de développer une électronique de mesure de champ électrique couplée à un système de positionnement et d'embarquer le tout sur un drone sous-marin, ici de type ROV.

Chapitre 1

Contexte

1.1 Présentation de DGA TN et du site de Brest

Créé en 1959, le Groupe d'Etudes de la Guerre des Mines (GEGM) avait pour objectif de créer un pôle spécialisé dans la guerre des mines. Le groupe a par la suite évolué en 1970 pour devenir le Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique (GESMA) et s'installer dans ses locaux actuels à Quéliverzan en 1984. Il a depuis été rattaché au centre DGA Techniques Navales en 2013 en tant qu'antenne du site de Toulon sur la façade Atlantique.

DGA Techniques navales travaille de concert avec la Marine nationale. Elle mène des programmes d'armement visant à équiper les forces armées. Elle prend aussi part à la préparation de l'avenir en menant des études amont et en assurant une veille technologique. Son expertise couvre plusieurs thématiques :

- ◆ Systèmes navals et leurs sous-systèmes
- ◆ Systèmes de combat naval (guerre des mines, systèmes d'information, guerre électronique) et intégration des armes
- ◆ Étude de la discrétion et de la vulnérabilité des plate-formes navales
- ◆ Drones maritimes et armes sous-marines
- ◆ Mesures physiques et moyens d'essais naval (réels et simulés)

L'équipe Électro-Magnétisme Sous-Marin (EMSM) apporte son expertise dans le domaine de l'électromagnétisme sous-marin. Elle participe à l'élaboration du cahier des exigences techniques des différents programmes en spécifiant notamment les systèmes d'immunisation et de protection cathodique. Elle prend aussi part aux études amonts afin de rester à la pointe de la technologie dans le domaine de la discrétion électromagnétique. Elle peut enfin aider à l'analyse des mesures électromagnétiques sous-marines effectuées sur les bâtiments de la marine nationale.

1.2 Évaluation de la signature électrique d'un navire

1.2.1 Origines

Les navires de la marine sont équipés de divers systèmes permettant de les protéger de différentes menaces. Parmi ces systèmes, certains sont en charge de protéger les bâtiments de la corrosion due au contact entre le navire et l'eau salée.

Cette corrosion provient d'une réaction d'oxydo-réduction entre le fer contenu dans l'acier des coques de navires (réducteur) et les matériaux nobles utilisés notamment pour les hélices et qui jouent le rôle d'oxydant, par exemple l'alliage Cupro Nickel. L'eau salée sert alors d'électrolyte à travers laquelle un courant peut circuler, appelé "courant de corrosion" [1].

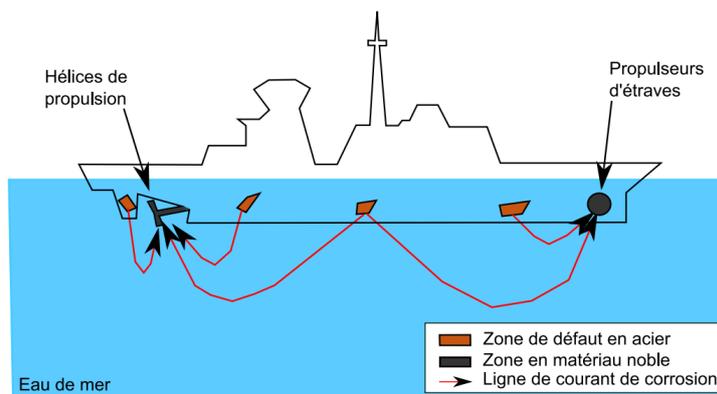


FIGURE 1.1 – Lignes du courant de corrosion

On distingue deux catégories de protection cathodique :

- ◆ **La Protection Cathodique par Courant Galvanique (PCCG)**. Aussi appelée "Anodes sacrificielles", le principe est de fixer des blocs de métal sur la coque du navire à protéger. Ce métal doit avoir un potentiel réducteur plus élevé que celui du fer, typiquement du zinc, de sorte que la réaction d'oxydo-réduction se fasse avec ces blocs de métal plutôt qu'avec le fer de la coque. Les blocs sont donc oxydés et jouent le rôle d'anode à la place de la carène, d'où le nom d'anode sacrificielle.
- ◆ **La Protection Cathodique par Courant Imposé (PCCI)**. Cette méthode s'appuie sur le potentiel électrochimique du fer, et plus particulièrement sur ses variations en fonction du potentiel électrique (renseignées dans le diagramme de corrosion du fer, voir Annexe A). Une électrode de référence et un générateur sont utilisés afin d'abaisser le potentiel de la carène ce qui a pour effet de l'immuniser.

Quel que soit le type de protection choisi, un courant circule dans l'eau autour du bâtiment créant ainsi un champ électrique. Ce champ étant mesurable, il crée une indiscrétion qui peut permettre à des mines de détecter la présence d'un navire. Il est donc nécessaire de prédire la signature à l'aide de mesures et d'un modèle de sources pour la minimiser et réduire le risque de détection.

1.2.2 Modélisation du problème

La présence d'un ou plusieurs systèmes de protection cathodique modifie les lignes de courant autour de la carène d'un navire. Le champ électrique étant lié au courant, il est donc possible de diminuer la signature électrique d'un bâtiment en jouant sur les courants et la position des protections cathodiques.

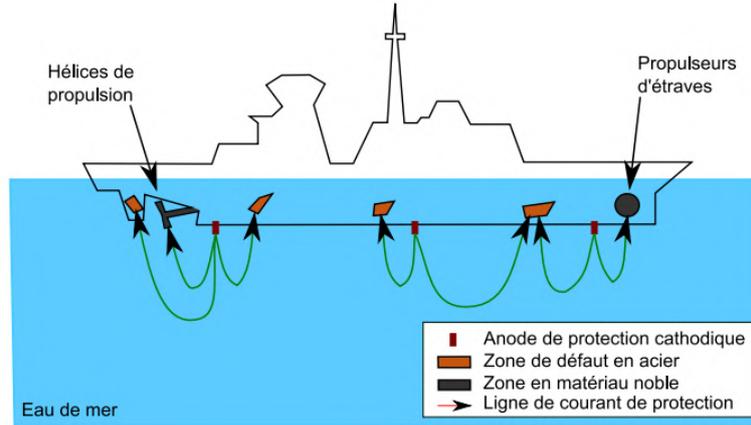


FIGURE 1.2 – Lignes de courant après protection cathodique

Pour ce faire, il est nécessaire d'établir un modèle physique permettant de prédire le champ électrique généré par une source de courant. Pour la suite, la modélisation ne comprendra qu'une anode et une cathode afin de faciliter la compréhension du phénomène, mais les équations établies pourront être étendues à des modélisations plus complexes.

Dans le cadre de notre étude nous considérons que les sources de courant sont ponctuelles. Le champ électrique généré par une source traversée par un courant I dans un milieu de conductivité σ est ainsi de la forme :

$$\vec{E} = \frac{I}{\sigma * 4\pi * r^2} * \vec{e}_r, \text{ à un distance } r \text{ de la source}$$

Le détail du calcul est proposé en Annexe B. Comme mentionné précédemment on s'intéresse ici à une unique paire d'électrode, soit une anode et une cathode. On note I le courant sortant de l'anode A et $-I$ le courant sortant de la cathode C, la conservation du courant donnant ici que le courant sortant en A rentre en C.

En notant \vec{E}_M^S le champ électrique au point M généré par la source S et \vec{E}_M le champ électrique total au point M, le principe de superposition nous permet alors d'écrire la relation suivante :

$$\vec{E}_M = \vec{E}_M^A + \vec{E}_M^C$$

En appliquant les formules résultantes de l'annexe B, on obtient une relation donnant le champ électrique en tout point M de l'espace.

$$\vec{E}_M = \frac{I}{\sigma * 4\pi * r_a^2} * \vec{e}_{ra} - \frac{I}{\sigma * 4\pi * r_c^2} * \vec{e}_{rc}$$

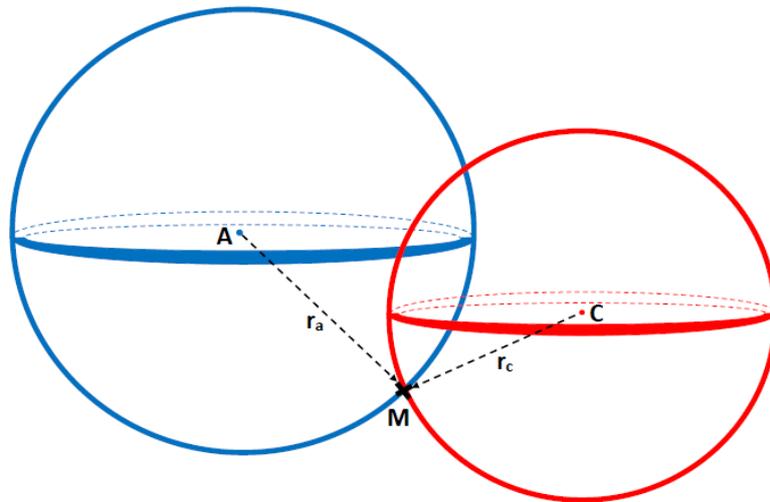


FIGURE 1.3 – Modèle d'une paire d'électrodes

1.2.3 Calcul de la signature par résolution du problème inverse

Lorsqu'il est question de déterminer la signature électrique d'un bâtiment, l'objectif est d'être capable de prédire le champ électrique à une position donnée. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer les paramètres du modèle à partir de mesures et d'un modèle déterminé en amont. Cette étape, appelée résolution du problème inverse, consiste dans notre cas à déterminer le courant des diverses sources qui auront au préalable été identifiées et localisées. Les équations présentées dans la section 1.2.2 couplées à une méthode de régression (par exemple des moindres carrés) permettent de déterminer le courant circulant entre une unique paire d'anode et de cathode.

Pour des modèles plus complexes un code de calcul nommé IMEVE a été développé par le G2Elab de Grenoble, centre de recherche en génie électrique de l'institut Grenoble INP, sur demande du centre DGA Techniques Navales de Brest. Ce code permet l'importation d'un modèle 3D de navire sur lequel les différentes sources de courant peuvent être positionnées. Une fois les mesures importées le code est capable de résoudre le problème inverse pour déterminer le courant sortant de chacune des sources identifiées. Une fois la totalité des paramètres du modèle identifiée, il est possible de prédire la répartition du champ électrique sur une ligne ou un plan donné. Ces projections spatiales sont appelées "signatures".

La figure 1.4 représente la champ électrique généré par un dipôle électrique. Afin de visualiser ce champ, on peut au choix représenter ses composantes en fonction de la position ou le représenter sous sa forme vectorielle (sous la forme d'un déplacement par exemple). Ici sont représentés les composantes du champ électrique mesuré lors d'un déplacement selon l'axe des électrodes et ce même champ sous la forme de déformation d'un plan.

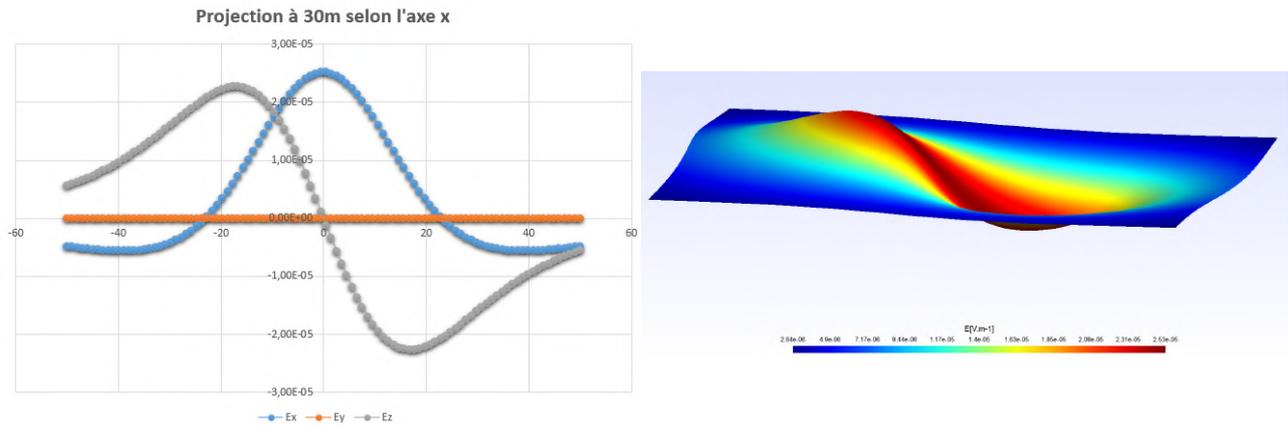


FIGURE 1.4 – Projection à 30m selon une ligne (gauche) et un plan (droite) dans le cas d'un modèle à deux sources

1.3 Présentation du sujet : Utilisation d'un ROV

L'indiscrétion électrique est un risque récent comparé aux risques acoustiques et magnétiques. Deux polygones de mesures sont installés en France afin de quantifier ce risque. Si ces moyens de mesures sont performants, il n'en reste pas moins contraignant pour les différents navires de devoir effectuer un détour avant une mission afin d'effectuer des mesures. De plus en cas de doute sur la signature électrique lors d'une mission, il est impossible pour les bâtiments de la Marine nationale d'effectuer un contrôle in situ. Ces différentes problématiques ont fait naître le besoin de développer un robot qui serait capable d'effectuer ce contrôle et qui pourrait mettre en évidence d'éventuelles anomalies dans la signature électrique.

C'est dans ce cadre que prend place le projet DELFIN, ayant pour finalité d'établir une preuve de concept d'un tel robot. Dans un premier temps et afin de faciliter les différentes expérimentations, un ROV est utilisé comme porteur de l'électronique de mesure.

Le sujet du Projet de Fin d'Études présenté ici couvre donc en premier lieu le développement d'une électronique embarquée de mesure de champ électrique. De plus il est nécessaire de connaître les positions auxquelles le champ électrique a été mesuré afin de résoudre le problème inverse comme présenté précédemment. La mise en place d'un système de positionnement sous-marin permettant de localiser le ROV a donc aussi été abordée au cours de ce projet. Enfin un travail a été effectué sur le porteur même afin d'y intégrer les différents systèmes développés et de rendre le tout fonctionnel.

Chapitre 2

Description du projet et de ses objectifs

2.1 Spécifications du système

2.1.1 Électronique embarquée de mesure de champ électrique

Afin de dimensionner le système d'acquisition, il est nécessaire d'avoir une idée de la signature électrique d'un bâtiment. Dans la cas d'un navire on peut poser les ordres de grandeur suivants :

- ◆ Distance entre anode et cathode : $d = 20$ m
- ◆ Profondeur des capteurs électriques : $p = 20$ m
- ◆ Courant sortant de l'anode : $I = 2$ A
- ◆ Conductivité de l'eau de mer : $\sigma = 4$ S/m

À l'aide des relations de la section de modélisation (1.2.2), on peut ainsi calculer la signature électrique sous-marine que générerait un navire. L'interface air/eau pourra être prise en compte en considérant des sources additionnelles symétriques aux sources existantes par rapport au plan d'interface [2]. La figure ci-dessous, utilisant les ordres de grandeur définis précédemment, représente l'anode (en vert) et la cathode (en rouge) espacées de 20m et à 1m de la surface ainsi que la norme des champs électriques associés avec et sans prise en compte de l'interface. La norme du champ résultant est aussi représentée (en bleu) et sera celle utilisée pour dimensionner l'électronique.

Cette modélisation permet d'estimer une amplitude des champs électriques à mesurer de l'ordre du mV/m . Une résolution inférieure au mV/m est donc nécessaire afin de pouvoir retracer correctement une telle signature. En ajoutant les caractéristiques attendues d'un système de mesure de champ électrique au sein de la DGA, on obtient les exigences suivantes :

Critère	Valeur
Fréquence d'acquisition	$1000Hz$
Plage de mesure	$\pm 10mV/m$
Résolution	$\sim 1\mu V/m$
Bruit en continu	$< 3\mu V/m$
Bruit en fréquentiel	$< 10nV/m/\sqrt{Hz}$

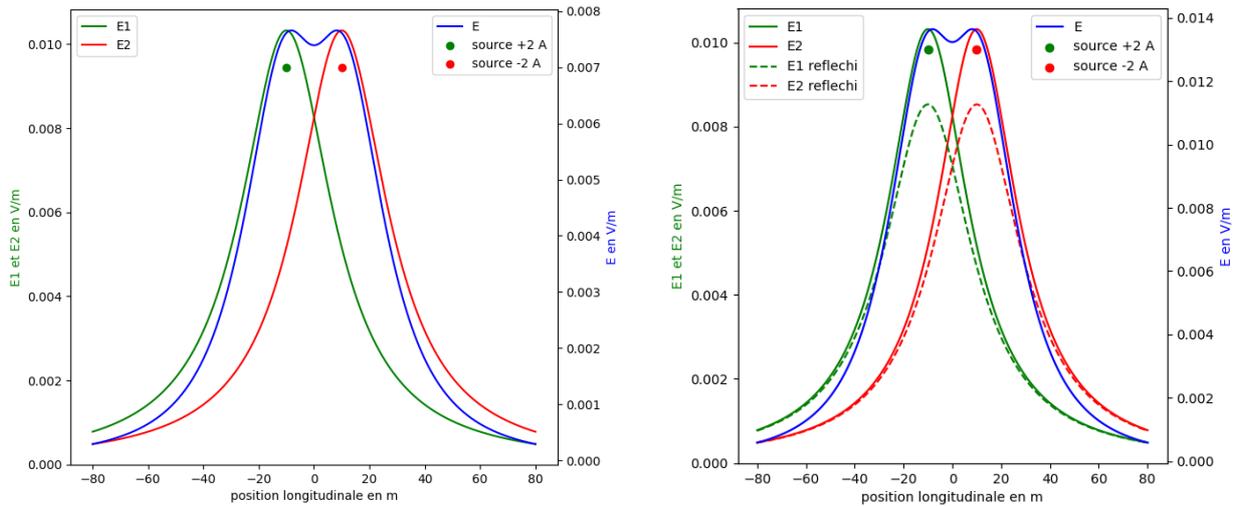


FIGURE 2.1 – Signature électrique sous-marine générée par une paire d'électrodes sans (à gauche) et avec (à droite) prise en compte de l'interface air/eau

TABLE 2.1 – Spécifications du système de mesure de champ électrique

2.1.2 Solution de positionnement

La résolution du problème inverse réalisée par IMEVE s'appuyant sur une inversion matricielle, la qualité du résultat obtenu est très dépendante de la qualité du positionnement des points de mesure. L'orientation du porteur est aussi importante à connaître puisqu'elle permet de projeter les mesures effectuées dans le repère de surface afin de résoudre le problème inverse. Dans un premier temps on pourra se fixer le cahier des charges suivant :

Critère	Valeur
Erreur de position	$< 0,5m$
Erreur d'orientation	$< 1^\circ$

TABLE 2.2 – Spécifications du système de positionnement

Les résultats obtenus lors d'expérimentations pouvant exposer une sensibilité plus importante ou moindre de la résolution du problème inverse aux erreurs de positionnement, ce cahier des charges pourra par la suite être amené à évoluer.

2.2 Présentation et audit de l'existant

2.2.1 Présentation du porteur

Le porteur choisi dans le cadre de ce projet est un BlueROV2 de chez BlueRobotics (disponible ici), entreprise spécialisée dans la robotique marine. Ce modèle présente l'avantage d'être facilement modulable en plus d'offrir une large gamme de pièces détachées dont les spécifications techniques complètes sont fournies en libre accès. De fait ce porteur est idéal dans le cadre du développement d'un démonstrateur comme c'est le cas ici.

À date du début de ce PFE un ROV équipé du "heavy kit" et d'un support pour USBL



FIGURE 2.2 – Le BlueROV dans sa configuration initiale

était à disposition. Ce kit permet de modifier le ROV en passant de deux à quatre moteurs verticaux afin de pouvoir se stabiliser en portant des charges. Le ROV présentait toutefois un défaut d'étanchéité, sa résolution sera abordée dans la section 3.3.

2.2.2 Mesure de champ électrique

La capacité à mesurer un champ électrique est primordiale dans la détermination d'une signature électrique sous-marine. Dans le cadre du projet DELFIN plusieurs architectures d'acquisition ont été considérées :

- ◆ **Système de mesure fourni dans le cadre d'une étude antérieure par MAPPEM Geophysics**, entreprise spécialisée dans l'électromagnétisme marin. Ce système n'étant pas embarquable, il a servi de système de référence pour développer l'architecture suivante.
- ◆ **Carte d'acquisition connectée à un microcontrôleur de type Arduino avec un ordinateur embarqué [3]**. Cette architecture multipliant les interfaces, et donc potentiellement les problèmes de communication, elle sera simplifiée par la suite
- ◆ **Carte d'acquisition directement connectée à un ordinateur embarqué [4]**. Cette architecture était la dernière en date au début de ce PFE, un audit sera donc conduit afin d'en comprendre les avantages et inconvénients.

La solution existante se compose d'une carte d'acquisition "High-Precision AD/DA Board" de Waveshare s'appuyant sur un convertisseur Analogique/Digital 24 bits ADS1256 de Texas Instruments, entreprise spécialisée dans la fabrication de semi-conducteurs et de circuits intégrés. Cette carte est connectée à une Raspberry Pi 3 B+ et communique avec elle par SPI (Serial Peripheral Interface). Un trièdre de mesure de champ électrique (voir figure 2.3) composé de quatre électrodes, une pour la référence et une par axe, est connecté à la carte d'acquisition permettant de mesurer le champ électrique dans les 3 directions par différences de potentiel.

La carte d'acquisition possédant huit voies et un mode différentiel, il est possible d'envoyer directement à l'ordinateur la différence de potentiel mesurée sur un maximum de quatre voies différentielles. Dans les faits, la mesure s'effectuant sur trois axes, seules trois des quatre voies différentielles seront utilisées ici. La connaissance de l'espacement entre les électrodes et l'hypothèse d'un champ électrique uniforme au sein du trièdre permettent dès lors de remonter

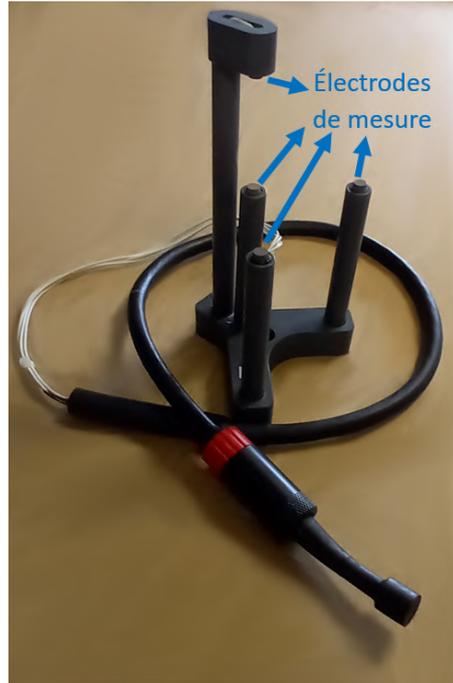
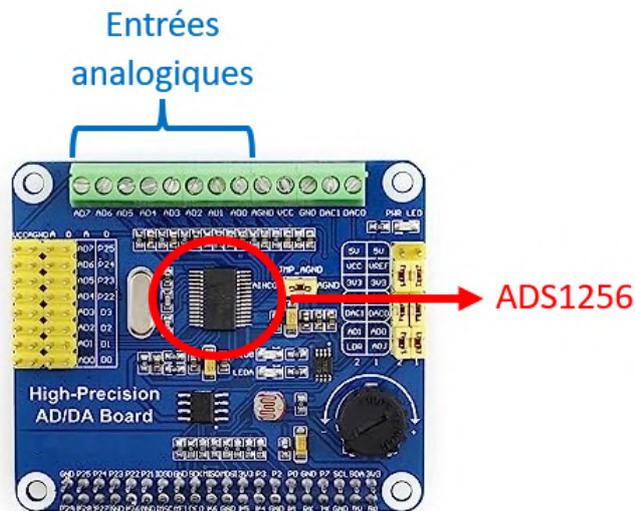


FIGURE 2.3 – Carte d’acquisition et trière

au champ électrique mesuré en appliquant la relation $E_i = \frac{U_i}{d_i}$ où U_i est la tension mesurée selon l’axe i en effectuant la différence de potentiel des électrodes espacées de d_i .

Selon la documentation officielle de Waveshare [5] (voir Annexe C), cette architecture possède une fréquence d’échantillonnage maximale de 4.3kHz. Cependant lors de l’implémentation la fréquence d’acquisition maximale ne dépassait pas 300Hz. Un travail d’investigation sur le fonctionnement du programme et des bibliothèques utilisées a donc été conduit et sera explicité dans la section 3.1.

2.2.3 Solution de positionnement

La seconde composante nécessaire à l’établissement d’une signature électrique est la position à laquelle la mesure a été effectuée, ainsi que l’orientation des axes de mesure par rapport à l’orientation du navire. Ces deux composantes peuvent être regroupées dans un unique objet appelé "pose" permettant de décrire l’état d’un objet en trois dimensions.

Le système de positionnement devant être efficace dans l’eau et à bonne distance (jusqu’à 50m), un système de positionnement acoustique est utilisé. Les principaux critères de sélection du système étaient que la solution soit facilement embarquable, facile à mettre en place et permette d’obtenir une pose relative au navire dont on effectue la mesure, le choix s’est alors porté vers l’USBL. Le principe de fonctionnement est illustré figue 2.4 [6].

Le système de positionnement minimal se compose de l’USBL à positionner et de quoi lui envoyer des ping depuis la surface (un transpondeur simple ou un autre USBL). L’USBL dit "de fond" (ou subsea) possède plusieurs hydrophones destinés à capter les ping de la surface. En comparant l’instant auquel chacun des hydrophones reçoit le ping il est possible de retrouver la distance séparant les unités et la direction selon laquelle cette distance est mesurée ce qui permet à l’USBL de positionner la source. Dans le cas de deux USBL, les rôles alternent et

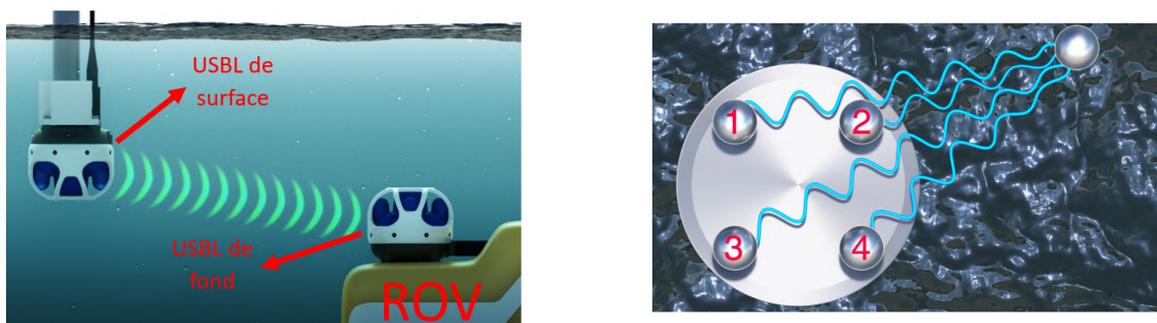


FIGURE 2.4 – Principe de fonctionnement des USBL

chacun ping l'autre à son tour de sorte que les deux unités soient capables de se positionner par rapport à l'autre.

La deuxième partie de la pose décrite précédemment est l'orientation relative de l'USBL de fond par rapport au navire, ici par rapport à l'USBL de surface. Afin de déterminer leur orientation, chacun des USBL est équipé d'une INS (Inertial Navigation System) couplée à un magnétomètre. L'obtention de cette orientation à partir des informations fournies par chacun des USBL sera explicitée dans la section 3.2.

2.3 Objectifs

Afin de pouvoir mesurer le champ électrique généré par un navire, plusieurs objectifs intermédiaires ont été déterminés. Premièrement une élévation de la limite de fréquence d'acquisition est nécessaire afin de satisfaire le cahier des charges, ce qui passera par une étape d'analyse du programme existant et une identification des éléments limitants.

Ensuite une étape d'interfaçage mécanique, électronique et réseau sera à conduire afin de pouvoir tester la mesure de champ électrique sous-marin et la localisation du ROV. Cela comprendra notamment une étape de montage de l'électronique de mesure de champ électrique dans une enceinte étanches fixée au ROV. Cette étape permettra par la suite de pouvoir caractériser le système afin de vérifier son adéquation avec le cahier des charges.

Le système devra enfin disposer d'une interface homme-machine et pouvoir interagir avec IMEVE en lui fournissant les mesures au bon format, la finalité du projet étant de proposer un robot "clé en main".

2.4 Planification

Le projet se décomposant en plusieurs sous-tâches, une première étape a été de regrouper et d'organiser ces tâches en thématiques. Sont ressortis quatre grands axes de travail :

- ◆ **Électronique embarquée** Prise en main de l'électronique existante, apport des correctifs nécessaire et développement d'une interface
- ◆ **Positionnement** Choix et mise en place d'un système de positionnement
- ◆ **BlueROV** Réparation et prise en main des outils du BlueROV
- ◆ **Essais finaux** Préparation des protocoles et du matériel pour les essais

Une fois les différents objectifs clairement définis, une première planification des tâches a pu être réalisée. Une revue mensuelle a ensuite été mise en place afin de faire le point sur l'état d'avancement des différentes tâches et de mettre à jour la planification en conséquence. La première et la dernière version de cette planification sont présentées en Annexe D. On y retrouve les quatre axes présentés précédemment avec pour objectif d'avancer les différentes composantes en parallèle avant de les regrouper sur le ROV et de réaliser un interfaçage global.

L'évolution majeure visible ici est que la phase finale de test initialement comprise dans le travail à effectuer sur le ROV a été isolée afin d'y consacrer plus de temps. Cette tâche a été planifiée afin de vérifier les différentes fonctionnalités développées et un temps a été accordé à la mise en place des protocoles d'essais. Un temps plus important a aussi été consacré à l'électronique embarquée et au système de positionnement afin de résoudre les divers problèmes rencontrés et de procéder au plus d'essais possible avant d'embarquer le tout pour les essais finaux. La rédaction de ce rapport a aussi été commencée en avance afin de pouvoir consacrer une partie du mois d'Août à ces essais.

Chapitre 3

Développements

Comme évoqué précédemment les différentes composantes de ce projet ont été développées séparément dans un premier temps. Ces composantes se présentent sous la forme de programmes dans des langages variés : Mesure des champs électriques en C++, IHM sous LabVIEW, communication avec IMEVE codé en Java via un script Python...

ROS, et plus particulièrement ROS2, a donc été utilisé afin de permettre à ces différents programmes de communiquer entre eux. Pour ce faire, il a été nécessaire de transformer les programmes développés en des "nœuds" ROS capable de dialoguer avec les autres nœuds en envoyant et recevant des messages standardisés sur des "topics". L'architecture ainsi obtenue a pour avantage d'être modulaire puisque changer un nœud n'affecte pas les autres, et de profiter des outils d'enregistrement et de visualisation de ROS.

3.1 Électronique de mesure champ électrique

La finalité de l'électronique de mesure de champ électrique est de pouvoir être embarquée sur un porteur afin de déterminer la signature électrique sous-marine d'un navire. Les exigences techniques sont résumées table 2.1.

3.1.1 Développement d'une nouvelle implémentation

Pour effectuer son acquisition, la carte sélectionnée utilise un multiplexeur. Elle effectue donc la lecture voie par voie puis envoie les données correspondantes à l'ordinateur embarqué via SPI. Il est à la charge de l'ordinateur embarqué de piloter la carte d'acquisition à travers les différentes opérations (changement de voie, lecture, écriture) en respectant les différents temps d'attentes spécifiés dans la documentation du constructeur [5].

Les principales étapes du fonctionnement sont :

- ◆ **Changement de voie**
- ◆ **Synchronisation** de l'ordinateur embarqué et de la carte d'acquisition
- ◆ **Réveil** de la carte d'acquisition
- ◆ **Lecture** de la voie
- ◆ **Communication** du résultat à l'ordinateur embarqué

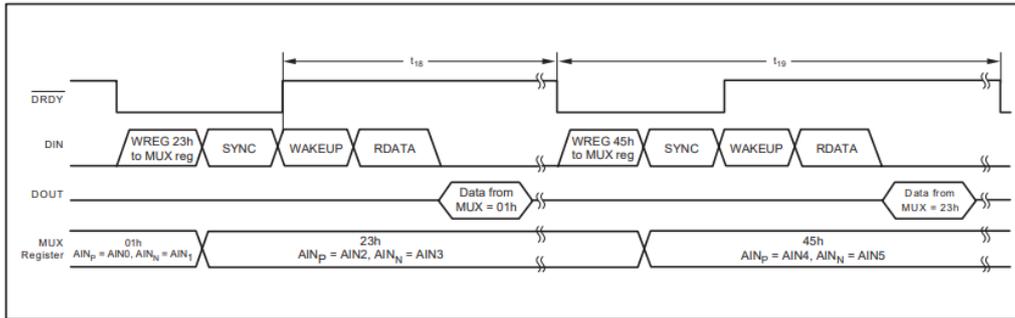


FIGURE 3.1 – Chronogramme du fonctionnement de la carte d'acquisition

La somme des durées de chaque étape résulte en une durée t_{19} (Cf Annexe C) qui définit in fine la fréquence d'échantillonnage maximale du système. Afin de satisfaire le cahier des charges il est nécessaire que cette durée soit inférieure à 1ms (correspondant à 1kHz). D'autres durées comprises dans t_{19} sont à respecter, par exemple celle entre la lecture et la communication des données ou celle entre deux opérations successives.

Pour respecter ces durées les programmes d'exemples fournis en C font appel à la bibliothèque bcm2835 qui définit notamment une fonction d'attente.

Une inspection de cette fonction révèle qu'elle appelle la fonction "nanosleep" (fonction de base en C) en prenant en entrée un temps en millisecondes puis le convertissant en secondes et nanosecondes. Le temps en entrée étant un entier, cette implémentation ne permet pas d'attendre moins d'une milliseconde.

Une redéfinition de la fonction prenant en entrée une durée en nanoseconde a donc été implémentée afin de palier à cette limite. Toutefois un biais proportionnel au nombre d'appels à la fonction d'attente était observé entre la durée d'attente demandé et celle mesurée. Une recherche plus poussée a montré que l'appel à la fonction nanosleep peut prendre jusqu'à $200\mu s$. Cette fonction étant appelée plusieurs fois par itération, la limite de 1ms par itération est excédée et une limite fréquentielle apparaît. Dans les faits, il se trouve que la fonction nanosleep a pour effet de mettre le processeur en veille, expliquant ainsi le "délai" à chaque appel par la mise et sortie de veille du processeur.

Afin de proposer une nouvelle implémentation, il a été nécessaire de déterminer les possibilités d'accès au temps dans un programme en C++. Deux fonctions existent :

- ◆ **time** Donne accès au temps au format heures/minutes/secondes (comme le ferait une montre). Cette fonction est donc précise à la seconde près.
- ◆ **clock** Renvoie un nombre de tics. La variable `CLOCKS_PER_SECOND` définie en C permet alors de convertir une différence de tics en une durée. On compte typiquement 10^9 tics par seconde, ce qui permet de mesurer des durées à la nanoseconde près.

La fonction `clock` devenait inutilisable lors de l'utilisation de la fonction `nanosleep` puisque les tics cessaient d'être incrémentés par le processeur. Une fois cette fonction écartée, une nouvelle implémentation s'appuyant sur la fonction `clock` a pu être développée. Cette nouvelle implémentation se base sur le principe d'attente active afin de respecter les temps d'attentes (voir Annexe E).

L'objectif est de créer une boucle vide ayant pour condition de sortie le fait d'avoir attendu une durée supérieure (ou égale) à la durée voulue. Dans notre cas ce qui est mesuré n'est pas un temps mais un nombre de tics, la durée d'attente courante est donc obtenue en divisant la différence de tics par la variable `CLOCKS_PER_SECOND`.

Dans les faits, une itération, même vide, d'une boucle couplée à un test de fin d'itération dure plusieurs tics. Les temps d'attentes réels sont de fait légèrement plus longs que nécessaire, ce qui a pour effet de limiter la fréquence maximale d'acquisition mais permet aussi d'avoir une marge de sécurité sur le respect des durées indiquées.

3.1.2 Essais préliminaires

Afin de vérifier la capacité du système d'acquisition à mesurer des champs électriques sous-marins une fois couplé à des électrodes, de premiers essais ont été conduits dans un aquarium, d'une longueur de 60cm, et en utilisant le trièdre comme porteur d'électrodes. Le dispositif d'essais est représenté figure 3.2.

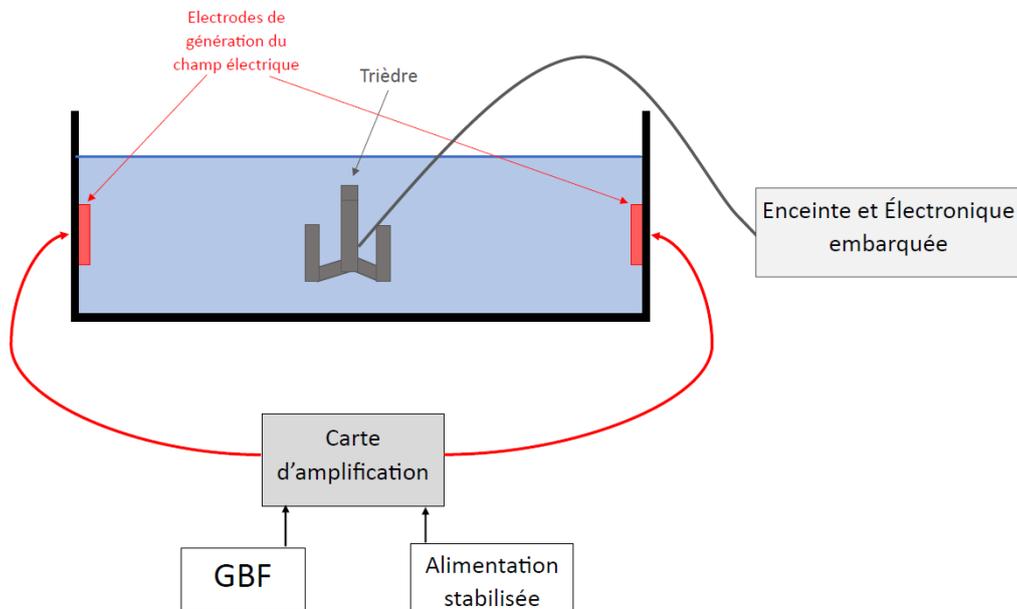


FIGURE 3.2 – Dispositif d'essais en aquarium

La carte d'amplification couplée à un GBF permettant de générer un champ sinusoïdal, différents essais ont alors été conduits afin de confirmer la capacité du système d'acquisition à reconstruire un signal de fréquence supérieur à 100Hz. La figure 3.3 montre la réponse du système à un champ généré à 200Hz et à 500Hz. La nouvelle implémentation permettant de savoir avec précision à quel instant les mesures ont été prises, il a été possible de déterminer que ces essais ont été réalisés avec une fréquence d'acquisition de 1400Hz. Le théorème de Shannon stipule qu'avec une telle fréquence d'acquisition des signaux de fréquence strictement inférieure à 700Hz peuvent être mesurés sans pertes d'information. Toutefois si on souhaite retrouver la forme sinusoïdale du signal il convient de mesurer la valeur du champ plusieurs fois par période comme c'est le cas ici lors de la reconstruction du signal à 200Hz.

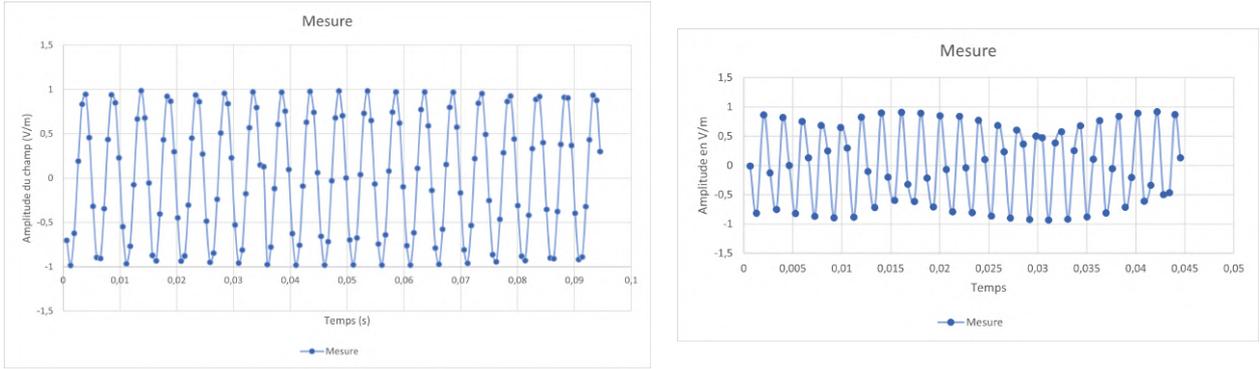


FIGURE 3.3 – Mesure d’un champ électrique oscillant à 200Hz (gauche) et à 500Hz (droite)

3.1.3 Interfaçage ROS2

Afin de pouvoir intégrer la mesure électrique dans l’architecture logicielle globale du robot, un nœud ROS2 a été développé sous la forme d’un programme en C++, fournissant ainsi l’accès aux mesures à tout appareil présent sur le réseau en temps réel. Ce nœud s’appuie sur le programme décrit dans la partie précédente et fournit les données sous la forme d’un tableau contenant le champ mesuré selon chacun des axes et l’instant où la mesure a été effectuée (depuis le lancement du nœud).

En parallèle une première interface a été développée en python sous la forme d’un second nœud ROS2. Cette interface est destinée à être utilisée sur un ordinateur indépendant, appelé par la suite PC de surface, et connecté sur le même réseau que la Raspberry Pi de mesure du champ électrique afin de visualiser le champ mesuré en temps réel. Des premiers essais ont été réalisés en connectant un GBF à la carte d’acquisition afin de vérifier la reconstruction d’un signal simple. La figure 3.4 présente le résultat visible sur l’interface pour un signal sinusoïdal généré à une fréquence de 47Hz sur la voie y.

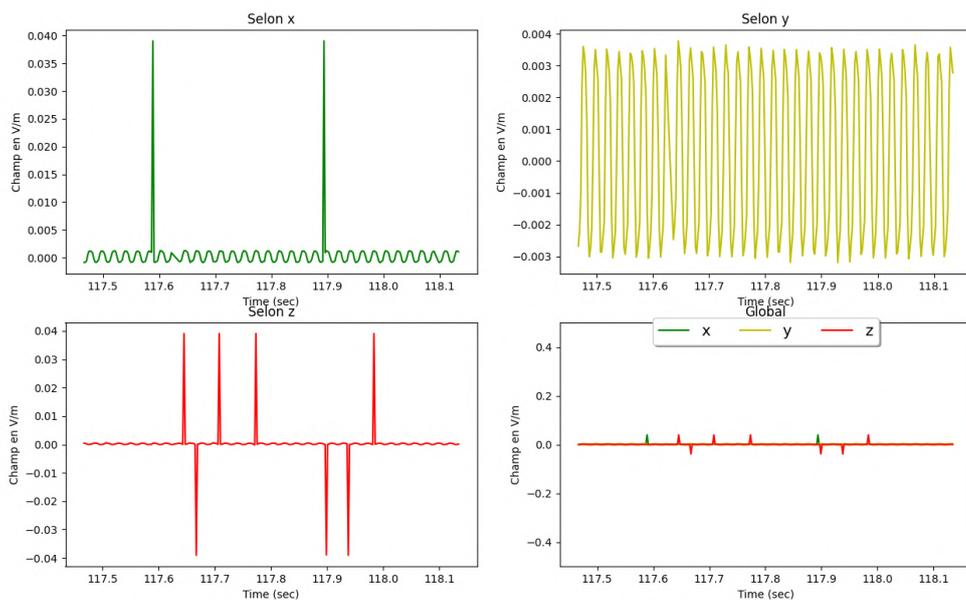


FIGURE 3.4 – Interface de visualisation de la mesure de champ électrique

On peut observer qu'on retrouve bien notre signal à 47Hz sur la voie y et qu'on le retrouve sous forme de bruit sur les autres voies. On observe aussi l'apparition de pics qui ne sont pas périodiques. Plusieurs éventuelles sources pouvant être à l'origine de ces pics ont été identifiées.

Premièrement la carte d'acquisition utilise un multiplexeur pour changer de voie de lecture mais une des voies semble endommagée nuisant à la bonne lecture des données s'y trouvant, cette voie a donc été mise de côté. Une augmentation des durées d'attente lors de la lecture a permis de limiter l'apparition de pics et a donc été conservée. Les pics restants peuvent être attribués à du bruit mesuré par la carte d'acquisition, les fils des électrodes faisant antenne, ou à un défaut de la carte d'acquisition. Ceux-ci étant peu nombreux (entre un et deux pics toutes les mille mesures) ils pourront être supprimés des fichiers de mesure sans grand impact sur la quantité de données disponibles pour l'évaluation de la signature électrique. Il est toutefois prévue de remplacer par la suite la carte d'acquisition par un modèle plus performant et d'utiliser des câbles coaxiaux pour connecter les électrodes en les isolant du bruit environnant.

La solution dans sa première version interfaçable présente ainsi une fréquence d'acquisition de 900Hz par voie (2700Hz en tout) afin de s'assurer de la bonne lecture des données. Un post-traitement pourra par la suite être implémenté, par exemple sous la forme d'un filtre passe-bas, afin de supprimer les pics restants.

3.2 Positionnement acoustique

Afin de pouvoir résoudre le problème inverse tel que mentionné dans la section 1.2.3 il est nécessaire de pouvoir localiser le porteur et de connaître son orientation afin de projeter les mesures dans le repère de la surface. Les exigences techniques sont résumées table 2.2.

3.2.1 Paramétrage et exploitation des données

Afin de faire fonctionner les USBL ensemble, un paramétrage est premièrement nécessaire. L'interface réseau proposée par Advanced Navigation permet de définir les alignements des USBL. On aura ici l'USBL de surface pointé vers les bas et celui de fond vers le haut, il convient donc de choisir les alignements adaptés afin qu'à l'utilisation les deux USBL aient le même axe z ce qui permettra de simplifier la projection des champs mesurés.

Afin de faire fonctionner le tracking acoustique il est nécessaire de définir un "maître" et une "esclave", un maître pouvant suivre plusieurs esclaves à la fois. Dans notre cas on choisit de régler l'USBL de surface en tant que maître et celui de fond en esclave. Le tracking pouvant être aidé par une communication réseau entre les deux unités, on fixera aussi leur adresse IP en respectant le formalisme établi par le constructeur :

- ◆ Tous les appareils ont une adresse IP de la forme 192.168.2.xxx (masque de sous-réseau 255.255.255.0) avec xxx allant de 1 à 254
- ◆ La dernière composante de l'adresse IP commence par un 1 pour les appareils de surface et par 2 pour les appareils de fond

En l'occurrence on aura donc l'USBL de surface à l'adresse 192.168.2.100 et celui de fond à l'adresse 192.168.2.200.

Il est ensuite nécessaire de définir les informations souhaitées de la part des USBL. La communication de ces informations se fait par la création de serveurs TCP sur lesquels sont diffusés les différents messages. Tout ordinateur connecté au même réseau que les USBL peut ensuite se connecter à ces serveurs en tant que client et accéder aux données contenues dans les messages. Dans notre cas l'USBL de surface est celui qui effectuera le tracking acoustique, c'est donc à un de ses serveurs que l'ordinateur de surface se connectera. Pour notre application trois messages nous intéressent :

- ◆ **System State Packet** Contient les informations propres à l'USBL de surface, notamment son orientation dans le repère NED
- ◆ **Remote Track Packet** Contient les informations du tracking acoustique de l'USBL de fond. Ce message donne accès à la position de l'USBL de fond dans différents repères (USBL de surface, repère local ...) et dans différents systèmes de coordonnées (cartésien, sphérique ...)
- ◆ **Remote System State Packet** Contient les informations propres à l'USBL de fond, notamment son orientation dans le repère NED. Il est possible de faire circuler ces informations via communication acoustique ou par le réseau

Comme mentionné précédemment deux composantes sont nécessaires afin de définir complètement la pose du ROV dans le repère du navire : sa position et son orientation.

Pour la position, le paquet "Remote Track Packet" propose de fournir la position de l'unité suivie dans différents repères et référentiels, la liste complète est disponible en Annexe F. Dans notre cas l'information nous intéressant est la position dans le repère cartésien centré sur l'USBL de surface, donc les champs numérotés 31 à 33.

Pour l'orientation, les paquets "System State Packet" et "Remote System State Packet" fournissent des orientations dans le repère NED. A partir de ces orientations peuvent être définies deux rotations :

- ◆ Rotation depuis le repère de l'USBL de surface vers le repère NED
- ◆ Rotation depuis le repère NED vers le repère de l'USBL de fond

Ces rotations peuvent être représentées sous plusieurs formes, notamment celles de matrice de rotations et des quaternions. La rotation depuis le repère de surface vers le repère de fond peut ainsi être obtenue en composant les deux rotations définies précédemment, ce qui peut par exemple se faire en effectuant un produit matriciel de leur matrice de rotation respective.

3.2.2 Interfaçage ROS2

Toujours dans l'objectif d'une intégration dans une architecture logicielle globale, un nœud ROS2 a été construit en C++ autour du programme fourni par Advanced Navigation afin de lire les données présentes sur le serveur TCP de l'USBL de surface.

La bibliothèque "tf2" de ROS2 permet de définir la transformation entre différents repères selon le même formalisme que les poses : une translation et une rotation sous forme de quaternion. Dans notre cas trois poses sont définies et publiées par le nœud avec les transformations associées :

- ◆ Pose de l'USBL de surface dans le repère NED centré sur l'USBL de surface (rotation seule)
- ◆ Pose de l'USBL de fond dans le repère de l'USBL de surface, obtenue comme décrit dans la section 3.2.1
- ◆ Pose du centre de la mesure de champ électrique dans le repère de l'USBL de fond, dans un premier temps cette transformation sera fixée comme une translation seule

3.2.3 Essais préliminaires

L'environnement de visualisation RVIZ est prévu pour fonctionner avec ROS (ici RVIZ et ROS2). Il permet notamment de visualiser les poses et les repères lorsque ceux-ci sont publiés. Il a donc pu être utilisé afin de vérifier que la rotation entre l'unité de surface et celle de fond publiée par le nœud présenté dans la partie précédente était correctement définie. La figure 3.5 montre le résultat visible lorsque les USBL sont alignés, c'est-à-dire lorsqu'ils sont orientés de sorte que leurs repères soient confondus.

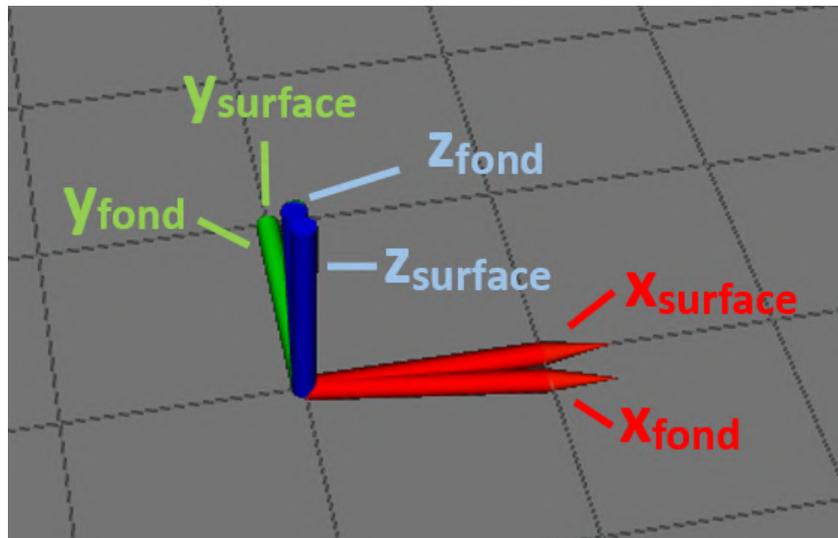


FIGURE 3.5 – Visualisation de l'alignement des repères

Le léger biais observé peut-être expliqué par la difficulté d'aligner exactement les USBL. Le résultat est toutefois satisfaisant pour confirmer la bonne définition des différents repères.

Ainsi la matrice de rotation du repère de surface vers celui de fond peut être construite à partir du quaternion contenu dans le message de pose. Cette matrice est utilisée par la suite afin d'effectuer le changement de repère du vecteur des champs électriques mesurés.

3.3 Interfaçage avec le BlueROV

3.3.1 Interfaçage des systèmes

En premier lieu, un état des lieux du ROV a été réalisé. Un défaut d'étanchéité a été détecté sur l'enceinte contenant l'électronique du ROV provenant d'un des pénétrateurs de câble d'alimentation de moteur. Cette perte d'étanchéité est due au fait que les anciens modèles de moteur du BlueRobotics sont montés avec un pénétrateur résiné, résine qui a tendance à perdre en élasticité avec le temps et donc à craquer. Le moteur en cause a ainsi été remplacé et une

attention toute particulière sera par la suite portée sur l'étanchéité des anciens pénétrateurs de moteur restants.

Une première version embarquable de l'électronique de mesure de champ électrique, visible figure 3.6, a été développée. Celle-ci se doit d'être parfaitement étanche puisqu'elle sera par la suite montée sur le ROV.

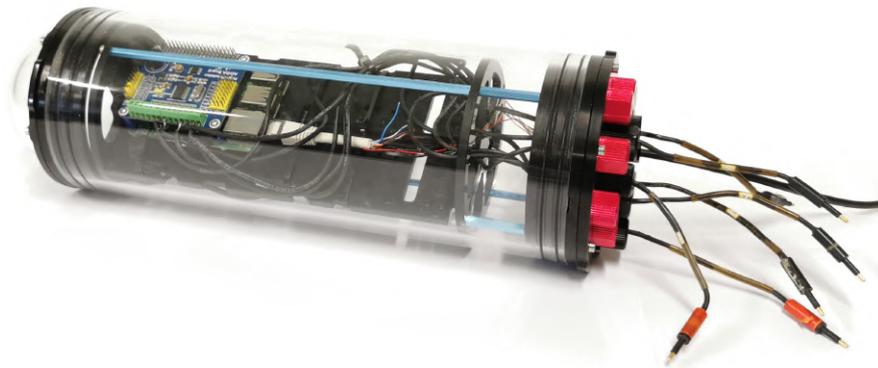


FIGURE 3.6 – Electronique de mesure embarquée

Celle-ci se compose d'une enceinte étanche fournie par BlueRobotics contenant le support sur lequel l'ordinateur embarqué est fixé. Dans une optique d'indépendance du système de mesure de champ électrique, ce dernier est alimenté par une batterie externe, elle aussi fixée au support contenu dans l'enceinte. Le choix a été fait de faire sortir des connecteurs simples étanches de la carte d'acquisition afin de pouvoir y connecter au choix le trièdre présenté précédemment ou six électrodes individuelles. Une étape de résinage des pénétrateurs a donc été réalisée afin d'assurer l'étanchéité de l'ensemble. Enfin un câble étanche couplé à un pénétrateur étanche ont été rattachés à une prise RJ45 afin de pouvoir connecter l'ordinateur embarqué au PC de surface dans l'optique d'accéder aux mesures effectuées en temps réel.

Un assemblage des différents composants à embarquer a ensuite été effectué. L'électronique embarquée dans sa version "Stand alone" a été fixée sous le ROV grâce au chariot pour charge utile fourni par BlueRobotics, tandis qu'un support pour l'USBL de fond développé à l'ENSTA Bretagne [7] a été réutilisé pour le fixer au dessus du ROV. Des premières expériences ont montré que le câble utilisé initialement pour assurer la connexion réseau de la Raspberry Pi de mesure de champ électrique émettait du bruit capté par la carte d'acquisition. Ce dernier a donc été remplacé par un câble réseau blindé équipé de pénétrateurs et résiné afin d'assurer une liaison étanche entre l'électronique embarquée et celle d'origine du ROV.

Le placement des électrodes sur le ROV a été choisi afin de maximiser la distance inter-électrodes pour avoir une meilleure résolution tout en respectant l'orientation du repère de l'USBL de fond. Toutefois et dans l'optique de garder une flexibilité sur leur positionnement, les électrodes ont été fixées avec une pâte adhésive réutilisable.

3.3.2 Interfaçage réseau

Ensuite, un travail de mise en réseau a été réalisé. Un switch ayant d'ores-et-déjà été ajouté au ROV lors d'un précédent projet mené par des étudiants de l'ENSTA Bretagne [7],

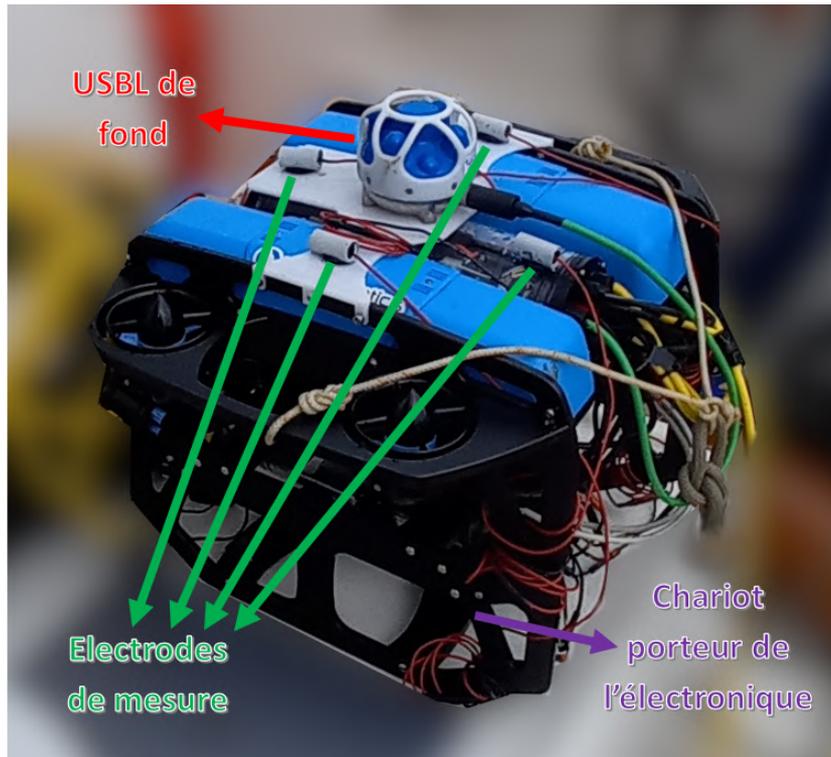


FIGURE 3.7 – Assemblage final du ROV

l'USBL de fond et l'ordinateur de mesure de champ électrique ont pu y être directement connectés. Le câble réseau sortant de l'enceinte contenant l'électronique de mesure de champ électrique a lui aussi été connecté afin que tous les appareils soient présents sur un unique réseau. Côté surface, un boîtier fourni par BlueRobotics permet de relier le câble sortant de la carte d'interface du ROV à un PC de surface par USB. Une modification a toutefois dû être apportée afin que les informations sortant du ROV passent par un switch de surface sur lequel l'USBL de surface est connecté. Cette nouvelle architecture, représentée figure 3.8, permet ainsi à la fois la communication entre les USBL, la commande du ROV par le PC de surface et l'accès aux mesures de champ électrique depuis la surface.

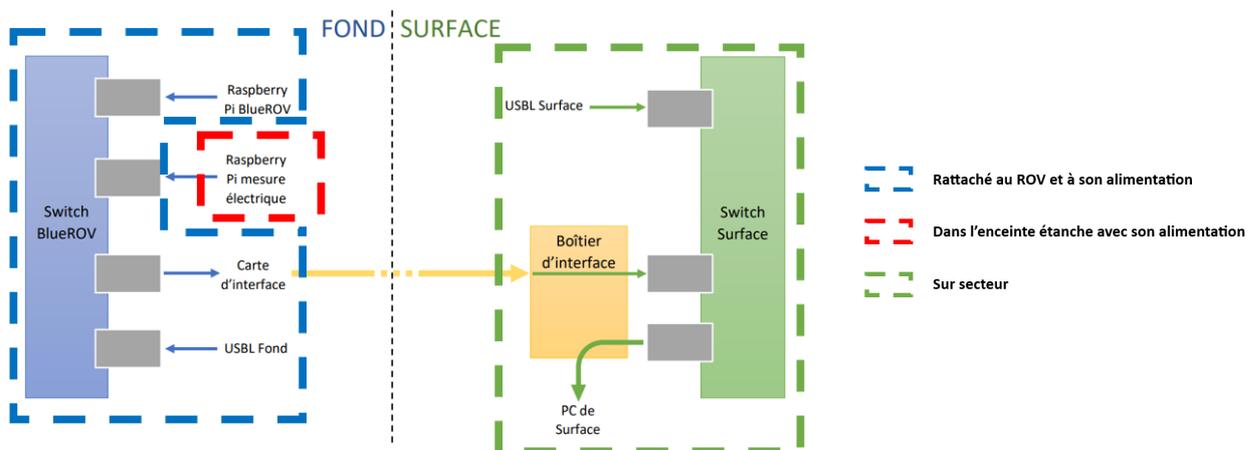


FIGURE 3.8 – Architecture réseau globale

3.4 Développement de l'IHM

Un interfaçage logiciel a été finalement développé. Le positionnement fonctionnant par le biais d'un nœud ROS2, il aurait été possible de le greffer au logger créé pour afficher les mesures de champ électrique. Cependant, ce dernier étant codé sous python, l'affichage se trouvait être lourd et revenait au premier plan à chaque actualisation, ce qui n'est pas très fonctionnel.

Dans l'objectif de réaliser une interface utilisateur opérationnelle et ne nécessitant pas de connaissances particulières en robotique, une interface commune a été développée sous LabVIEW, logiciel de programmation graphique permettant entre autre de créer des applications et de quoi les installer sur n'importe quelle machine supportée. Elle a pour rôle à la fois d'afficher les mesures de position et de champ électrique en temps réel et de fournir les logs dans un fichier au format importable dans IMEVE.

Cette interface comprend deux fenêtres principales munies de plusieurs fonctionnalités :

- ◆ **Paramétrage** de la mesure de champ électrique. Pour ce faire des champs sont réservés afin de renseigner l'espacement des électrodes et l'offset mesuré lors du calibrage ①. Afin de mesurer cet offset il suffit de mettre le ROV à l'eau sans champ électrique sous-marin ambiant et d'utiliser la fonction "réglage offset" ② présente sur l'onglet d'affichage.
- ◆ **Visualisation** de l'état du ROV. Une première zone sur le côté gauche de l'onglet d'affichage ③ permet de visualiser le champ électrique mesuré selon les trois axes. Deux fenêtres sur la droite de ce même onglet ④ permettent quant à elles de contrôler la position du ROV dans le repère du navire selon deux vues (vue du dessus et vue de l'arrière). Le contenu brut des messages ROS et aussi disponible sur l'onglet "setup" dans la fenêtre d'état ⑤.
- ◆ **Projection** dans le repère bateau ⑥. Afin de faciliter l'interprétation des champs électriques mesurés en temps réel cette fonction projète les mesures de champ électrique dans le repère du navire (ou de l'USBL de surface). Cette projection utilise l'orientation du ROV fournie dans le message de Pose pour déterminer la matrice de rotation à multiplier par la matrice des champs mesurés dans le repère ROV afin de les obtenir dans le repère navire.
- ◆ **Enregistrement** de l'état du ROV dans un format interprétable par IMEVE ⑦. Les différents fichiers appelés par IMEVE sont à spécifier dans l'onglet "setup" ⑧. Une communication par serveur et client TCP a été établie entre l'interface LabVIEW et le script IMEVE afin d'appeler la résolution du problème inverse de IMEVE à la fin de l'enregistrement. Cette communication pourra par la suite être réutilisée afin de paramétrer le projet IMEVE (position et nombre de sources, conductivité du milieu ...) depuis l'interface LabVIEW.

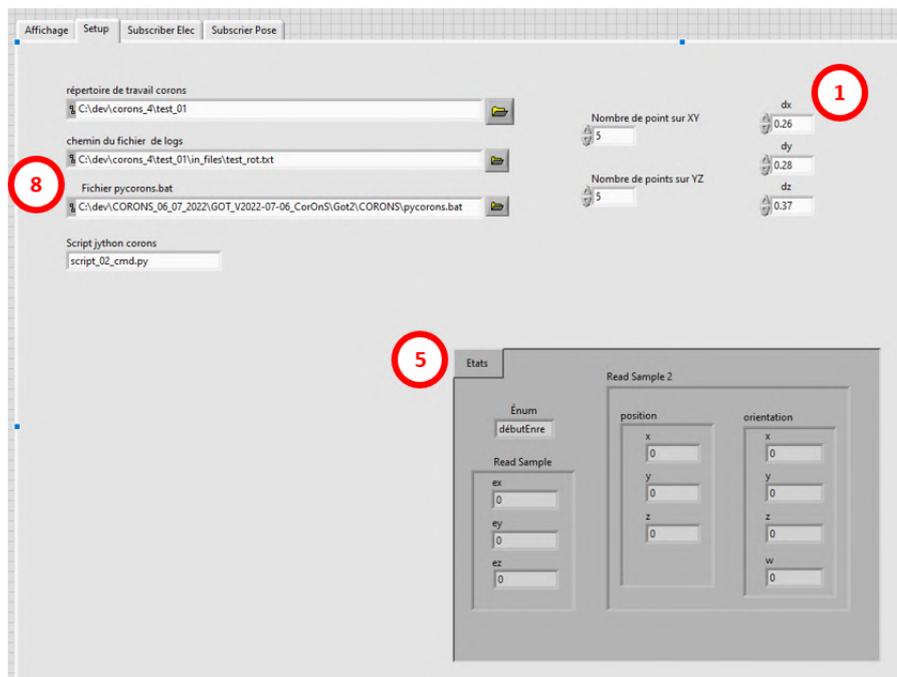
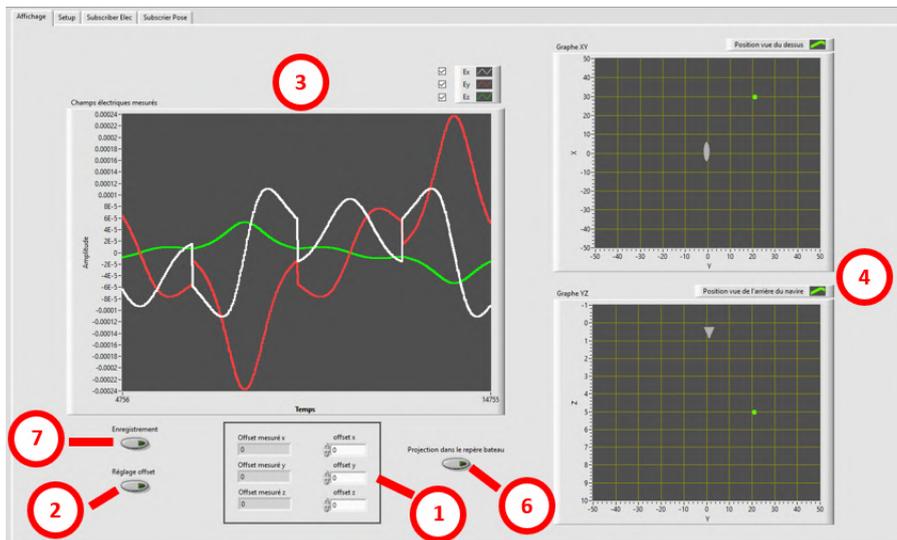


FIGURE 3.9 – Onglets d’affichage (haut) et de réglage (bas) de l’interface LabVIEW

Chapitre 4

Expérimentations

4.1 Essais en bassin

Le but des essais menés dans le bassin du site de DGA TN Brest est de vérifier le fonctionnement de l'ensemble du système développé avant de mener des expériences en mer. Dans ce cadre plusieurs séries d'essais ont été menées. Pour ces essais, deux solutions techniques ont été mises en œuvre afin de générer un champ électrique sous-marin (visibles figure 4.1) : deux électrodes en laiton (aussi appelées électrodes barrage électrique) et l'anguillette, cylindre de 2m de long pour un diamètre de 15cm et équipé d'une électrode à chaque extrémité. Cette dernière servira aussi de support pour attacher l'USBL de surface. Ces sources de champ électrique sont de plus équipées d'outils de mesure du courant injecté, ce qui permet de connaître le courant à retrouver à l'issu de nos calculs. La conductivité de l'eau a été mesurée à l'aide d'un conductimètre, ce qui donne une conductivité de $38.5mS/m$ dans le bassin.

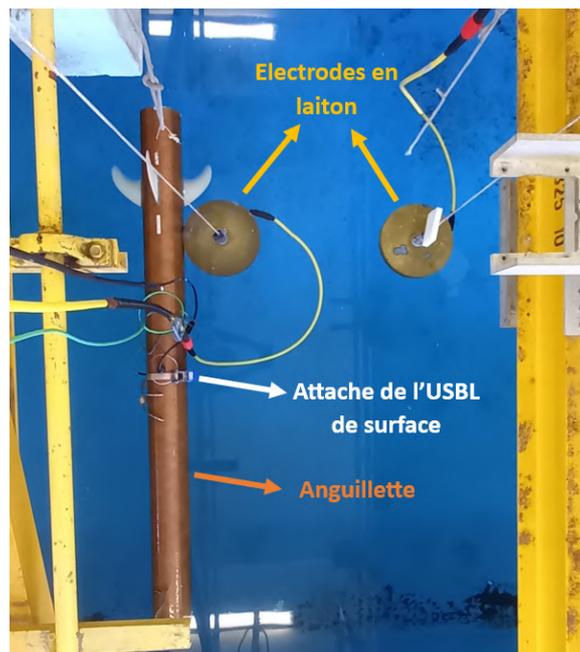


FIGURE 4.1 – Solutions de génération de champ électrique sous-marin

4.1.1 Vérification de l'orientation des axes de mesure du champ électrique sous-marin

On s'intéressera principalement au signe du champ mesuré sur chaque axe et aux variations de ce dernier lorsque le ROV se déplace autour des sources. L'objectif est ici de vérifier l'orientation des axes de mesure sur le ROV.

Le dispositif d'essai figure 4.2 permet de générer un champ électrique dans le bassin. Ce dispositif a été modélisé sous IMEVE sous la forme de deux sources et d'une interface entre l'eau et l'air, interface se situant 50cm au-dessus des sources de courant.

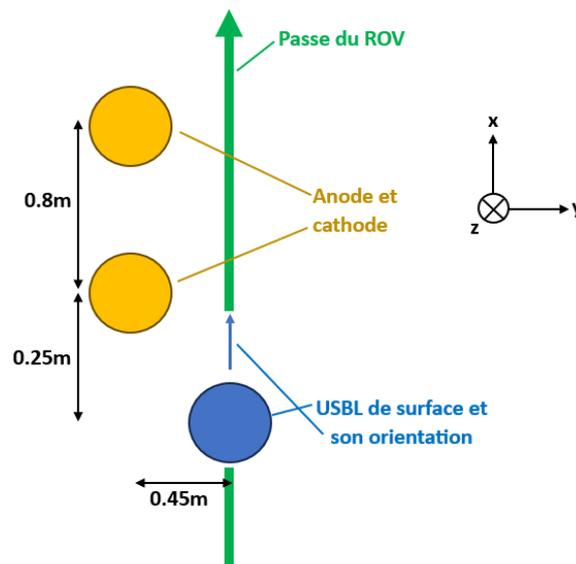


FIGURE 4.2 – Dispositif d'essai pour la vérification de l'orientation des axes de mesure

Afin de comparer les mesures, on s'intéressera ici à une trajectoire en ligne droite parallèle aux électrodes et à 1.7m de profondeur, correspondant à un position du ROV à mi-profondeur du bassin. Le courant injecté dans les électrodes, immergées dans de l'eau douce, était de 250mA. La figure 4.3 représente les composantes du champ électrique mesuré sur cette ligne avec à gauche la théorie donnée par le modèle IMEVE décrit précédemment et à droite la mesure effectuée par le ROV.

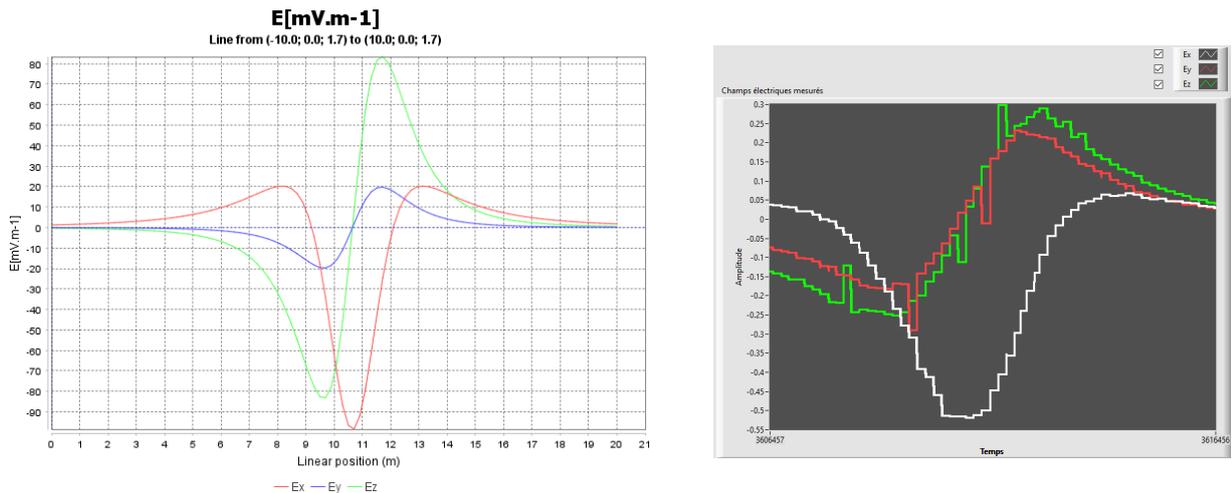


FIGURE 4.3 – Vérification de l'orientation des axes de mesure

On observe que les trois composantes du champ électrique mesuré par le ROV varient de la même manière que celles du champ théorique. Ainsi le résultat de cet essai permet de confirmer l'implémentation des électrodes sur le ROV. Des essais similaires ont alors été réalisés afin de vérifier la projection des mesures dans le repère de surface.

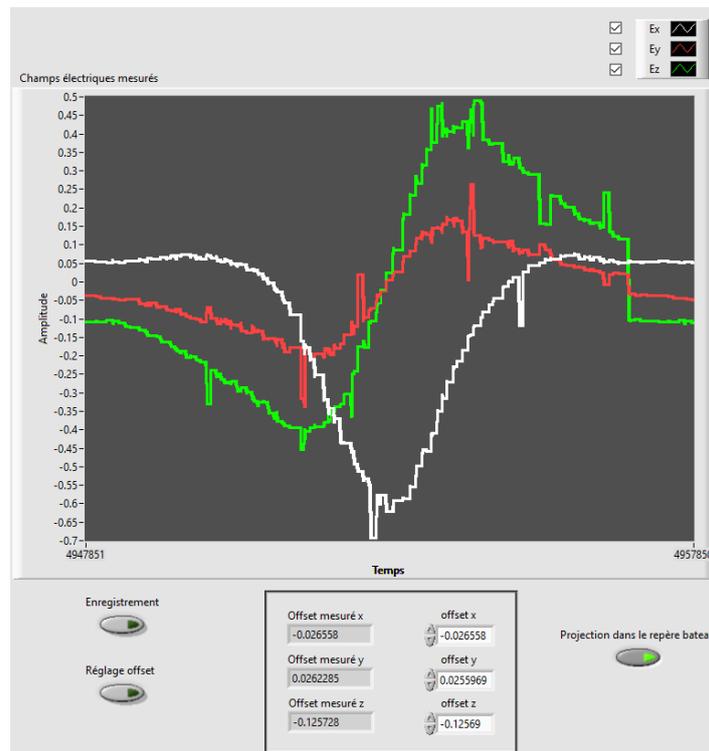


FIGURE 4.4 – Vérification de la projection des mesures

Pour ce faire une trajectoire identique à celle présentée précédemment a été réalisée mais avec le ROV aligné sur l'axe y (passe "en crabe"). L'option d'affichage "Projection dans le repère bateau" implémentée dans l'interface LabVIEW a alors été activée, option permettant de visualiser directement les mesures projetées. Le résultat figure 4.4 a été obtenu, résultat

étant lui aussi similaire à celui donné par le modèle IMEVE (Cf figure 4.3) permettant ainsi de vérifier la projection des mesures.

4.1.2 Vérification de l'amplitude des champs électriques mesurés

Une fois l'orientation des axes validée, une série d'essais a été réalisée afin de vérifier la cohérence des amplitudes mesurées par le système d'acquisition. Pour ces essais, le banc de mesure MADEO (visible figure 4.5) a été utilisé comme référence.

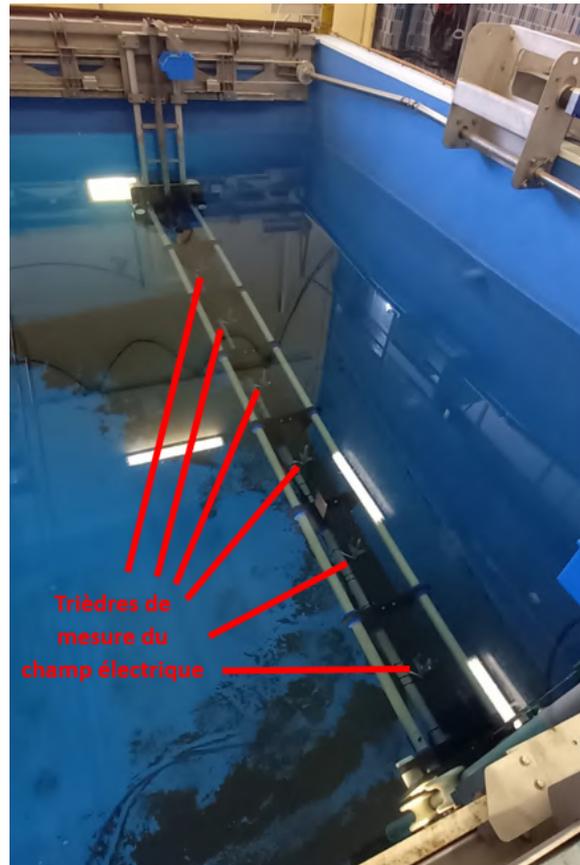


FIGURE 4.5 – Banc de mesure MADEO

Les sources de courant sont situées et réglées comme dans l'essai précédent, c'est-à-dire avec un courant injecté de 250mA. Le banc MADEO est équipé de sept trièdres de mesure de champ électrique identiques à celui présenté précédemment (voir figure 2.3) et peut être réglé en immersion et déplacé selon la longueur du bassin, ce qui permet de produire une trajectoire similaire à celle du ROV. La trajectoire sur laquelle les mesures ont été effectuées se situe à 1m20 de profondeur et en parallèle des électrodes. Le traitement des données du banc MADEO parlant en terme de champ longitudinal, transversal et vertical, la correspondance donne E_L pour E_x , E_T pour E_y et E_D pour E_z . Afin d'effectuer la mesure avec le ROV, une étape de mesure de la conductivité de l'eau et de l'espacement inter-électrodes de mesure puis de calibrage a été conduite en amont des mesures. Ce calibrage se présente sous la forme d'une mesure d'offset sur chacune des voies de la carte d'acquisition, offsets provenant du fait que les électrodes de mesure ont un potentiel électrique une fois immergées et que ce potentiel varie en fonction des caractéristiques du milieu. Une estimation de ces derniers est réalisée en effectuant

une acquisition des tensions mesurées sur les voies différentielles de la carte d'acquisition en l'absence de champ électrique ambiant. Les résultats obtenus sont représentés figure 4.6.

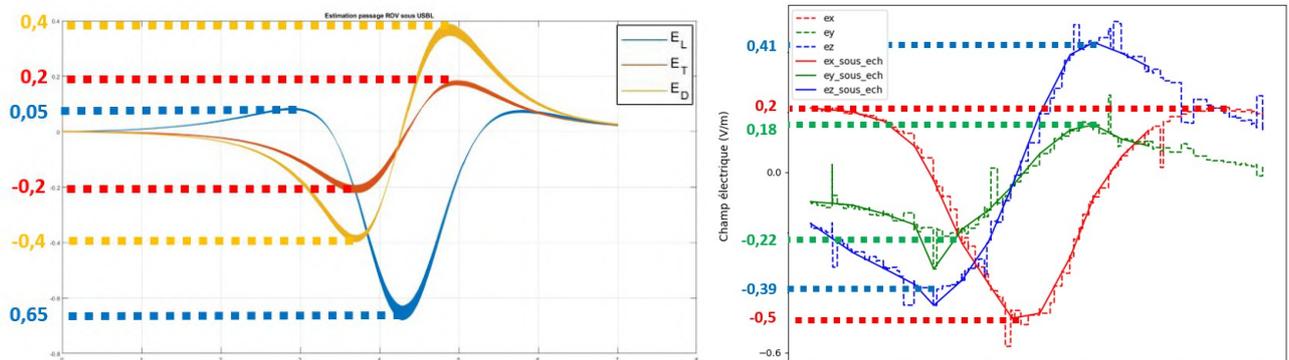


FIGURE 4.6 – Champ électrique sous-marin mesuré par MADEO (gauche) et par le ROV (droite)

Sur les mesures effectuées par le ROV on observe des variations de pic à pic de $0,7V/m$ sur l'axe x, $0,4V/m$ sur l'axe y et $0,8V/m$ sur l'axe z. Ces amplitudes sont similaires à celles mesurées par MADEO, on peut ainsi confirmer que l'amplitude du champ électrique mesuré le ROV est cohérente avec l'amplitude réelle. Ces mesures pourront donc être utilisées afin d'évaluer des signatures électriques sous-marines.

4.1.3 Utilisation des USBL et post-traitement

Enfin le fonctionnement du positionnement par USBL a été vérifié. L'objectif est de vérifier que les USBL sont capables de fournir une position et que cette dernière est cohérente avec la réalité. Le dispositif d'essai précédent a été réutilisé en effectuant cette fois un enregistrement de l'état du ROV sur la trajectoire. L'évolution de la position (par composante) mesurée sur cette trajectoire est présentée figure 4.7.

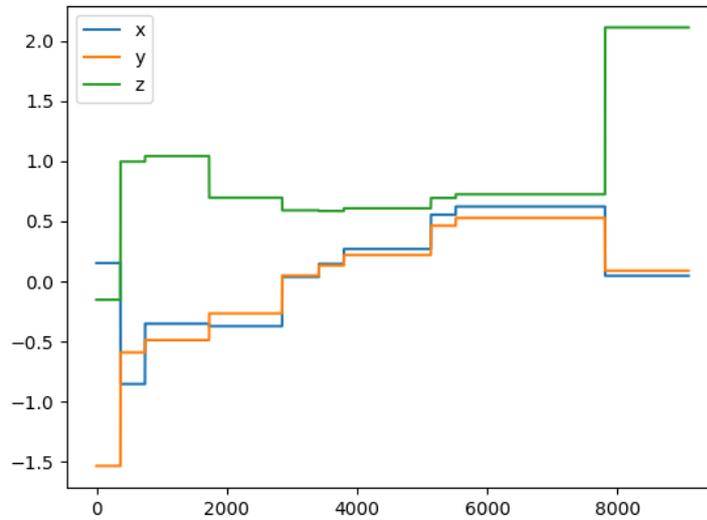


FIGURE 4.7 – Positions enregistrées par l'USBL

On observe bien que des positions sont enregistrées ce qui permet de confirmer que la communication acoustique entre les USBL fonctionne. On observe toutefois des "paliers" dus au fait que le logger LabVIEW garde en mémoire, et enregistre, la dernière position connue tant qu'il n'a pas reçu de nouvelle position.

Ces paliers peuvent être problématiques lors de l'évaluation de la signature car à une même position seront attribuées plusieurs mesures de champ. Un post-traitement sous la forme d'un programme python a donc été mis en place afin de ne garder que les mesures effectuées à la réception d'une nouvelle position. La figure 4.8 présente en pointillé les composantes du champ électrique mesuré sur la trajectoire (en rouge la composante selon l'axe x, en vert selon y et en bleu selon z) et en trait plein le résultat du post-traitement.

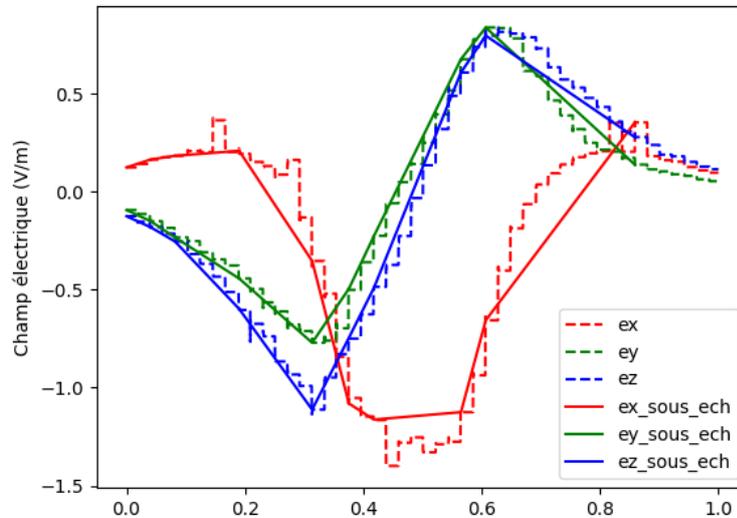


FIGURE 4.8 – Traitement du fichier de mesure

Si le fichier de mesure issu du post-traitement comporte moins de points que l'original, on constate que la forme générale des courbes est conservée. Il est donc pertinent d'utiliser par la suite ce fichier pour procéder à l'évaluation de la signature électrique sous-marine avec le code de calcul IMEVE.

Ces essais ont toutefois mis en avant la difficulté que peuvent avoir les USBL à fournir une position correcte dans un bassin fermé, dont les dimensions sont 10.05m de long, 5.05m de large et 2.55m de profondeur. On peut en effet observer sur la figure 4.5 que la trajectoire devrait donner des positions constantes selon les axes y et z puisque le déplacement s'effectue selon l'axe x seul. On remarque toutefois figure 4.7 que la position selon l'axe y varie et que des positions aberrantes apparaissent, par exemple sous la forme de profondeurs négatives.

Le premier problème a été résolu en supprimant un offset de cap qui avait auparavant été réglé sur l'interface de l'USBL de surface. Cet offset avait pour effet de "tourner" le repère de surface, faisant que les axes x et y selon lesquels les positions étaient données ne correspondaient plus aux axes "physiques" de l'USBL.

Les positions aberrantes quant à elles proviennent probablement de la réflexion des ping de l'USBL de fond sur les parois du bassin avant de parvenir à l'USBL de surface. Dans la section suivante, nous nous affronchons de ce phénomène en menant des essais en mer.

4.2 Essais en mer

Les essais décrits ci-dessous ont été réalisés sur deux journées à partir du ponton de DGA Techniques Navales à Lanvéoc, visible figure 4.9



FIGURE 4.9 – Ponton d’essais

Trois phases d’essais ont été planifiées. La première phase avait pour but de caractériser les incertitudes de positionnement des USBL pour être capable de les prendre en compte par la suite. Les deux dernières phases quant à elles visaient à évaluer la signature électrique de deux puis de quatre sources de champ électrique.

Pour ces différents essais les électrodes en laiton et l’anguillette (Cf figure 4.5) serviront de sources et seront fixées et localisées sur le ponton. De plus un générateur de courant a été prévu pour alimenter les électrodes en laiton, l’anguillette étant alimentée par une valise indépendante. L’anguillette servira aussi de support pour l’USBL de surface qui est lui alimenté depuis les prises 220V disponibles sur la digue encadrant le ponton.

4.2.1 Phase 1 - Vérification de la précision du positionnement par USBL

Une première série d’essais a été réalisée afin de vérifier la qualité du positionnement par USBL. Dans ce cadre, le dispositif figure 4.10 a été mis en place.

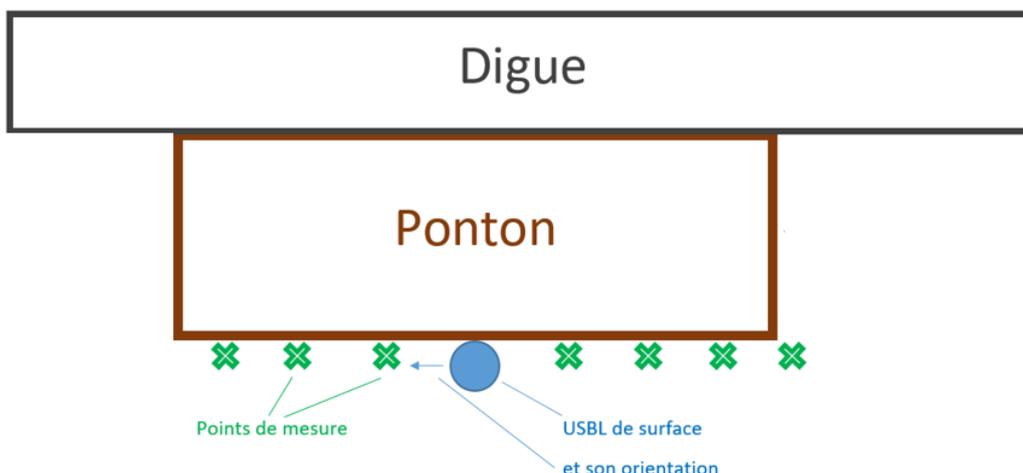


FIGURE 4.10 – Dispositif d’essai de positionnement

L'USBL de surface a été fixé sous l'anguillette, elle-même immergée à 50cm de la surface et fixée au ponton par des bouts. Des points ont été repérés et localisés sur le ponton à l'aide d'un mètre afin de servir de positions de références. Parmi ces points se trouvent les positions des électrodes du barrage électrique qui ont été immergées pour servir de point de mesure et pour en contrôler la position. Le ROV a ensuite été immergé à l'aplomb de ces points et les positions mesurées sur le ponton et celles mesurées par le ROV ont été comparées. L'ensemble de ces positions est représenté sur la figure 4.11.

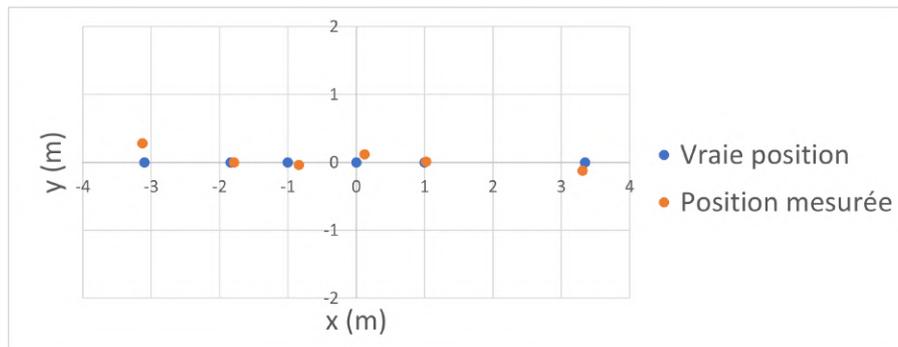


FIGURE 4.11 – Résultats des essais de positionnement

Les positions mesurées sont cohérentes avec les positions réelles avec une erreur moyenne, en norme, de 14cm et une erreur maximale de 22cm. Cette erreur est inférieure aux 50cm du cahier des charges et peut être assimilée au mouvement des différents éléments dans l'eau.

Pour ce qui est de l'orientation des USBL, des problèmes ont été détectés sur le magnétomètre de l'USBL de surface empêchant de l'utiliser comme source de cap. Un réglage manuel du cap de l'unité de surface a donc été effectué afin de correspondre au cap fourni par l'unité de fond lorsque ces derniers sont alignés. Une vérification régulière de l'orientation de l'USBL de surface a alors été mise en place afin d'en contrôler la dérive.

4.2.2 Phase 2 - Évaluation de la signature électrique sous-marine en présence de deux sources

Ces essais ont pour but de vérifier la partie évaluation de la signature électrique du projet DELFIN. Le dispositif précédent a été réutilisé afin de disposer de deux paires de sources de champ électrique avec des espacements, et potentiellement des courant injectés, différents. Ce dispositif est représenté figure 4.12.

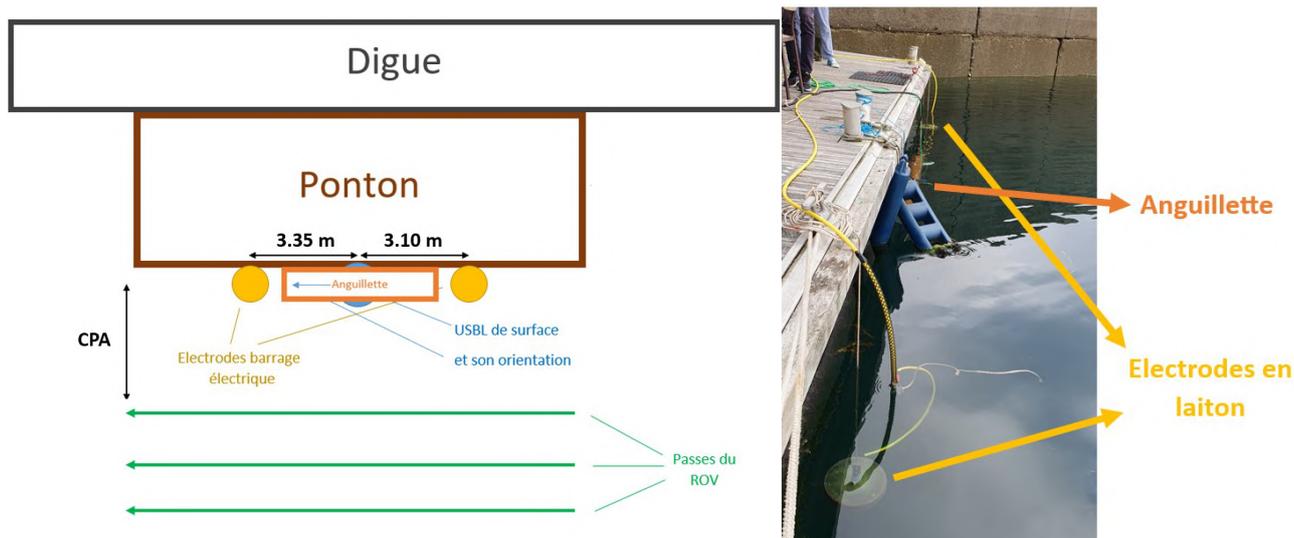


FIGURE 4.12 – Dispositif des essais d'évaluation de la signature

Avant de pouvoir effectuer les mesures de champ électrique avec le ROV, une étape de calibrage est nécessaire. Cette dernière comprend une mesure de la position des électrodes de mesure sur le ROV, une mesure de la conductivité de l'eau et une estimation des offsets mesurés sur chaque voie. La conductivité mesurée est de $4.57S/m$ ce qui est plus élevé que lors des essais en bassin, les courants injectés seront donc eux aussi à augmenter (Cf formule liant champ électrique, courant et conductivité à la fin de l'Annexe B).

Pour chaque essai conduit, un modèle correspondant a été construit pour IMEVE en modélisant les sources de champ électrique et l'interface air/eau. Les passes effectuées par le ROV sont définies par leur profondeur, par rapport à l'USBL de surface, et leur CPA, plus petite distance horizontale entre le ROV et l'USBL de surface. Ces passes seront effectuées parallèlement à l'axe des électrodes, pour correspondre aux passes longitudinales effectuées sur les moyens de mesure actuels, et avec un CPA d'au moins 1m afin d'observer des variations du champ électrique selon les trois axes de mesure.

Dans un premier temps seules les électrodes en laiton ont été alimentées par un courant mesuré à 5A et plusieurs passes à différentes profondeur et avec des CPA différents ont été effectuées.

Une passe a été effectué à 4m de profondeur avec un CPA de 1.5m et a été utilisée comme référence pour corriger les offsets mesurés précédemment. Nous avons constaté qu'un gain devait être pris en compte pour faire correspondre l'amplitude du champ électrique théorique et celle du champ mesuré, ce dernier a donc lui aussi été déterminé en utilisant cette passe de référence. Ces mêmes coefficients ont par la suite été appliqués à toutes les mesures effectuées et sont renseignés table 4.1.

Axe	x	y	z
Offset (mV/m)	3,0	4,5	1,0
Gain	1,4	1,7	1,4

TABLE 4.1 – Offsets et gains mesurés sur la passe de référence

La figure 4.13 montre le résultat obtenu sur la passe de référence. Pour l'obtenir une trajectoire proche de la trajectoire réelle a été modélisée et utilisée comme support dans IMEVE afin de calculer la signature électrique théorique sur cette même trajectoire pour des courants de $\pm 5A$ (en pointillés sur la figure). Une fois les offsets corrigés et le gain appliqué sur le fichier de mesure, le code de calcul IMEVE a été appliqué pour déterminer les courants injectés dans chacune des sources (voir passe 1 dans la table 4.2). Ces courants ont ensuite été utilisés par IMEVE afin de calculer la signature électrique correspondante sur la trajectoire modélisée précédemment (en train plein sur la figure).

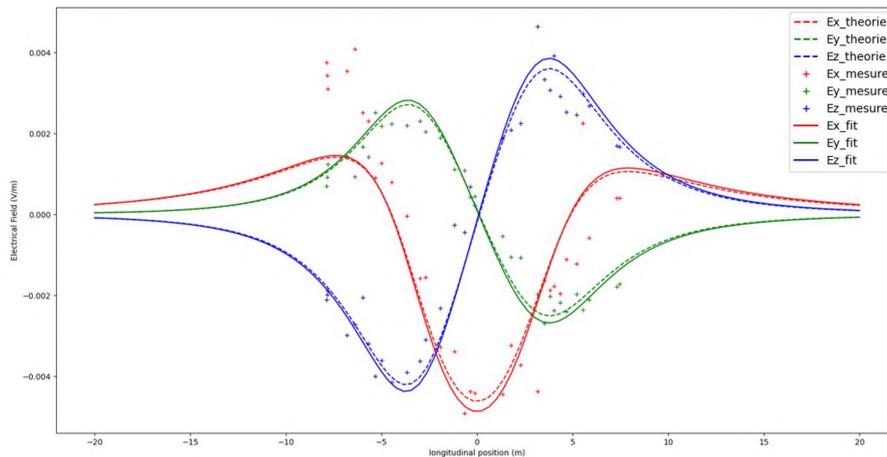


FIGURE 4.13 – Champ électrique théorique (pointillés), mesuré (croix) et calculé (trait plein) avec deux sources

D'autres passes ont été réalisées sur ce même dispositif avec un CPA de 1.5m pour être passées dans le code de calcul IMEVE. Les résultats sont résumés dans la table 4.2, la dernière ligne correspondant au résultat trouvé lorsque les trois passes précédentes sont combinées.

Passé	Profondeur (m)	I1 (A)	I2 (A)	Écart relatif (%)
1	4	-5,2	5,3	5,0
2	2	-4,7	4,6	7,0
3	3	-4,8	5,4	2,0
1+2+3	2 à 4	-4,8	4,7	5,0

TABLE 4.2 – Courants calculés par IMEVE pour un courant mesuré de $\pm 5A$

Ce premier résultat est assez proche de la théorie, avec une erreur relative de 5%, et les courants obtenus respectent la conservation du courant. Les offsets et gains mesurés permettent donc d'obtenir des résultats constants et seront appliqués dans la suite des essais.

4.2.3 Phase 3 - Évaluation de la signature électrique sous-marine en présence de quatre sources

Afin de mettre le système à l'épreuve, une autre série d'essai a été réalisée en injectant 3A dans l'anguillette en plus des 5A injectés dans les électrodes du barrage électrique. Trois passes ont été effectuées (respectivement à 2m, 3m et 4m de profondeur) puis combinées pour être ensuite traitées par le code de calcul IMEVE. La table 4.3 présente le résultat obtenu, où

I1 et I2 sont les courants calculés pour les électrodes du barrage électrique et I3 et I4 sont les courants associés à l'anguillette.

	I1	I2	I3	I4
Mesuré (A)	-5,0	5,0	3,0	-3,0
Calculé par IMEVE (A)	-4,8	4,6	3,1	-3,2
Erreur relative (%)	4,0	8,0	3,3	6,7

TABLE 4.3 – Comparaison des résultats de mesure avec ceux calculés par IMEVE

Les courants calculés par IMEVE, couplés à un modèle de sources, sont ensuite utilisés afin de prédire la signature électrique sous-marine du système ou navire mesuré. Dans notre cas ces courants ont été utilisés afin de prédire le champ électrique calculé par IMEVE sur chacune des passes précédentes et les comparer au champ théorique sur ces mêmes passes. Afin de pouvoir comparer visuellement ces champs, les résultats des trois passes (par composante) ont été concaténées sur la figure 4.14.

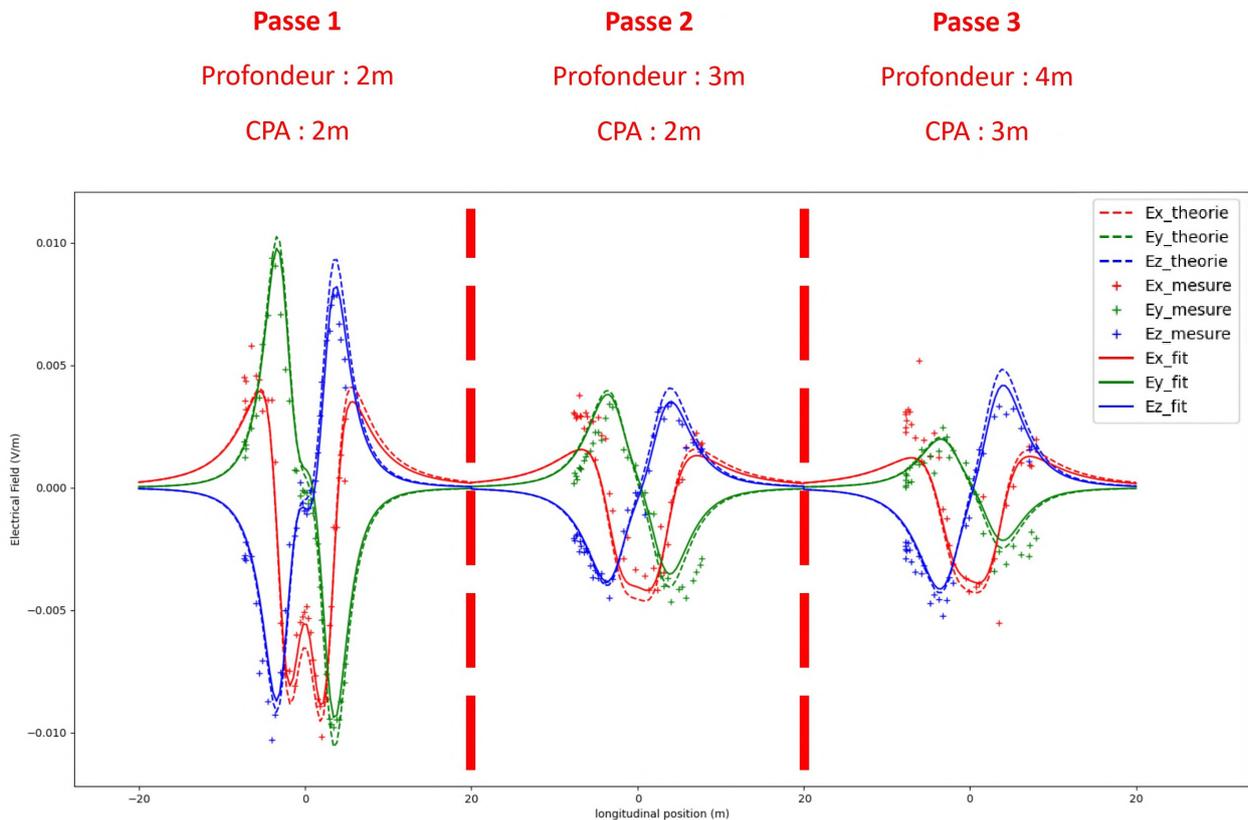


FIGURE 4.14 – Champ électrique théorique (pointillés), mesuré (croix) et calculé (trait plein) avec quatre sources

Cette figure permet de constater que la signature électrique calculée par IMEVE (en trait plein) correspond bien aux points de mesures (croix). Le même modèle IMEVE a été utilisé avec les valeurs de courant mesurées précédemment, c'est-à-dire $\pm 5A$ pour les électrodes du barrage électrique et $\pm 3A$ pour l'anguillette, pour obtenir le champ électrique théorique (en pointillés) qui se superpose au champ électrique calculé.

Finalement, les mesures prises par le ROV DELFIN peuvent être utilisées par le code de calcul IMEVE afin d'évaluer des signatures électriques sous-marines, aussi bien avec deux sources que dans des cas plus complexes. Les positions mesurées par les USBL remplissent le cahier des charges et les champs électriques mesurés sont cohérents avec la théorie obtenue en mesurant directement les courant injectés. Si les offsets mesurés dans la section précédente peuvent être expliqués par une approximation dans le calibrage, un travail d'investigation reste toutefois à entreprendre afin d'identifier l'origine du gain observé. De plus, une fiabilisation du cap de l'USBL de surface en utilisant un GNSS double antenne permettrait probablement d'améliorer la qualité des résultats obtenus, et pourrait de plus permettre l'intégration des positions mesurées dans un logiciel de cartographie. Une fois ces modifications effectuées, une nouvelle série d'essai pourra être menée au port de Lanvéoc en essayant cette fois de s'éloigner de la digue afin de limiter son impact sur les mesures.

Conclusion

Ce Projet de Fin d'Études avait pour objectif de développer un robot sous-marin capable d'évaluer des signatures électriques sous-marine. Ce travail s'est décomposé en quatre axes majeurs à commencer par le développement d'une électronique embarquée de mesure de champ électrique. Cette dernière devait pouvoir effectuer une mesure à hauteur de 1kHz sur trois voies, objectif en grande partie atteint puisque l'architecture finale permet une acquisition à 900Hz par voie. Il sera intéressant de modifier le système d'acquisition en blindant les câbles des électrodes afin d'avoir une mesure plus propre.

Le deuxième axe de travail a été la mise en place d'un système de positionnement acoustique pour localiser le ROV. Cette phase a pris plus de temps que prévu à cause de difficultés avec les INS inclus dans les USBL utilisés. Si la précision des orientations des USBL n'a pas pu être vérifiée, les essais menés ont tout de même permis de confirmer que la précision du positionnement obtenu rentre dans le cahier des charges.

L'électronique embarquée et le système de positionnement ont ensuite été interfacés avec le ROV DELFIN. Cet interfaçage s'est décomposé en une partie mécanique, une partie électronique et une partie réseau. Le résultat est un ROV équipé du système de positionnement acoustique et embarquant l'électronique de mesure de champ électrique et son alimentation indépendante. Le tout communique librement sur le réseau et les diverses informations sur l'état du système peuvent être visualisées en enregistrées via l'IHM qui a été développée sous LabVIEW. Ces résultats peuvent ensuite être traités par le code de calcul IMEVE pour évaluer la signature électrique.

Le système ainsi développé a enfin été mis à l'épreuve lors de deux journées d'essais en mer. Ces dernières ont permis d'évaluer la qualité du positionnement par USBL et de procéder aux premiers essais d'évaluation de signature électrique sous-marine. Les résultats de ces essais sont encourageants pour la suite du projet tout en mettant en lumière de nouveaux axes de travail tel que la fiabilisation du cap fourni par les USBL.

L'objectif initial, ne comprenant que le développement de l'électronique de mesure de champ électrique sous-marin, a été dépassé en ajoutant un travail sur la localisation du ROV et les essais en mer. Ces premiers essais démontrent qu'il est possible d'effectuer des mesures de signatures électriques sous-marines à l'aide d'un robot. Des essais sur de vrais navires restent cependant à mener.

D'un point de vue plus personnel j'ai eu la chance d'effectuer mon Projet de Fin d'Études au sein de l'équipe ÉlectroMagnétisme Sous-Marin de DGA Techniques Navales. Ce stage a été à la fois l'occasion de mettre mes connaissances en robotique en pratique et d'en acquérir de nouvelles dans les domaines de l'électromagnétisme sous-marin et de la guerre des

mines.

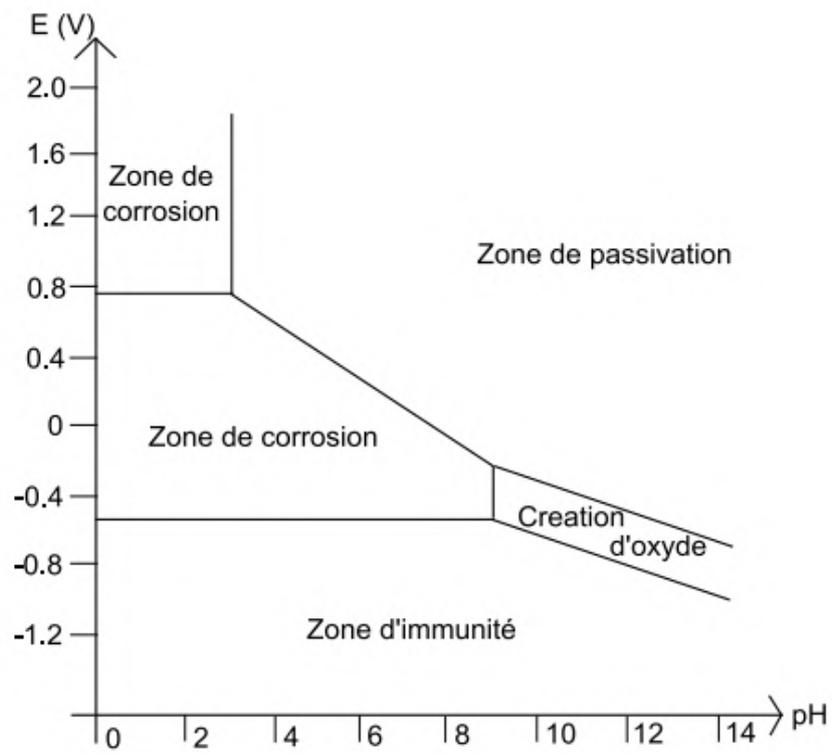
Au cours de ces six mois et grâce à la confiance qui m'a été accordée, j'ai pu travailler sur la localisation du ROV DELFIN en plus de la mesure de champ électrique sous-marin initialement prévue. J'ai ainsi pu entreprendre une étape d'interfaçage, aussi bien interfaçage mécanique et électronique avec le ROV que développement d'une IHM sous LabVIEW. Tous ces travaux mêlant des connaissances acquises au cours de mon cursus à ce nouveau domaine qu'est pour moi l'électromagnétisme sous-marin, ils m'ont permis de donner une nouvelle dimension à ma vision de la robotique.

Bibliographie

- [1] Arnaud GUIBERT. Diagnostic de corrosion et prédiction de signature électromagnétique de structures sous-marines sous protection cathodique, 2009.
- [2] Martin B. Kraichman. *Handbook of electromagnetic propagation in conducting media*. 1970.
- [3] Arnaud LE DOEUFF. Développement et validation d'une électronique embarquée de mesure de champs électriques sous-marins. *Document interne : Stage DGA*, 2021.
- [4] Lucas GUIDDIR. Développement et intégration d'une électronique embarquée pour mesurer la signature électrique sous-marine d'un navire avec un robot sous-marin. *Document interne : Stage DGA*, 2022.
- [5] Burr-Brown Products from Texas Instruments. *Documentation technique Convertisseur AD/DA ADS1256*.
- [6] Advanced Navigation. *Subsonus reference Manual*.
- [7] Alexandre EVAIN, Mourtaza KASSAMALY, Paul PINEAU, Julien PIRANDA, Stefanie SCHWARZ, and Quentin VINTRAS. Réalisation du système de positionnement et de navigation pour la mesure de la signature électrique et magnétique d'un bateau à l'aide d'un bluerov2. *Projet au lac de Guerlédan*, 2021.

Annexe A

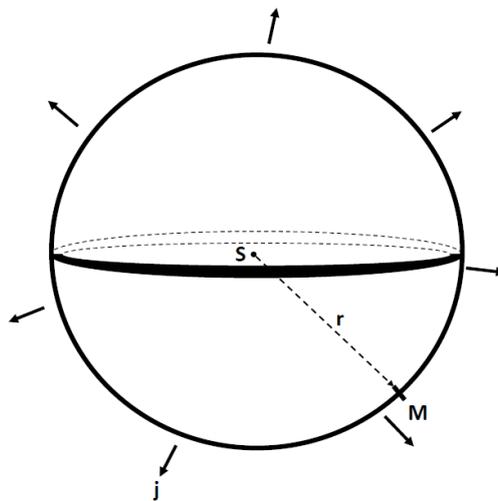
Diagramme de corrosion du fer



Annexe B

Modèle d'une charge ponctuelle

Étant donné le rapport d'ordre de grandeur entre la taille des électrodes et la distance séparant le porteur de l'électronique de mesure de ces dernières, on peut dans un premier temps faire l'approximation qu'une anode et une cathode sont des sources de courant ponctuelles. Une modélisation simple du phénomène est proposée ci-dessous.



D'une source de courant S sort un courant I, courant se propageant sans distinction dans toutes les directions de l'espace. Soit une sphère de rayon r centrée en S, on sait la relation suivante :

$$dI = j * dS, \text{ avec } j \text{ la densité de courant traversant la surface } dS.$$

En intégrant cette équation sur la surface de notre sphère sur laquelle la densité de courant est constante, on obtient :

$$I = j * 4\pi * r^2, \text{ soit } j = \frac{I}{4\pi * r^2}$$

De plus la loi d'Ohm locale donne :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \text{ avec } \sigma \text{ la conductivité du milieu.}$$

En remplaçant la densité de courant par le champ électrique dans le résultat précédent et en posant $\vec{e}_r = \frac{\vec{SM}}{\|SM\|}$ on obtient en tout point M de la surface de la sphère de rayon r :

$$\vec{E} = \frac{I}{\sigma * 4\pi * r^2} * \vec{e}_r$$

Annexe C

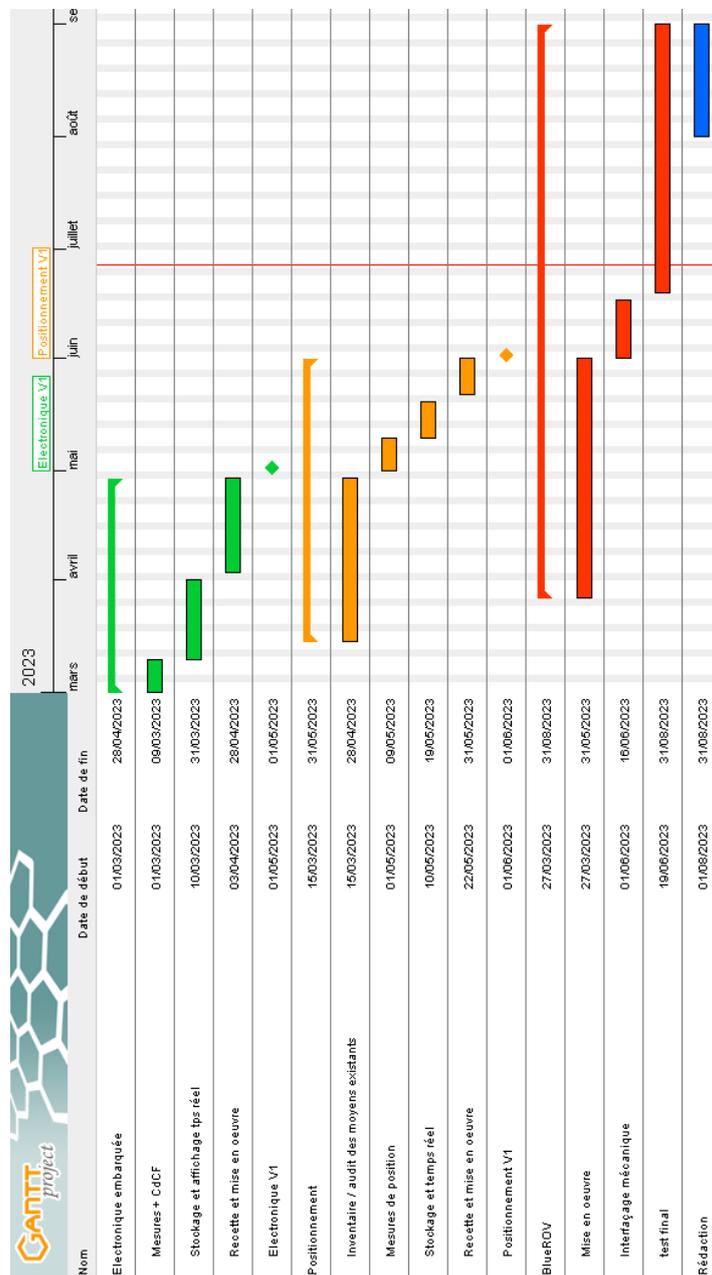
Documentation High-Precision AD/DA Board

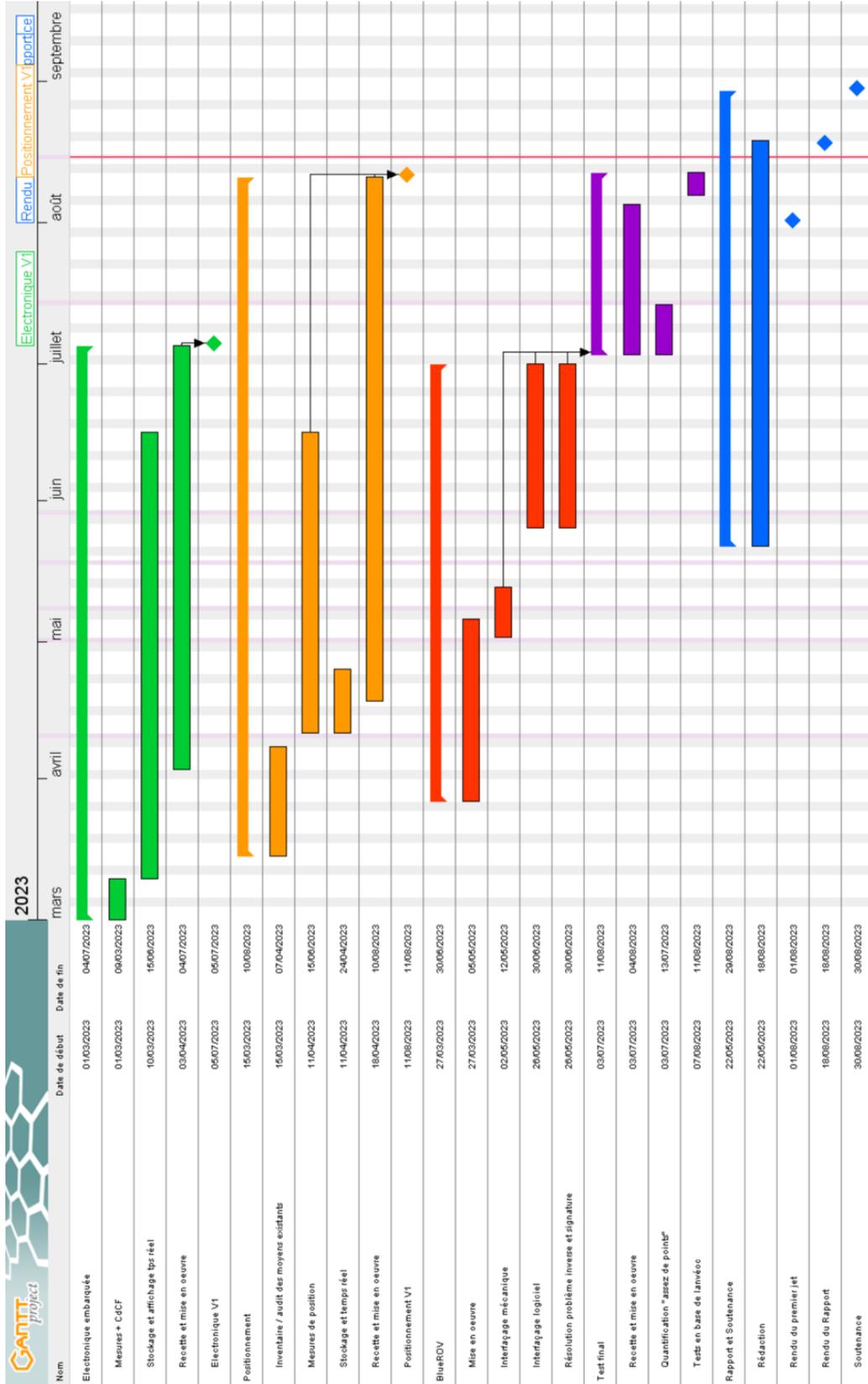
Table 14. Multiplexer Cycling Throughput

DATA RATE (SPS)	CYCLING THROUGHPUT (1/t₁₉) (Hz)
30,000	4374
15,000	3817
7500	3043
3750	2165
2000	1438
1000	837
500	456
100	98
60	59
50	50
30	30
25	25
15	15
10	10
5	5
2.5	2.5

Annexe D

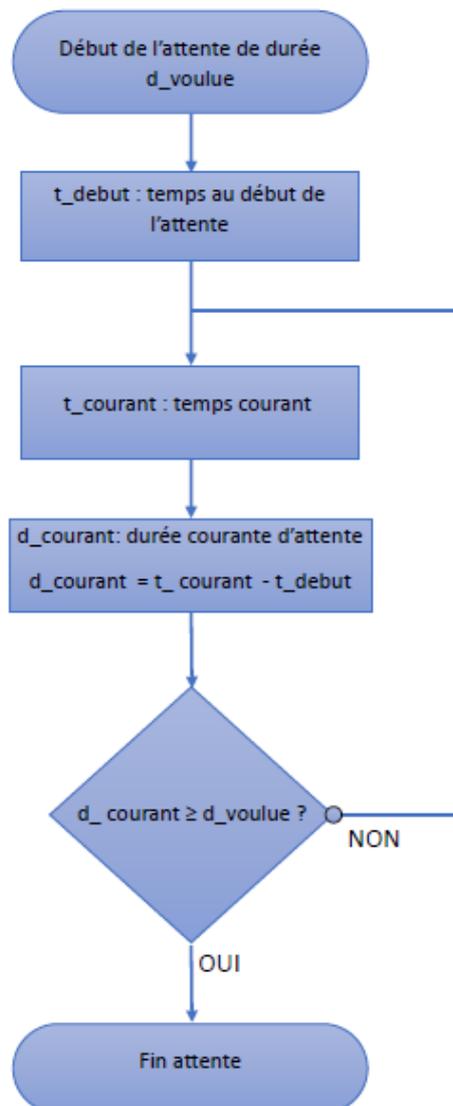
Planification initiale et finale





Annexe E

Fonctionnement de l'attente active



Annexe F

Remote Track Packet



17.9.3 Formatted Time Packet

Formatted Time Packet				
Packet ID			22	
Length			14	
Field #	Bytes Offset	Data Type	Size	Description
1	0	u32	4	Microseconds
2	4	u16	2	Year
3	6	u16	2	Year day, 0 - 365
4	8	u8	1	Month, 0 - 11
5	9	u8	1	Month Day, 1 - 31
6	10	u8	1	Week Day, 0 - 6
7	11	u8	1	Hour, 0 - 23
8	12	u8	1	Minute, 0 - 59
9	13	u8	1	Second, 0 - 59

Table 35: Formatted time packet

17.9.4 Status Packet

Status Packet				
Packet ID			23	
Length			8	
Field #	Bytes Offset	Data Type	Size	Description
1	0	u32	4	Health status, see section 17.9.1.1
2	4	u32	4	System status, see section 17.9.1.2

Table 36: Status packet

17.9.5 Remote Track Packet

The Track Packet contains information about an acoustic track event. This packet is generated when the Subsonus calculates an acoustic position or angle. The fields in this packet contain data for both the Local device and the Remote device. The local Subsonus is the sender of this packet.

Remote Track Packet				
Packet ID			24	
Length			211	
Field #	Bytes Offset	Data Type	Size	Description
1	0	u16	2	Device Address see section 15



2	2	u8	1	Tracking status, see section 17.9.5.1
3	3	u32	4	Local System status, see section 17.9.1.1
4	7	u32	4	Local Filter status, see section 17.9.1.2
5	11	u32	4	Data Valid Flags, see section 17.9.5.2
6	15	u32	4	Local Unix time stamp seconds, see section 17.9.1.4
7	19	u32	4	Local Microseconds, see section 17.9.1.5
8	23	fp64	8	Local Latitude (rad)
9	31	fp64	8	Local Longitude (rad)
10	39	fp64	8	Local Height (m)
11	47	fp32	4	Local Velocity north (m/s)
12	51	fp32	4	Local Velocity east (m/s)
13	55	fp32	4	Local Velocity down (m/s)
14	59	fp32	4	Local Roll (radians)
15	63	fp32	4	Local Pitch (radians)
16	67	fp32	4	Local Heading (radians)
17	71	fp32	4	Local Latitude standard deviation (m)
18	75	fp32	4	Local Longitude standard deviation (m)
19	79	fp32	4	Local Height standard deviation (m)
20	83	fp32	4	Local Roll standard deviation (rad)
21	87	fp32	4	Local Pitch standard deviation (rad)
22	91	fp32	4	Local Heading standard deviation (rad)
23	95	fp32	4	Local Depth (m)
24	99	u32	4	Remote Age in Microseconds, see section 17.9.5.3
25	103	fp32	4	Remote Range (m)
26	107	fp32	4	Remote Azimuth (rad)
27	111	fp32	4	Remote Elevation (rad)
28	115	fp32	4	Remote Position Raw X (m) (no correction)
29	119	fp32	4	Remote Position Raw Y (m) (no correction)
30	123	fp32	4	Remote Position Raw Z (m) (no correction)
31	127	fp32	4	Remote Position X (m) (roll pitch correction)
32	131	fp32	4	Remote Position Y (m) (roll pitch correction)
33	135	fp32	4	Remote Position Z (m) (roll pitch correction)
34	139	fp32	4	Remote North (m) (roll, pitch, heading correction)
35	143	fp32	4	Remote East (m) (roll, pitch, heading correction)
36	147	fp32	4	Remote Down (m) (roll, pitch, heading correction)



37	151	fp64	8	Remote Latitude (rad)
38	159	fp64	8	Remote Longitude (rad)
39	167	fp64	8	Remote Height (m)
40	175	fp32	4	Remote Range standard deviation (m)
41	179	fp32	4	Remote Azimuth standard deviation (rad)
42	183	fp32	4	Remote Elevation standard deviation (rad)
43	187	fp32	4	Remote Latitude standard deviation (m)
44	191	fp32	4	Remote Longitude standard deviation (m)
45	195	fp32	4	Remote Height standard deviation (m)
46	199	fp32	4	Remote Depth (m)
47	203	s8	1	Signal Level (dBV)
48	204	s8	1	Signal To Noise Ratio (SNR)
49	205	u8	1	Signal Correlation Ratio
50	206	u8	1	Signal Correlation Interference
51	207	u32	4	reserved

Table 37: Track packet

17.9.5.1 Tracking Status

Bit	Description
0	Data Connection Active (Status, Velocity and Orientation Valid)
1	Depth correction applied
2-7	Reserved (set to zero)

Table 38: Tracking status