

RAPPORT DE STAGE

HUNTZINGER BRUNO (ROB 2026)

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

14 août 2026

TUTEUR : M. HUGUES HÉNOCCQ

ENST2



IP PARIS



**DIRECTION
GÉNÉRALE
DE L'ARMEMENT**

**Techniques
navales**

CONFIDENTIALITÉ : AUCUNE

Remerciements

Avant de poursuivre, je souhaiterais remercier mon tuteur de stage, M. Hugues Hénocq, pour m'avoir donné la possibilité de réaliser mon stage au sein du groupe EMSM de la DGA - Techniques Navales.

Je remercie également MM. Cédric Goëau, Alexis Lepot et Gauthier Derenty-Camenen, du groupe EMSM, pour leur disponibilité et leurs précieux conseils.

Je remercie enfin l'ensemble du personnel de DGA TN Brest pour leur excellent accueil.

Résumé

Le développement des mines électriques et le faible nombre de bases de mesure du champ électrique de la Direction Générale de l'Armement l'ont amené à lancer le projet DELFIN. Son objectif est de concevoir un système de mesure du champ électrique porté sur un robot sous-marin dans le but de fournir aux unités de la Marine Nationale un moyen embarqué d'évaluer leur signature électrique et leur vulnérabilité aux mines électriques.

Mots-clés : mesure de champ électrique, stabilisation d'offsets de mesures, discrétion électrique, calcul de problèmes directs, résolution de problèmes inverses

Abstract

The development of electric mines and the scarce number of electric field measurement bases of the Direction Générale de l'Armement conducted it to launch the DELFIN project. Its objective is to design a system able to measure the electric field and to integrate it on an underwater robotic platform. It aims at providing the vessels of the French Navy an onboard tool to evaluate their electric signature and their vulnerability to electrical mines.

Keywords : electric field measurement, measurement offsets stabilization, electrical discretion, direct problems computing, inverse problems solving

Table des matières

Résumé	2
Abstract	2
Introduction	5
Glossaire	6
I Présentation de l'institution et du sujet de stage	7
I.1 La Direction Générale de l'Armement (DGA)	7
I.2 La DGA - Techniques Navales (DGA TN)	8
I.3 Présentation du contexte dans lequel s'inscrit de stage	8
I.4 Présentation de la mission et des objectifs du stage	10
II Présentation et audit des systèmes existants	12
II.1 Présentation et audit de la chaîne de positionnement	12
II.2 Présentation et audit de la chaîne de mesures	15
II.3 Audit des IHMs	17
III Nouvelle version du système	18
III.1 Amélioration de la chaîne de positionnement	19
III.2 Amélioration de la chaîne de mesures	22
III.3 Amélioration de l'Interface Homme-Machine LabVIEW et codage du problème inverse	29
IV Calcul du problème direct et résolution du problème inverse	35
IV.1 Calcul du problème direct	36
IV.2 Résolution du problème inverse	38
V Vérifications et validations expérimentales de la nouvelle version du système	41
Conclusion	48
Annexes	50
Annexe A : trames GNSS récupérées par le récepteur GNSS V200 d'Hemisphère	50
Annexe B : Architecture logicielle de la nouvelle version du système	52
Annexe C : Chaîne de positionnement en configuration totale	53
Annexe D : Diagramme de Gantt du projet de fin d'études	54

Annexe E : Calcul du problème direct pour une configuration à deux interfaces	55
Annexe F : Modélisation matricielle du problème inverse	58
Annexe G : Méthodes de résolution du problème inverse	59

Introduction

Les premières mines navales apparaissent au début du XIX^{ème} siècle. Il a fallu attendre encore près d'un siècle pour que ces dernières gagnent réellement en efficacité. Elles s'illustrent notamment au cours de la guerre russo-japonaise puis lors des deux guerres mondiales au cours desquelles elles sont massivement employées.

Les conflits d'aujourd'hui ont montré que, loin de se retrouver reléguées à un rôle de second plan, les mines navales, qu'elles soient à influence (acoustique, magnétique, etc...) ou à contact, conservent encore toute leur pertinence opérationnelle. Elles demeurent encore largement employées dans le cadre du conflit ukrainien ou de l'affrontement irano-américain au Moyen-Orient, et ce, à la fois dans des buts de protection de zones littorales et d'interdiction de la navigation. Ceci étant, la sécurité de la navigation sur différentes mer du globe se révèle précaire et perpétuellement contestée.

C'est pour parer à l'utilisation et à la modernisation de ces engins que la Direction Générale de l'Armement lance le projet DELFIN en 2021. Son objectif est le suivant : face à l'apparition de mines multi-influences capables de détecter la signature électrique des navires et d'exploser en conséquence, il s'agit d'apporter à la Marine Nationale un moyen embarqué pour réaliser un contrôle de la signature électrique de ses navires afin qu'ils puissent évaluer leur vulnérabilité avant de s'engager dans une zone où de telles mines pourraient se trouver. Il est également important de noter qu'un tel contrôle n'est actuellement possible que sur des polygones de mesures. Or ceux-ci ne sont présents qu'en France métropolitaine. Une solution embarquée permettant de déterminer la signature électrique du navire faciliterait grandement la réalisation de ces contrôles.

Ce rapport présente la poursuite de ce projet lors de mon stage réalisé à la Direction Générale de l'Armement. Ma mission a consisté à améliorer et fiabiliser la solution existante, basée sur un robot sous-marin, ainsi qu'à implémenter les algorithmes permettant la détermination automatique des paramètres de la signature électrique des navires mesurés.

Glossaire

- DELFIN : Démonstrateur de mesures Électriques Léger au profit des Forces IN situ
- DGA : Direction Générale de l'Armement
- DGA TN : Direction Générale de l'Armement - Techniques Navales
- EMSM : Électro-Magnétisme Sous-Marin
- GNSS : Global Navigation Satellite System
- IHM : Interface Homme-Machine
- IP : Internet Protocol
- PA-NG : Porte-Avion de Nouvelle Génération
- PCCI : Protection Cathodique par Courant Imposé
- ROS2 : Robot Operating System 2
- ROV : Remotely Operated Vehicle
- RQt : ROS Qt
- RTK : Real Time Kinematic
- RVIZ2 : ROS2 Vizualiser
- SNLE-3G : Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engins de 3ème Génération
- SPS : Sample-Per-Second
- SVD : Singular Values Decomposition (Décomposition en Valeurs Singulières)
- TCP : Transmission Control Protocol (Protocole de Contrôle de Transmission)
- USBL : Ultra-Short BaseLine
- UTM 30N : Universal Transverse Mercator 30 Nord
- UUV : Unmanned Underwater Vehicle
- WGS 84 : World Geodesic System 1984

I Présentation de l'institution et du sujet de stage

I.1 La Direction Générale de l'Armement (DGA)

La Délégation Ministérielle pour l'Armement a été fondée en 1961 par le Général De Gaulle dans l'optique de doter la France d'une force de dissuasion nucléaire souveraine.

Renommée par décret Direction Générale de l'Armement en 1977, cette institution s'est peu à peu séparée de ses capacités de production industrielles et d'une grande partie de ses centres de recherche pour ne conserver que ses moyens d'essais. Le site officiel de l'institution [2] dresse la liste de ses cinq missions principales :

- fournir aux forces armées françaises les équipements nécessaires pour accomplir leur mission (tant au niveau de la conception de ces matériels que de leur maintien en conditions opérationnelles)
- veiller à la présence d'une base technologique et industrielle capable d'assurer le futur de la défense et de la souveraineté nationale
- soutenir les exportations de matériel militaire
- orienter la base industrielle de défense dans une logique de souveraineté
- maintenir la capacité de dissuasion nucléaire française et mettre en place de nouvelles capacités cyber



FIGURE 1 – Le canon de 155mm CAESAR



FIGURE 2 – L'avion de combat multirôle Rafale

La DGA a donc été à l'origine de la quasi-intégralité des programmes d'armement français depuis 1961. Nombre de matériels en étant sorti ont contribué à la renommée de l'industrie de défense française comme les sous-marins nucléaire lanceur d'engins de classe *Redoutable*, les canons CAESAR ou encore les avions multirôles Rafale, pour ne citer qu'eux.

Aujourd'hui, la DGA compte environ 10 000 employés répartis sur l'intégralité du territoire métropolitain. En moyenne, elle mène de front une centaine de projets dans le but de doter les armées françaises des équipements nécessaires à l'accomplissement de leur mission.

I.2 La DGA - Techniques Navales (DGA TN)

Le centre technique de la DGA dans lequel s'est déroulée mon stage est le centre Techniques Navales (DGA TN)[1]. Comme son nom l'indique, il est responsable des programmes s'inscrivant dans le domaine naval, que ce soit au niveau des systèmes de surface ou sous-marins .

Sa principale mission est de fournir à la Marine Nationale le matériel nécessaire à l'accomplissement de ses différentes missions en notifiant et spécifiant les programmes d'armement qui y ont trait. Il veille aussi à la maintenance et au maintien en conditions opérationnelles des différents moyens de la Marine Nationale.



FIGURE 3 – Vue d'artiste du PA-NG



FIGURE 4 – Vue d'artiste d'un SNLE-3G

Parmi les programmes actuellement en cours au sein de DGA TN, on peut citer le développement du porte-avion de nouvelle génération (PA-NG), ou celui des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins de troisième génération (SNLE-3G).

Le groupe de DGA TN au sein duquel j'ai mené mon stage est le groupe Électro-Magnétisme Sous-Marin (EMSM) faisant partie intégrante du département Plateformes Sous-Marins. Constitué d'experts en électro-magnétisme, il intervient dans l'élaboration des spécifications techniques ayant trait à ce domaine lors de la conception des différentes classes de navires de la Marine Nationale. Il conçoit également les modèles d'analyse des mesures électriques et magnétiques pour s'assurer de la conformité des bâtiments de la Marine Nationale avec les normes de protection en vigueur. Il mène régulièrement des coopérations internationales avec des partenaires au sein de l'OTAN et de l'Union Européenne, notamment.

I.3 Présentation du contexte dans lequel s'inscrit de stage

La partie immergée d'un navire est constituée de plusieurs éléments en différents matériaux : la coque en acier ferromagnétique, les propulseurs principaux et auxiliaires en bronze, aluminium ou cupro-aluminium. Plongée dans l'eau (douce ou salée), ils ont chacun un potentiel électrique différent. L'eau, agissant comme un électrolyte, permet la génération d'un champ électrique appelé signature électrique du

navire (voir figure 5). Certaines mines sont capables de détecter cette signature et menacent donc la survie des navires.

Il est également à noter la présence d'autres éléments modifiant artificiellement le potentiel au niveau de la coque, soit pour la protéger de la corrosion (anodes galvaniques en zinc (voir figure 6) ou encore la protection cathodique par courant imposé (PCCI)), soit pour réduire la signature électrique du navire.

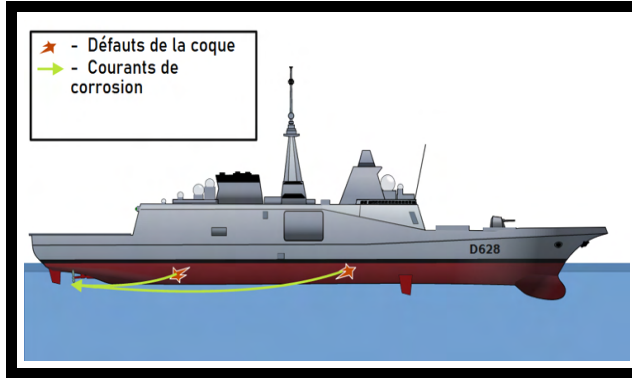


FIGURE 5 – Courants de corrosion en absence d'anodes sacrificielles

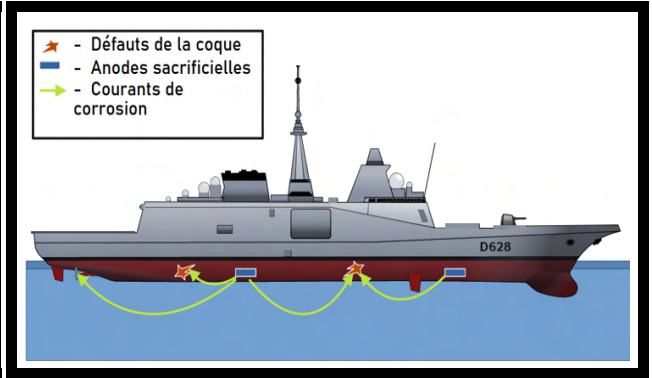


FIGURE 6 – Courants de corrosion en présence d'anodes sacrificielles

Lors de la création de modèles de la signature électrique de la partie partie immergée d'un navire, chaque élément de ce dernier responsable de la génération d'un champ électrique peut être modélisé par une ou plusieurs charges électriques.

Comme illustré par la figure ci-dessous, une charge électrique située au point C dans un milieu de conductivité électrique σ_0 limité par aucune interface et traversée par une intensité sortante I génère au point O un champ électrique $\vec{E}(O)$ tel que :

$$\vec{E}(O) = \frac{I}{4\pi\sigma_0||\vec{CO}||^2} * \vec{e}_r \quad (1)$$

où σ_0 est la conductivité électrique du milieu dans lequel se trouve la charge et $\vec{e}_r$ représente le vecteur unitaire dont la direction et le sens sont ceux de $\vec{CO}$ [6].

Cette formule nous permet donc de remarquer que le champ électrique généré par une charge dépend linéairement de son intensité sortante.

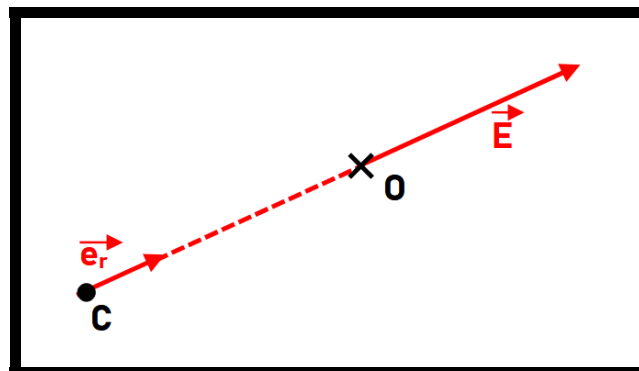


FIGURE 7 – Champ électrique généré par une source ponctuelle

Une manière assez simple de réaliser l'influence qu'ont les éléments de la partie immergée du navire de potentiels différents sur la coque du navire est de simuler cette signature dans un cas simple (nous reviendrons dans la suite du rapport sur la manière dont cette signature est simulée).

Considérons un navire propulsé par une hélice. Supposons que le navire possède un défaut de peinture à l'avant de sa partie immergée et que l'acier ferromagnétique soit donc en contact avec l'eau (voir schéma ci-dessous). On suppose également qu'entre ce défaut et l'hélice circule un courant d'intensité I du fait de la différence de potentiel entre ces deux éléments.

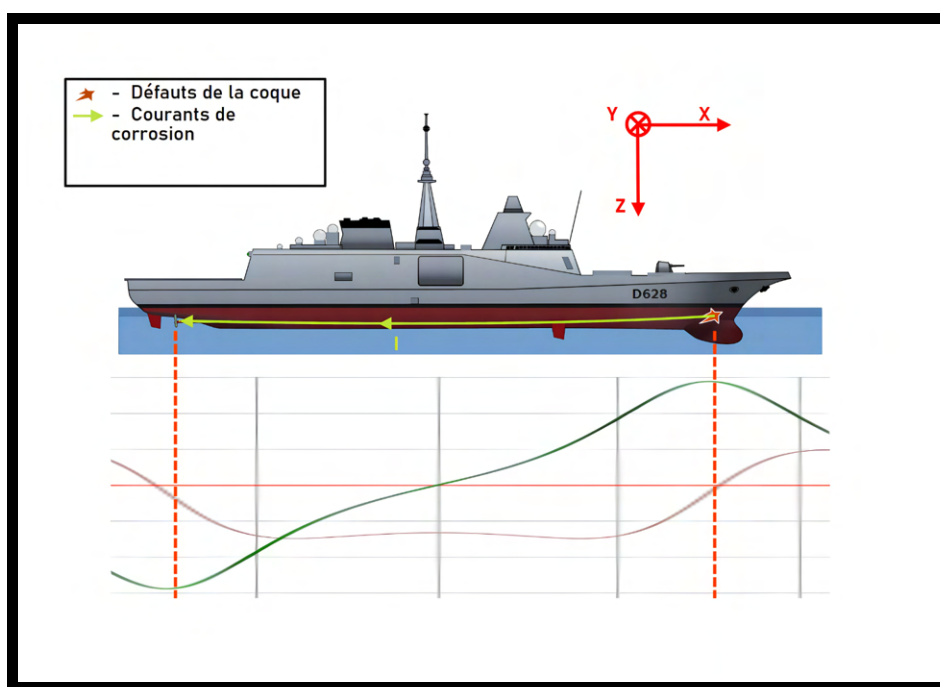


FIGURE 8 – Signature électrique du navire le long de l'axe longitudinal en fonction des éléments engendrant une différence de potentiel (en vert selon l'axe X, en rouge selon l'axe Y et en beige selon l'axe Z).

La figure 8 montre que les différentes parties immergées du navire dont le potentiel est différent ont une influence directe sur la signature électrique du navire. Plus on s'approche de ces dernières, plus la norme du champ électrique est importante.

En connaissant l'intensité sortante des charges de potentiel différent modélisant la partie immergée du navire et leur position, il est possible de déterminer le champ électrique en tout point de l'espace de mesure. L'obtention de ces intensités sortantes est donc nécessaire pour une reconstruction puis une étude de la signature électrique de tous les navires.

1.4 Présentation de la mission et des objectifs du stage

Le projet DELFIN (Démonstrateur de mesures Électriques Léger au profit des Forces IN situ) a été lancé par DGA TN en 2021. Son objectif : développer une preuve de

concept de la faisabilité d'une mesure de la signature électrique des navires à l'aide d'un robot sous-marin. Son aboutissement permettrait à des bâtiments de la Marine Nationale de disposer d'un système embarqué leur fournissant un audit de leur signature électrique afin qu'ils puissent évaluer leur vulnérabilité dans une zone où des mines ou d'autres moyens de mesures capables de la détecter pourraient être présentes.

Actuellement, pour réaliser la mesure du champ électrique sous-marin généré par ses navires et sous-marins, la Marine Nationale est obligée de les faire passer sur les bases de mesures installées sur les polygones de la DGA. Cependant, il n'existe que deux telles installations en France, l'une à Lanvéoc et la deuxième au large des côtes du Var. Ceci peut se révéler problématique pour les navires basés dans les Départements et les Territoires d'Outre-Mer qui doivent alors rentrer en Métropole pour d'effectuer le contrôle de leur signature électrique. Le projet DELFIN, loin de remplacer les bases de mesures de la DGA, pourrait entre autre servir à espacer les contrôles réalisés en Métropole et remplacer une partie d'entre eux par des contrôles moins poussés réalisés dans la zone d'opérations de ces navires.

Le cahier des charges initial du projet était le suivant [6] :

- fréquence d'acquisition des données : $1kHz$
- intervalle de mesures : $\pm 10mV/m$
- résolution : environ $100\mu V/m$ (la résolution a été revue à la hausse par rapport aux stages précédents pour lesquelles elle était de $1\mu V/m$)
- bruit en continu : inférieur à $3\mu V$
- bruit en fréquentiel : inférieur à $10nV/m/\sqrt{Hz}$
- précision du positionnement : inférieure à $50cm$
- précision de l'orientation : inférieure à 1°

Premièrement, il est à noter que l'aspect fréquentiel des mesures a été mis de côté pour mon stage. Nous n'avons donc pas traité les critères du cahier des charges y ayant trait.

Deuxièmement, ce cahier des charges a été défini à partir des performances obtenues lors des mesures effectuées par les capteurs présents sur les bases des polygones de mesures de la DGA. Comme il s'agit de la première fois que la DGA réalise l'emport d'un système de mesure du champ électrique sur une plateforme autonome robotisée, ce cahier des charges a été défini à titre de comparaison. L'un des objectifs du projet sera de comparer les performances obtenues par le système DELFIN vis-à-vis de celles des bases de mesures.

À ces exigences initiales venaient se rajouter celles relatives à la poursuite du développement des rendus du projet via l'exploitation des travaux réalisés par les stagiaires précédents, à savoir :

- une fiabilisation des mesures de champ électrique
- un contrôle de la validité des transformations (rotations et translations) entre les différents repères
- ajout des bras de levier permettant de projeter la mesure par rapport à un point précis du navire à mesurer
- intégration de la résolution du problème inverse (voir IV.2) en temps réel

- amélioration de l'interface homme-machine (IHM) et ajout des fonctionnalités suivantes à cette dernière : configuration des paramètres, affichage des résultats du problème inverse, etc...

Afin de clarifier quelque peu mon propos, quelques notions sont ci-dessous rappelées et explicitées dans le contexte de l'étude et de la modélisation des signatures électriques sous-marines de navires.

Tout d'abord, calculer un problème direct, consiste, à partir de la position et de l'intensité sortante des charges présentes dans le milieu où l'on effectue les mesures, à calculer le champ électrique généré par ces charges en différents points de l'espace de mesures.

Enfin, résoudre un problème inverse, consiste, à partir des mesures de champ électrique et de la position des charges présentes dans le milieu où l'on effectue les mesures, à déterminer l'intensité sortante de ces mêmes charges.

Avant de poursuivre, mentionnons simplement que trois axes de développement et d'amélioration du système DELFIN existant se dégagent des exigences mentionnées précédemment. Le premier porte sur l'amélioration et la validation de la chaîne de positionnement par une validation de la récupération des transformations entre les différents repères permettant de projeter les mesures du repère de mesure au repère du navire à mesurer. C'est dans ce repère que sont développés l'intégralité des modèles de signatures de navires conçus par le groupe EMSM. Le second porte sur une fiabilisation et une quantification des performances de la chaîne de mesure. Autrement dit, il s'agit d'améliorer la récupération de la mesure du champ électrique et de comparer sa précision à celle des bases de mesures. Enfin, le troisième axe porte sur l'implémentation de la résolution du problème inverse en temps réel : il s'agit de pouvoir étudier la signature du navire et de vérifier son adéquation avec la signature prévue par le modèle du navire. L'aspect temps réel est extrêmement important : il permet à l'utilisateur final de se rendre compte à tout moment d'une mission si la caractérisation de la signature réelle du navire se passe nominalement ou non.

Le travail réalisé durant ce stage se portera donc sur ces trois axes d'amélioration.

II Présentation et audit des systèmes existants

Le projet DELFIN est mené par DGA TN depuis 2021. Aussi, ne suis-je point le premier stagiaire à travailler dessus. Je me suis donc appuyé sur les travaux des stagiaires des années précédentes, travaux qu'il m'a tout d'abord fallu auditer.

II.1 Présentation et audit de la chaîne de positionnement

La chaîne de positionnement a pour but de déterminer la transformation (translation et rotation) du repère de mesures vers le repère du navire à mesurer. Cette

transformation permettra par la suite de projeter les mesures de champ électrique dans le repère du navire à mesurer puisque c'est dans ce repère que sont construits les modèles du champ électrique générés pour les bâtiments de la Marine Nationale.

Le robot utilisé pour effectuer les mesures est un BlueROV Heavy de Blue Robotics. Le positionnement de ce dernier s'appuie sur une localisation acoustique réalisée par des USBLs (Ultra-Short BaseLine) Subsonus d'Advanced Navigation. Les mesures du projet DELFIN peuvent s'effectuer selon deux configurations possibles.

Configuration "USBLs seuls"

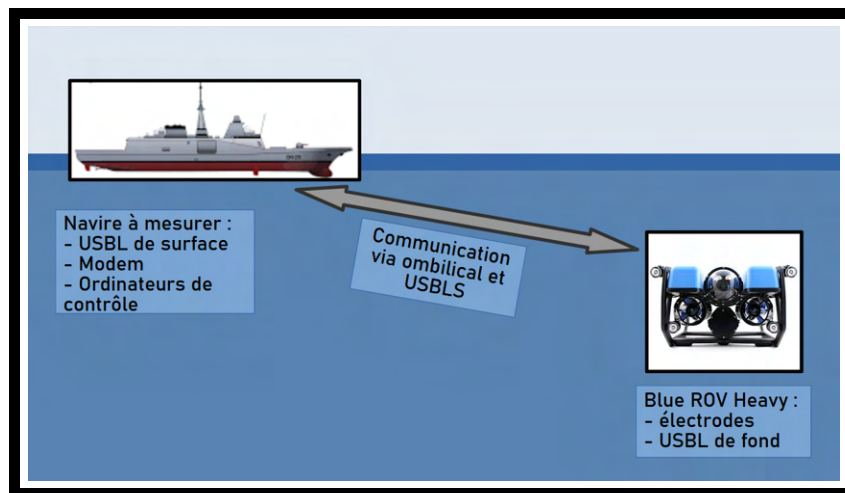


FIGURE 9 – Architecture du système - configuration USBLs seuls

Dans la première configuration, dite "USBLs seuls", l'un des USBL (dit "USBL de fond") est placé sur le ROV tandis que le deuxième (dit "USBL de surface") est placé sur le navire à mesurer (voir figure ci-dessus). Dans ce cadre, la seule transformation à déterminer est la transformation du repère de l'USBL de surface vers le repère de l'USBL de fond, la transformation entre le repère de l'USBL de fond et le repère de mesures étant connue, puisque les électrodes sont fixes par rapport à l'USBL de fond. Cette configuration n'a cependant que vocation intermédiaire, l'objectif étant de passer à la configuration totale une fois la chaîne de positionnement et de mesure certifiée dessus.

Configuration "totale"

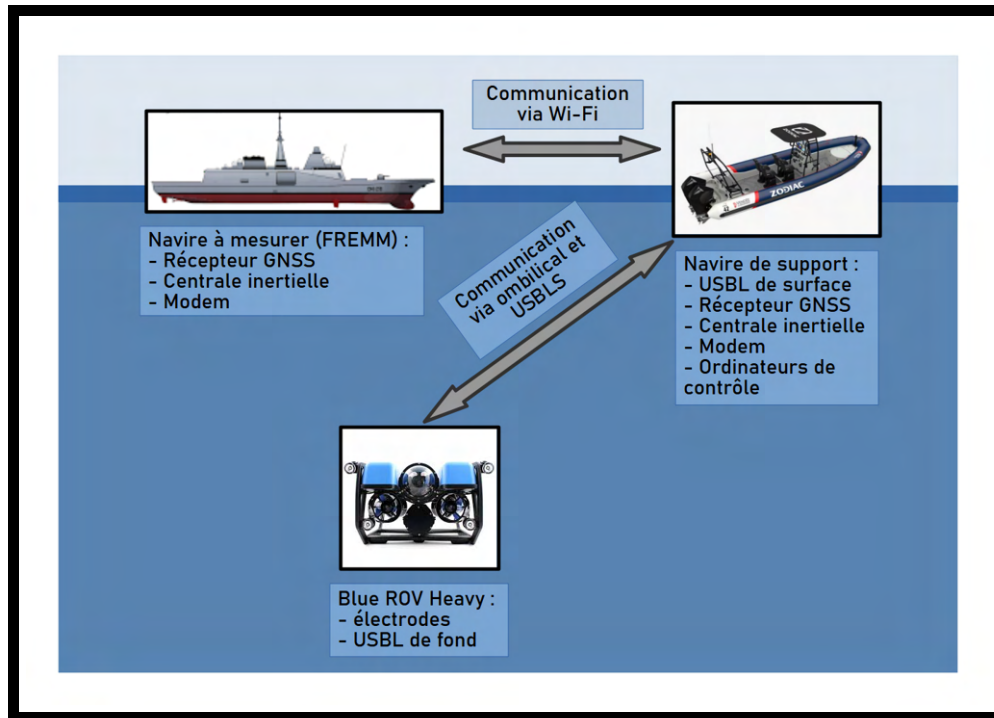


FIGURE 10 – Architecture du système - configuration totale

La deuxième configuration, dite "configuration totale" a été introduite pour se rapprocher du cas d'usage, à savoir d'une utilisation du projet DELFIN par des navires de la Marine Nationale pour déterminer leur vulnérabilité aux risques mines sur leur zone d'opération. Or, l'installation de l'USBL de surface sur ces navires demeure extrêmement compliquée à mettre en œuvre puisqu'elle nécessite l'installation de l'USBL sur une perche, puis de le descendre dans l'eau et de l'y maintenir sans qu'il bouge par rapport au navire à mesurer. Il a donc été décidé de placer l'USBL de surface sur une embarcation auxiliaire de type hors-bord. Pour projeter la mesure dans le repère du navire à mesurer, il faut donc récupérer deux transformations. La première, celle du repère du hors-bord au repère du ROV est de nouveau récupérée par les deux Subsonus [(voir figure ci-dessus)]. La deuxième transformation à récupérer est celle entre le navire à mesurer et le hors-bord. Sa partie translation est calculée par soustraction entre la position de l'embarcation de soutien et la position du navire à mesurer projetées dans le repère UTM 30N (Universal Transverse Mercator 30N) associée à l'ellipsoïde WGS 84[10]. Ce système UTM 30N est une projection plane de la surface et n'est donc valable que localement. Sa partie rotation, quant à elle est déterminée en faisant la combinaison entre la rotation permettant de passer du repère du navire à mesurer au repère NED (North East Down) local et de la rotation permettant de passer du repère NED local au repère du hors bord. Il est à noter que la nouvelle configuration, bien que plus pratique pour réaliser les mesures, rajoute également du bruit sur la position déterminée du fait de l'application d'une transformation supplémentaire.

Afin de récupérer les différentes positions et rotations, différents équipements ont été mis en place. Un récepteur GNSS Spatial Dual Antenna d'Advanced Navigation

couplée à une Interface and Logging Unit (d'Advanced Navigation également) ont donc été placés sur l'embarcation de soutien, tandis qu'une centrale inertielle Ekinox de SBG System, son boîtier, un récepteur GNSS V200 d'Hemisphere et une RaspberryPi 2 chargée de récupérer les corrections RTK ont été placées sur le navire à mesurer.

Enfin, la transmission des informations entre le Blue ROV et l'embarcation de soutien se fait via un ombilical tandis que celle entre le navire à mesurer et l'embarcation de soutien est réalisée par Wi-Fi.

Audit des deux configurations

Les essais de la configuration USBLs seuls au début du stage ont été concluants au niveau de la récupération de la translation du repère du navire à mesurer vers le repère du ROV. Cette dernière évoluait comme elle le devait sur l'IHM réalisée par l'un des stagiaires précédents. La variation de l'orientation de cette transformation, quant à elle, n'était pas surveillée. Après avoir modifié l'IHM pour qu'elle le devienne, cette dernière a rapidement montré qu'elle n'évoluait pas comme elle le devait.

Les tests de la transformation entre le repère du navire à mesurer et le repère de l'embarcation de soutien en configuration totale menés grâce au logiciel d'affichage des messages ROS2 RVIZ2, ne se sont eux aussi pas avérés concluants. L'orientation des deux récepteurs GNSS dans le repère NED local ne correspondait pas à celle qui était la leur dans la réalité et la translation entre les deux repères n'évoluait pas correctement.

Un travail de vérification des codes et des IHMs était donc nécessaire pour obtenir des transformations entre les différents repères correspondant à la réalité.

Enfin, le bras de levier permettant le passage du repère de l'USBL de surface (en configuration "USBLs seuls") ou du repère du récepteur GNSS du navire à mesurer (configuration "totale") à un point spécifique du navire à mesurer n'était pas implémenté.

II.2 Présentation et audit de la chaîne de mesures

Présentation de la chaîne de mesures

Sur le ROV étaient installées des électrodes fournies par l'entreprise MAPPEM Geophysics (voir figure ci-dessous), au nombre de six. Ces dernières étaient réparties par paires selon trois voies orthogonales comme le montre le schéma suivant : la première placée dans le sens longitudinal (voie X), la seconde dans le sens transversal (voie Y) et la dernière dans le sens vertical (voie Z). Chaque électrode est espacée d'environ 30cm avec l'électrode qui lui est associée (voir figure ci-dessous).



FIGURE 11 – Électrodes de MAPPEM Geophysics installée sur le BlueROV



FIGURE 12 – Positionnement des électrodes sur le BlueROV

Une carte électronique (ADS 1263 ou MCC 128 selon la configuration) vient récupérer la différence de potentiel entre les deux électrodes de la même voie. La carte électronique fournit cette différence de potentiel à la RaspberryPi 2 installée sur le Blue ROV qui la publie sur un topic ROS2. Cette différence de potentiel est ensuite lue par un interfaceur qui va la republier de manière à ce qu'elle soit lisible par les différentes IHMs.

Le champ électrique selon chacune des voies est retrouvé au niveau des IHMs en appliquant à la différence de potentiel correspondante la formule ci-dessous :

$$E_i = \frac{U_i}{d_i} \quad (2)$$

où E_i est le champ électrique sur la voie i , U_i est la différence de potentiel sur la voie i , d_i , la distance effective, c'est à dire la distance inter-électrodes corrigée par calibration sur la voie i .

Le schéma suivant donne un aperçu de l'agencement des différents éléments au sein de la chaîne de mesures :

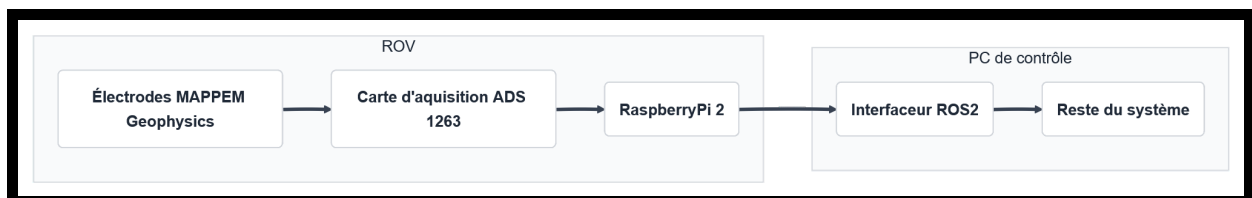


FIGURE 13 – Architecture de la chaîne de mesures. Données transmises : différences de potentiel sur les trois voies.

Audit de la chaîne de mesure

Des mesures de champ électrique ont été menées en bassin au début du stage afin de vérifier la stabilité de ces dernières. Elles ont tout de suite permis de repérer un problème qui avait déjà été constaté par les stagiaires des années précédentes. Aux bornes de chaque paire d'électrodes, la tension n'est pas nulle lorsque le champ électrique est nul dans le milieu dans lequel elle sont plongées. Cette différence de potentielle résiduelle est appelée "offset de mesure" et est soustraite des mesures après sa détermination. Toutefois, lorsque la profondeur du ROV évoluait, et ce, sans qu'aucun champ électrique ne fût présent dans le bassin, l'offset aux bornes des électrodes ne demeurait pas constant mais variait de l'ordre de la dizaine de millivolts, comme le montre l'affichage des mesures sur la voie X présenté ci-dessous.

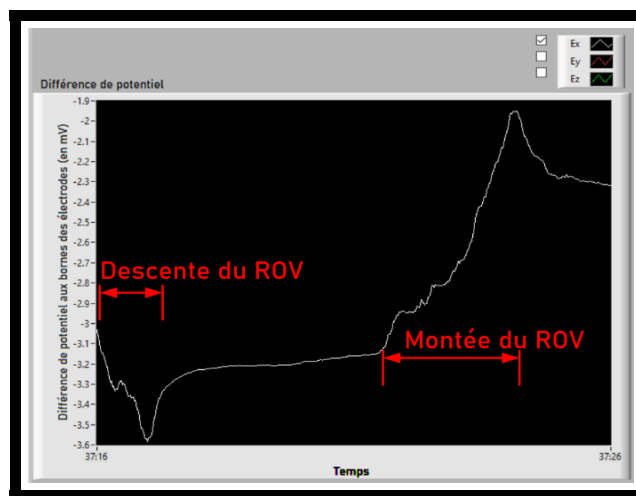


FIGURE 14 – Variations de l'offset suite aux variations de la profondeur du ROV

En réutilisant l'équation (2), on en déduit le champ électrique qu'une telle valeur de différence de potentiel représente. Pour 10 mV de champ électrique et une distance inter-électrodes de 30 cm , cela représente un champ électrique de 33 mV/m environ, ce qui est en aucun cas acceptable pour la résolution de 100 $\mu V/m$ demandée par le cahier des charges.

Ensuite, un autre facteur limitant la précision de la mesure était le fait que le milieu du segment formé par les électrodes de la voie Z n'était pas coïncidant avec celui des voies X et Y, ce qui impliquait que la mesure effectuée sur la voie Z n'était pas réalisée au même point que celles effectuées sur les voies X et Y. Or ceci n'était pas pris en compte dans les codes de traitement des mesures, ce qui aurait pu empêcher les algorithmes permettant de résoudre le problème inverse en retrouvant l'intensité sortante des charges de converger vers des valeurs cohérentes.

II.3 Audit des IHMs

Les stagiaires des années précédentes avaient développé plusieurs interfaces homme-machine (IHM). La plus avancée possédait les fonctionnalités suivantes :

- un affichage du positionnement du ROV en 2D par rapport au référentiel de l'USBL de surface en configuration "USBLs seuls" et au référentiel du récepteur GNSS V200 du navire à mesurer en configuration "totale".
- un affichage du champ électrique sur les trois voies, avec la possibilité de sélectionner les voies affichées.
- des boutons permettant de régler l'offset de champ électrique entre les électrodes d'une même voie.
- un lancement a posteriori du logiciel CoRonS développé par le CNRS pour réaliser le problème inverse sur les mesures.
- un enregistrement des données dans un format permettant leur exploitation par le logiciel CoRonS.

Cette IHM possédait plusieurs limitations. Tout d'abord, l'affichage du positionnement du ROV se faisait par rapport au référentiel de l'USBL de surface en configuration "USBLs seuls" et au référentiel du récepteur GNSS V200 du navire à mesurer en configuration "totale". Toutefois, l'exigence d'introduction des bras de levier permettant de projeter la mesure par rapport à un point quelconque du navire à mesurer demandait un affichage des mesures par rapport à ce point, et non par rapport aux origines des référentiels mentionnés précédemment.

Ensuite, le réglage de l'offset demandait un copié-collé des valeurs déterminées une fois ce dernier terminé. Automatiser totalement ce processus permettrait de simplifier l'utilisation de cette fonctionnalité par l'utilisateur.

Troisièmement, la résolution du problème inverse n'est pas réalisée en temps réel, mais par le logiciel CoRonS, et ce, après avoir arrêté l'IHM. Cette façon de faire présente deux limitations. Premièrement, CoRonS est un logiciel qui demande un certain nombre de dépendances logicielles pour fonctionner et deuxièmement, devoir attendre que l'IHM s'arrête pour effectuer un problème inverse ne permet pas de vérifier que les données mesurées permettent une bonne convergence de la résolution de ce dernier. L'une des exigences demandées a donc été le recodage des algorithmes de résolution du problème inverse en se passant de CoRonS, tout en permettant une résolution en temps réel.

Enfin, l'affichage de paramètres numériques comme la position du ROV où son orientation n'était pas disponible, ce qui ne permettait pas une vérification rapide du bon fonctionnement de la chaîne de mesures.

III Nouvelle version du système

Après avoir constaté les différents problèmes présents dans la version du projet DELFIN réalisée par les stagiaires des années précédentes, l'un des objectifs principaux du stage a été de les corriger afin d'obtenir une chaîne de mesures et de positionnement robuste et fiable. Un deuxième axe d'amélioration a été la conception d'une IHM intégrant de nouvelles fonctionnalités, comme la délégation de la réalisation en direct de la résolution du problème inverse ou du calcul du champ électrique

théorique aux nœuds ROS2 appropriés. Le schéma de l'architecture logicielle de la nouvelle version du système est présent en annexe de ce rapport page 52.

III.1 Amélioration de la chaîne de positionnement

Amélioration de la récupération de la transformation du navire à mesurer à l'embarcation de soutien en configuration totale

L'une des premières choses sur lesquelles il a me fallu se pencher a été l'amélioration de la chaîne de mesures et en particulier, la récupération de la transformation du repère du navire à mesurer au repère de l'embarcation de soutien en configuration totale (un schéma explicatif est disponible en annexe page 53).

Tout d'abord il a fallu diagnostiquer la raison pour laquelle le boîtier SBG de la centrale Ekinox n'arrivait pas à récupérer la position du récepteur GNSS Hemisphere V200 qui lui était connecté. Il s'est avéré que l'Hemisphere V200 avait tendance à réinitialiser automatiquement sa configuration. Ce faisant, il n'envoyait plus au boîtier les trames GNSS lui permettant de déterminer la position du navire à mesurer dans le repère géographique. Il a donc fallu retrouver les trames GNSS pertinentes à transmettre au boîtier de l'Ekinox, ainsi que leur fréquence de transmission.

Au final, ce sont les trames GGA, GLL, RMC, HDT, ZDT et GPGST qui ont été retenues pour être transmises à une fréquence de 1Hz, permettant ainsi au boîtier de la centrale inertielle de déduire la position du navire à mesurer dans le repère géographique (plus d'informations sur la structure des différentes trames sont données page 50).

Une fois les différents éléments de cette partie de la chaîne de positionnement communiquant correctement, un outil de visualisation des différentes transformations utilisant ROS2 et RVIZ2 a été implémenté, l'objectif étant de faciliter le débogage des différents codes dans lequel intervenaient des transformations entre deux repères. Cet outil est basé sur un nœud ROS2 qui récupère les messages ROS2 contenant les transformations entre les différents repères avant de déterminer la position et l'orientation de chaque repère par rapport au repère du navire à mesurer. Le nœud republie ensuite, pour chaque repère, un objet Marker ROS2 dessinant les flèches de ses trois axes à sa position par rapport au repère du navire à mesurer. Enfin, on affiche les Markers à l'aide de RVIZ2, le logiciel de visualisation associé à ROS2.

L'image suivante montre un exemple de visualisation des transformations entre trois repères différents : le repère de mesures ("elec", associé aux électrodes de mesures), le repère de l'USBL de surface ("ROV") et le repère de l'embarcation de soutien ("surface"). Grâce à cet algorithme, la visualisation des transformations entre les différents repères est donc réalisée en temps réel, et ce, d'une manière qui rend extrêmement facile la vérification de leur comportement.

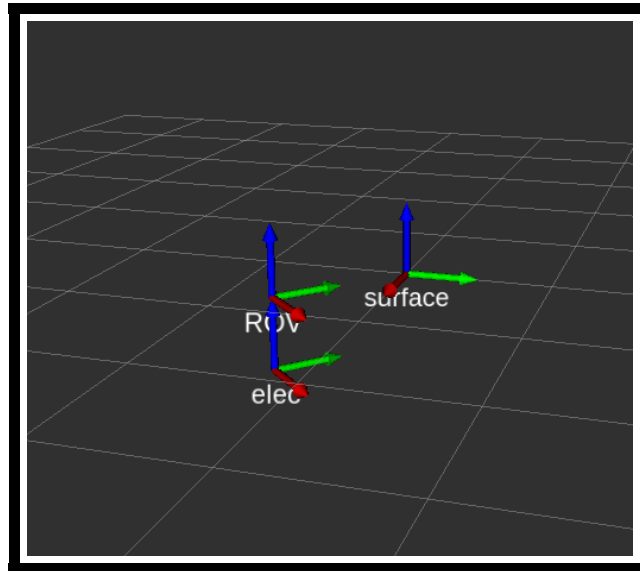


FIGURE 15 – Visualisation des transformations entre les différents repères via ROS2 et RVIZ2

Une fois la visualisation mise en place, j'ai enfin pu tester les codes proprement dit. Pour ce faire, les deux récepteurs étaient déplacés selon des directions spécifiques. Le résultat de ces déplacements était ensuite analysé à l'aide de RVIZ2 et de l'outil de visualisation développé. Pour ce qui est de la partie translation de la transformation du repère du navire à mesurer au repère de l'embarcation de soutien, le résultat s'est révélé mitigé. Les deux repères bougeaient bien l'un par rapport à l'autre quand l'un ou l'autre des récepteurs GNSS se déplaçait mais, au niveau de la visualisation, leur déplacement se faisait dans une direction perpendiculaire à celle le long de laquelle ils se déplaçaient dans la réalité. La cause de cette erreur résidait dans le fait que la librairie Boost utilisée pour projeter les positions de deux récepteurs GNSS du repère géographique au repère UTM projetait suivant la convention ENU (East-North-Up) et non selon la convention NED (North-East-Down) comme le demandent les standards de la robotique sous-marine. Une fois la projection remise dans le repère NED, la composante de translation de la transformation s'est comportée comme prévu.

Au niveau des orientations, les premiers résultats n'ont pas été satisfaisants. Les variations d'orientation entre le repère du navire à mesurer et le repère NED local et entre le repère de l'embarcation de surface et le repère NED local se comportaient comme elles le devaient mais les valeurs initiales des orientations étaient incohérentes. Il s'est avéré, pour les deux récepteurs GNSS, que la centrale inertielle qui leur était associée (dans le cas du récepteur Spatial Dual présent sur l'embarcation de soutien, cette centrale inertielle est intégrée à l'USBL de surface) initialisaient leur cap à 0° , quelle que soit l'orientation de leur récepteur GNSS associé. Après avoir fait en sorte que les axes des repères de chaque couple récepteur/centrale inertielle soient alignés, l'orientation s'est initialisée correctement, permettant ainsi de valider la récupération de la transformation entre le navire à mesurer et l'embarcation de soutien en configuration totale.

Ajout du bras de levier permettant de passer du repère du navire à mesurer au repère des différents capteurs de position

Ensuite, pour répondre à l'exigence d'ajout d'un bras de levier permettant de projeter la mesure par rapport à un point précis du navire à mesurer dans la configuration, il a fallu rajouter un nouveau repère pour chaque configuration, appelé "repère du navire". Pour la configuration "USBL seuls", le point retenu a été l'intersection entre la verticale de l'USBL de surface et le plan de la surface de la mer (point O sur le schéma 16). Ce choix repose sur une hypothèse : le navire à mesurer est parfaitement horizontal. On fait en sorte de toujours vérifier cette hypothèse lors des essais menés le bassin du centre en maintenant fixe l'USBL de surface. L'orientation du repère du navire cible et celle du repère de l'USBL de surface sont les mêmes.

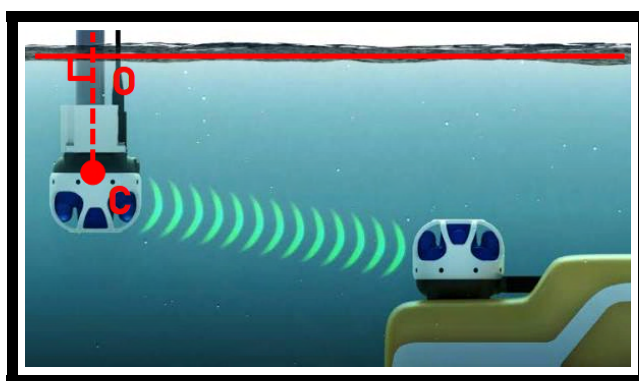


FIGURE 16 – Bras de levier - configuration USBL

Source : Advanced Navigation

Pour la configuration totale, le repère choisi pour le navire cible a pour origine un point choisi par l'opérateur du système. Le bras de levier entre ce dernier et la position du récepteur GNSS V200 présent sur le navire cible est transmise au nœud ROS2 chargé de réaliser l'ensemble des transformations.

Ensuite, côté pratique, l'automatisation de la récupération des corrections RTK et de leur transmission au récepteur GNSS V200 a été réalisée pour plus de commodité dans l'usage du système DELFIN. La solution mise en place pour automatiser le lancement des corrections RTK au lancement de la RaspberryPi est basée sur un service Linux autrement dit, un fichier d'extension *.service* (*centiped-rtk.service*). Le service s'exécute automatiquement au démarrage de la RaspberryPi. L'exécution du service va appeler l'exécution du fichier *start_centipede_rtk.sh* qui va détecter sur quel port est branché le récepteur des corrections RTK de l'Hemisphere, attendre que la Raspberry Pi soit connectée à Internet avant de se connecter au réseau Centipede RTK et de transmettre les corrections récupérées sur le port détecté. En cas d'erreur à un quelconque moment de l'exécution du fichier *start_centipede_rtk.sh*, l'instruction *Restart=always* présente dans le fichier *centiped-rtk.service* va demander à Linux de le réexécuter, et ce autant de fois qu'il faut pour qu'une connexion stable soit établie entre le réseau Centipede et le récepteur des corrections RTK de l'Hemisphere V200.

Pour résumer le travail mené sur la chaîne de positionnement, la récupération des transformations entre les différents repères a été corrigée et améliorée, notamment avec l'ajout du référentiel du navire à mesurer dans lequel on viendra projeter les mesures. Il reste néanmoins à mener une étude de la précision du positionnement.

III.2 Amélioration de la chaîne de mesures

Choix de la carte électronique et de sa configuration

Le problème d'instabilité de l'offset constaté en début de stage lorsque la profondeur du ROV variait était rédhibitoire pour atteindre la précision souhaitée sur les mesures réalisées, à savoir $100\mu V/m$. Cette variation d'offset entre les électrodes étant de l'ordre du millivolt, soit environ cent fois supérieure à la précision désirée. Alors qu'un offset constant peut être facilement soustrait des mesures réalisées, ce n'est pas le cas d'un offset qui varie en fonction de la profondeur. Un travail sur la réduction de la variation de cet offset s'est donc révélé nécessaire pour se rapprocher de l'objectif souhaité par le cahier des charges.

L'instabilité constatée au niveau de l'offset pouvait être due à plusieurs raisons, en particulier l'adéquation des électrodes et des cartes d'acquisition à la réalisation de mesures de champ électrique avec la précision demandée par le cahier des charges.

Lorsque j'ai repris le projet DELFIN, ce dernier disposait de deux cartes d'acquisition : une carte MCC 128 de Measurement Computing et une carte Waveshare basée sur un convertisseur analogique-numérique ADS 1263 de Texas Instruments. J'ai tout d'abord calculé la résolution de chacune afin de m'assurer qu'elle était supérieure à la valeur de tension U_{lim} permettant la résolution d'un champ électrique de $E_{lim} = 100\mu V/m$, soit, d'après l'équation [2] :

$$\begin{aligned} U_{lim} &= d_{inter-électrodes} \times E_{lim} \\ &= 0,30 \times 100 \times 10^{-6} \\ &= 30\mu V \end{aligned}$$

La documentation de la carte MCC 128 [3], dont le convertisseur analogique-numérique a une précision de 16 bits, indique qu'il s'agit d'une carte pouvant mesurer des différences de potentiel en mode différentiel ou en mode mesure par rapport à la masse, et ce, sur des plages ± 10 , 5 , 2 , ou $1V$. Dans notre cas, les tensions à mesurer sont de l'ordre du mV et ne dépassent pas les quelques centaines de mV . On peut donc choisir $\pm 1V$ comme plage de mesures, puisque cette dernière, étant la plus restreinte d'entre toutes, garantit une meilleure résolution que pour les autres. Nous effectuons également nos mesures en mode différentiel.

Accuracy

Analog input DC voltage measurement accuracy		
Range	At full scale (typ at 25 °C)	At full scale (maximum over temperature)
SE ±10 V	±6 mV	±34 mV
SE ±5 V	±3 mV	±17 mV
SE ±2 V	±1.2 mV	±7 mV
SE ±1 V	±600 µV	±3.4 mV
DIFF ±10 V	±14 mV	±42 mV
DIFF ±5 V	±6.5 mV	±21 mV
DIFF ±2 V	±2.1 mV	±8 mV
DIFF ±1 V	±900 µV	±3.7 mV

FIGURE 17 – Performances de la carte MCC 128 pour chacune de ses configurations

Source : Measurement Computing

La figure ci-dessus détaille les performances de la carte MCC 128 pour chacune de ses configurations. La configuration dans laquelle on se place (mesures différentielles sur une plage de $\pm 1V$) y est encadrée en rouge. Comme on peut l'y constater, la précision de mesure de la MCC 128 n'est que de $900\mu V$ à $25^\circ C$, une valeur bien supérieure aux $30\mu V$ découlant des demandes du cahier des charges. Cette carte n'est donc pas adaptée aux échelles de mesures auxquelles on souhaite travailler sans l'ajout d'un amplificateur de signal en entrée. On ne travaillera donc plus avec par la suite.

La documentation de la carte ADS 1263 [8] indique que la résolution de cette dernière est de 32 bits et que la plage de mesures du convertisseur analogique-numérique est de $\pm 5V$. Sa résolution maximale théorique est, R_{max} donc de :

$$\begin{aligned}
 R_{max} &= \frac{\text{Longueur de la plage de mesure}}{\text{Nombre de valeurs représentables}} \\
 &= \frac{2 \times 5}{2^{32} - 1} \\
 &= 2,32nV < 30\mu V
 \end{aligned}$$

La résolution de cette carte est donc théoriquement suffisante. La documentation indique également que selon la configuration choisie (gain, nombre de SPS, fréquence de transmission des données), le bruit de mesure crête-à-crête varie de $0,138\mu V$ à $759,91\mu V$, ce qui implique que toutes les configurations ne seront pas envisageables car le bruit de mesure associé maximal est trop important comparé à la résolution de $30\mu V$ souhaitée.

Le second critère concernant le choix de la configuration a été le nombre de SPS (sample per second), autrement dit, le nombre d'échantillons de différence de potentiel que la carte ADS 1263 peut envoyer par seconde. Le facteur contraignant ce choix s'est révélé être la période de l'horloge ("timer") ROS2 du nœud ROS2 tournant sur la RaspberryPi 2 embarquée et chargé de transmettre les données de la carte ADS 1263 au nœud interfaceur (voir figure 40). La fréquence de transmission maximale que parvenait à tenir le timer ROS2 étant de 20 Hz, les valeurs de SPS entre 100 et

38 400 n'étaient donc pas pertinentes pour l'ADS 1263, ce qui tombait parfaitement car ces dernières induisaient les bruits de mesures les plus importants. Les valeurs de SPS inférieures à 20 étaient également exclues puisque l'on souhaitait disposer du plus grand nombre de mesures possible. L'intégralité des configurations respectant ces critères ont un bruit de mesure crête-à-crête inférieur à $5\mu V < 30\mu V$ et valident donc l'exigence du cahier des charges.

L'aspect fréquentiel de la mesure des signatures électriques ayant été écarté du stage, j'ai donc choisi les paramètres permettant d'appliquer le filtrage passe-bas le plus fort aux différences de potentiel. Parmi les fréquences de transmission retenues, celle pour laquelle les filtres passe-bas sont les plus efficaces est 20 SPS. Cette valeur a donc été retenue.

La figure suivante montre que l'amplitude du bruit crête-à-crête est plus faible quand la valeur du gain est de 32. Cette valeur a donc également été retenue.

Table 1. ADC1 Noise in μV_{RMS} (μV_{PP}) at $T_A = 25^\circ C$, $V_{AVDD} = 5 V$, $V_{AVSS} = 0 V$, $V_{REF} = 2.5 V$ (continued)							
DATA RATE	FILTER MODE	GAIN					
		1	2	4	8	16	32
16.6 SPS	Sinc1	0.306 (1.708)	0.147 (0.810)	0.077 (0.436)	0.044 (0.250)	0.030 (0.176)	0.024 (0.138)
16.6 SPS	Sinc2	0.248 (1.401)	0.122 (0.729)	0.068 (0.403)	0.037 (0.213)	0.024 (0.136)	0.020 (0.111)
16.6 SPS	Sinc3	0.216 (1.221)	0.120 (0.667)	0.060 (0.332)	0.033 (0.197)	0.022 (0.130)	0.017 (0.095)
16.6 SPS	Sinc4	0.214 (1.169)	0.101 (0.544)	0.054 (0.302)	0.031 (0.175)	0.022 (0.129)	0.016 (0.092)
20 SPS	FIR	0.393 (2.467)	0.191 (1.102)	0.104 (0.603)	0.057 (0.353)	0.039 (0.222)	0.030 (0.167)
20 SPS	Sinc1	0.336 (1.861)	0.167 (0.964)	0.085 (0.486)	0.049 (0.266)	0.033 (0.191)	0.026 (0.138)
20 SPS	Sinc2	0.270 (1.560)	0.136 (0.745)	0.070 (0.376)	0.039 (0.231)	0.028 (0.149)	0.021 (0.111)
20 SPS	Sinc3	0.237 (1.415)	0.124 (0.701)	0.067 (0.399)	0.035 (0.192)	0.024 (0.130)	0.020 (0.109)
20 SPS	Sinc4	0.229 (1.285)	0.113 (0.612)	0.060 (0.325)	0.034 (0.193)	0.022 (0.123)	0.017 (0.098)
50 SPS	Sinc1	0.514 (2.925)	0.255 (1.584)	0.140 (0.940)	0.077 (0.457)	0.051 (0.315)	0.042 (0.264)

FIGURE 18 – Performances de la carte ADS 1263 pour une fréquence de transmission de 20 SPS

Source : Texas Instrument

La configuration choisie pour la carte ADS a donc été un gain de 32 ainsi qu'une fréquence de transmission des données de 20 SPS. Le filtre utilisé par la carte, à savoir un filtre passe-bas sinus cardinal (voir section 9.3.10 de la documentation de la carte AD 1263 [8]) potentiellement associé à un filtre numérique passe-bas à réponse impulsionnelle finie, n'a pas été changé, ce qui implique que le bruit de mesures crête-à-crête de la carte est d'au maximum $0,167\mu V$, soit environ 15 fois inférieur à ce que demande le cahier des charges.

Des expériences menées avec un appareil de mesure à source modèle 2450 de Keithley en mode source autonome de tension constante ont permis de valider par la pratique la précision de la carte. Le Keithley 2450 injectait une différence de potentielle précise à la dizaine de nanovolts aux bornes de mesures de tension différentielle de la carte d'acquisition. Cette tension était ensuite relevée grâce à l'IHM. En pratique, ces expériences ont montré que l'erreur de mesure de la carte ADS 1263 reste systématiquement en dessous d' $1\mu V$, ce qui est 30 fois inférieur la valeur de $30\mu V$ demandée par le cahier des charges. Le bruit de mesures crête-à-crête, de son côté est de l'ordre de $10nV$, une valeur négligeable devant la précision de mesure souhaitée.

Choix des électrodes de mesures

Après avoir vérifié que la carte ADS 1263 convenait à nos besoins et optimisé sa configuration, l'étape suivante consistait à vérifier si les électrodes étaient suffisamment sensibles pour mesurer des champs électriques de l'ordre de la trentaine de microvolts. L'objectif était également de comprendre d'où venait la différence d'offset observé entre les électrodes d'une même voie alors que le Blue ROV changeait de profondeur sans qu'il y ait de charges présentes dans le bassin.

Nous avons à notre disposition différentes paires d'électrodes provenant d'entreprises différentes : MAPPEM, SAES, Polyamp et CloverTech.

Différentes mesures réalisées dans un bac rempli d'eau douce ont permis de constater qu'au bout d'une demi-journée de trempage des électrodes dans le liquide où elles devaient réaliser leur mesure (eau douce pour le bassin d'essais du centre), la variation de l'offset à leurs bornes diminuait.

Un test réalisé avec les électrodes de la marque SAES a montré que pour une même variation de profondeur de 2m, la variation d'offset aux bornes des électrodes était de $6,3mV$ lorsque l'on venait de les plonger et de $1,6mV$ après avoir passé une nuit à tremper dans le bassin d'essais.

Le tableau suivant récapitule les tests réalisés pour les électrodes des différentes entreprises. Ces dernières ont été plongées toute la nuit dans le bassin d'essais du centre. Puis, on a fait varier leur profondeur et relevé la tension à leur bornes à l'aide d'un multimètre.

Électrodes Profondeur	SAES	CloverTech	Polyamp	MAPPEM
0m	3,9mV	-19,3mV	-24,4mV	1,5mV
2m	4,5mV	-21,6mV	-24,2mV	1,5mV
0m	3,4mV	-19,1mV	-24,3mV	1,5mV
2m	3,9mV	-20,0mV	-24,2mV	1,5mV
0m	3,0mV		-24,3mV	1,5mV

TABLE 1 – Variation d'offset dues à une variation de profondeur - comparaison pour différentes paires d'électrodes

Les électrodes de MAPPEM Geophysics se distinguent parmi les autres puisque ce sont les seules dont la variation de la différence de potentiel à leur bornes s'est révélée être inférieure au dixième de millivolt lors des variations de profondeur qu'elles ont du subir. Ces électrodes ont donc été maintenues sur le Blue ROV et la question de leur remplacement s'est conclue par la négative.

Étude des variations de l'offset inter-électrodes aux bornes des électrodes de MAP-PEM Geophysics

Après avoir montré que les électrodes de MAPPEM étaient les moins sensibles aux effets des variations d'offsets dus à la profondeur, il a fallu les étudier plus en détail afin de déterminer à quel point ces dernières répondaient au cahier des charges.

Plusieurs expériences ont été réalisées dans le bassin d'essais du centre, sans qu'aucun courant ne circule dans le bassin. L'objectif de ces manipulations était d'étudier la dérive de l'offset de la tension mesurée aux bornes des électrodes.

Une première expérience a été réalisée afin de déterminer la dérive de l'offset des électrodes quand le ROV était immobile. Les électrodes ont été trempées dans l'eau pour des durées différentes. Le tableau suivant récapitule les résultats obtenus pour les paires d'électrodes des voies X et Y :

	Tension inter-électrodes voie X (à l'eau depuis 24h)	Tension inter-électrodes voie Y (à l'eau depuis 10min)
tension à $t = 0s$	$3\mu V$	$60\mu V$
tension à $t = 1min$	$-9\mu V$	$300\mu V$
Variation de tension	$12\mu V$	$240\mu V$

TABLE 2 – Dérive de la tension aux bornes des électrodes en une minute - ROV immobile

On constate que lorsque le robot reste immobile durant une minute, la dérive de la tension aux bornes des électrodes de la voie X qui ont été trempées depuis une journée est de $12\mu V < 30\mu V$. Au niveau de la voie Y, cette dérive est de $240\mu V > 30\mu V$. L'immersion des électrodes permet donc une réduction de la dérive des mesures statiques d'un facteur 10 environ. Toutefois, bien qu'elle diminue la dérive de la tension à leurs bornes, cette dernière reste quand même de $12\mu V$ en une minute. En trois minutes, on obtient potentiellement une variation d'offset de $36\mu V > 30\mu V$ si la dérive de l'offset suit la même tendance, ce qui devient supérieur à la valeur de résolution en tension souhaitée par le cahier des charges. Les électrodes de MAPPEM ne répondent donc pas aux exigences du cahier des charges. Cependant, comme il s'agit des meilleures électrodes à notre disposition, ces dernières ont quand même été conservées.

Quelques expériences ont ensuite été menées pour quantifier l'amélioration que représente le trempage des électrodes sur la stabilité des mesures de différence de potentiel à leurs bornes quand la profondeur du ROV varie. Le tableau suivant montre la tension inter-électrodes U sur les voies X, Y et Z en fonction de la profondeur :

Profondeur \ U (en mV)	Voie X	Voie Y	Voie Z
-3m	0,05	-1,09	0,58
0m	-0,14	-0,15	0,82
-3m	0,065	-1,33	0,32
0m	-0,13	-0,54	0,82
-3m	-0,01	-1,86	0,60
Variation maximale de l'offset	0,19	1,71	0,50

TABLE 3 – Variation de la tension aux bornes des électrodes en fonction de la profondeur. Les électrodes des voies Y et Z n'ont pas été trempées au préalable tandis que les électrodes de la voie X l'ont été durant 24h

On peut donc remarquer que les variations de l'offset de la tension inter-électrodes est deux à huit fois plus faible au niveau de la voie qui a été plongée dans l'eau une journée avant de mener l'expérience (voie X) qu'au niveau des voies plongées dans l'eau qu'au moment de l'expérience (voies Y et Z). Le trempage des électrodes permet donc de limiter la variation de l'offset inter-électrodes lors des variation de profondeur du robot.

Une dernière expérience sans qu'aucun courant ne circule dans le bassin a permis de montrer que la variation de l'offset au niveau de la tension inter-électrodes lorsque le robot se déplace dans le plan horizontal est du même ordre grandeur que la dérive de cette même grandeur lorsque le robot reste immobile.

Les électrodes retenues pour le robot ont donc été les électrodes de MAPPEM Geophysics. Bien que ces dernières ne répondent pas au cahier des charges, elles représentent le choix le plus pertinent quant à la stabilité de l'offset inter-électrodes lors des variations de la profondeur du ROV. Le maintien des électrodes dans l'eau ont permis de diminuer sensiblement la variation de ce même offset. Il faudra donc veiller à immerger les électrodes dans le milieu dans lequel elle vont réaliser leur mesures (eau douce ou salée) au moins une journée à l'avance.

Le fait de devoir immerger les électrodes de mesures a impliqué de revoir le câblage du BlueROV. Les électrodes ont donc été rendues démontables grâce à l'adjonction d'un connecteur à leur extrémité, afin de pouvoir les immerger dans l'eau entre les différentes missions du ROV.

De la mousse a également rajoutée à leurs extrémités. Bien que son impact semble positif, il reste néanmoins à confirmer et à quantifier (voir figure ci-dessous).

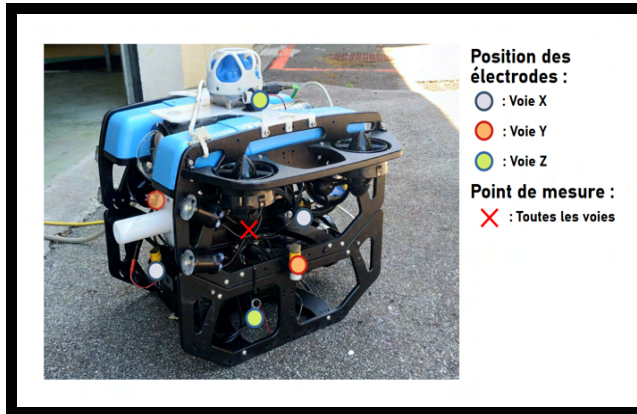


FIGURE 19 – Nouvelle disposition des électrodes sur le BlueROV

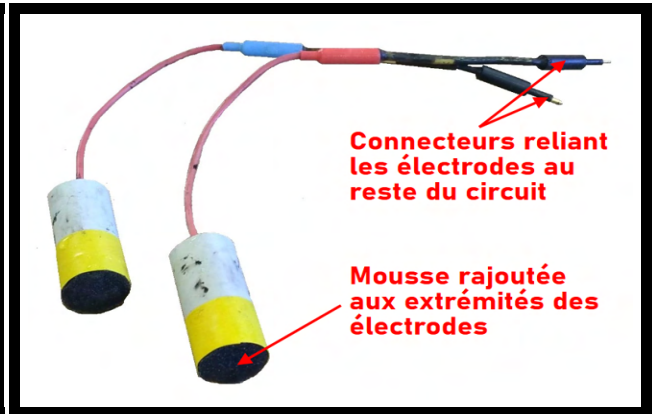


FIGURE 20 – Électrodes de MAPPEM Geophysics avec leur connecteurs

Voici le résumé du travail accompli au niveau de la chaîne de mesures vis-à-vis des attentes du cahier des charges :

- la fréquence d'acquisition des données est de $20Hz$. Cette fréquence est significativement faible par rapport aux $1kHz$ demandé par le cahier des charges. Cependant, j'ai déterminé expérimentalement qu'il s'agit de la fréquence maximale supportée par ROS2 pour effectuer les transmissions sur les ordinateurs utilisés (pour ce faire, j'ai demandé au timer ROS2 publiant les mesures d'adopter successivement plusieurs fréquences de publication et j'ai vérifié à l'aide du logiciel RQt les fréquences effectives des publications). Les membres du groupe EMSM ayant demandé de conserver l'architecture ROS2, ainsi que d'oublier l'aspect analyse fréquentiel pour lequel ce critère avait été adapté, cette fréquence d'acquisition va par la suite être considérée comme satisfaisante. L'une des solutions permettant d'augmenter considérablement le débit des données serait de les transmettre via une liaison TCP, avec les avantages et les inconvénients de ce genre de liaison par rapport à une liaison publishers-subscribers ROS2.
- le gain de 32 donne une plage de mesures de $\pm 78mV$, soit environ seize fois plus élevée que les $\pm 10mV$ demandés par le cahier des charges.
- lorsque le robot change de profondeur la variation d'offset indépendante de la mesure est de $0, 20/0, 30mV$ environ lorsque les électrodes sont trempées. En reprenant l'équation (2), cela donne une variation d'offset de l'ordre du mV/m pour une distance inter-électrodes d'environ 30 à 40cm, ce qui est dix fois supérieur à ce qui est demandé dans le cahier des charges. Il reste donc encore du travail sur le sujet de la stabilisation des mesures, même si une amélioration conséquente de cette dernière a déjà été apportée. En cas d'impossibilité d'aller plus loin sur ce point avec les électrodes de MAPPEM Geophysics, il peut être envisagé de les changer pour un modèle plus stable.
- le bruit en continu mesuré est de l'ordre de $50\mu V$. Cette valeur est environ vingt fois supérieure au bruit de $3\mu V$ affectant les bases de mesures. La même conclusion que précédemment s'applique : il reste encore du travail sur ce critère et la possibilité de changer d'électrodes n'est pas écartée. Il est éga-

lement à noter que cette valeur a été mesurée à un instant précis et ne prend pas en compte une potentielle dérive de l'offset aux bornes des électrodes. Une quantification de l'influence de cette dérive serait à mener.

- le critère de bruit en fréquentiel, quant à lui, n'avait plus lieu d'être, puisque mon tuteur de stage a décidé de laisser de côté l'aspect fréquentiel de la mesure pour le moment.

III.3 Amélioration de l'Interface Homme-Machine LabVIEW et codage du problème inverse

À l'issue de l'audit des deux IHM développées par les stagiaires précédents, plusieurs points d'amélioration ont été relevés ou requis par mes encadrants. Ainsi la nouvelle IHM doit :

- conserver les acquis des versions précédentes (affichage du champ électrique sur les trois voies, position du robot affichées en 2D, etc...)
- être rendue plus aisée et confortable d'utilisation
- être capable, à partir d'une configuration de charges entrée par un utilisateur ou lue à partir d'un fichier, de piloter le calcul d'un problème direct en un point ou sur un plan défini par l'utilisateur.
- être capable de piloter la résolution d'un problème inverse à partir d'une configuration de charges entrée par un utilisateur ou lue à partir d'un fichier

Le premier point, concernant la conservation des fonctionnalités opérationnelles des IHM précédentes a été très facilement satisfait puisque l'IHM la plus avancée a servi de base à la nouvelle IHM. L'affichage de la position du ROV en 2D, réalisé à partir des positions lues par LabVIEW sur le topic correspondant a donc été conservé. Seuls les différents noeuds ROS2 intervenant dans l'élaboration de ces messages ont dû être modifiés pour que la position du ROV soit exprimée dans le repère du navire à mesurer et non par rapport au repère de l'USBL de surface ou à celui du récepteur GNSS du navire à mesurer, ainsi que détaillé dans la sous-section précédente (III.1).

L'affichage du champ électrique selon les trois voies a également été conservé, ainsi que la possibilité de lui appliquer ou non la rotation projetant la mesure dans le repère du navire à mesurer.

Amélioration de l'aisance et du confort d'utilisation de l'IHM

L'aisance et le confort d'utilisation d'une IHM sont cruciaux car ils conditionnent directement l'efficacité de l'utilisateur aux commandes de l'ensemble du système qu'elle pilote. Plus cette dernière est intuitive et moins elle demande de réglages et de réflexion de la part de l'utilisateur pour fonctionner correctement, plus la charge mentale de ce dernier sera réduite.

La première chose améliorée dans ce but a été le réglage des offsets présents sur les trois voies du système lorsqu'il n'y a pas de champ électrique dans l'eau.

La présence de ces offsets est normale (leur variation l'est un peu moins, comme évoqué précédemment III.2) et il faut donc les retrancher de chacune de mesures réalisées. Sur l'ancienne IHM, le réglage marchait ainsi : tout d'abord on cliquait sur le bouton commandant le réglage des offsets, puis on attendait quelques secondes que LabVIEW effectue une moyenne du champ électrique sur chaque voie avant de copier-coller les valeurs obtenues dans une zone de saisies de nombres afin que l'interface les prenne en compte et les applique aux futures mesures. Le temps d'attente de stabilisation de la moyenne ainsi que le fait d'avoir à copier-coller les offsets déterminés était peu pratique.

La solution intégrée à la nouvelle IHM est venue corriger ces deux inconvénients. La moyenne des mesures est réalisée en continu ce qui évite d'attendre quelques secondes avant que la moyenne se stabilise. Ensuite, plus besoin de copier-coller, l'architecture de l'IHM a été modifiée pour que le nouvel offset s'applique directement aux mesures. Un garde-fou a également été installé pour couper l'enregistrement des données à chaque changement d'offset avant de proposer à l'utilisateur de lancer un nouvel enregistrement des données afin de garantir leur cohérence.

L'image ci-dessous montre à quoi ressemble désormais le panneau de réglage des offsets. Ceux-ci sont réglables voie par voie ou toutes voies ensemble et applicables ou non sur chaque voie, permettant ainsi à l'utilisateur de garder le contrôle sur l'application des offsets. Ils sont également affichés à titre d'information.

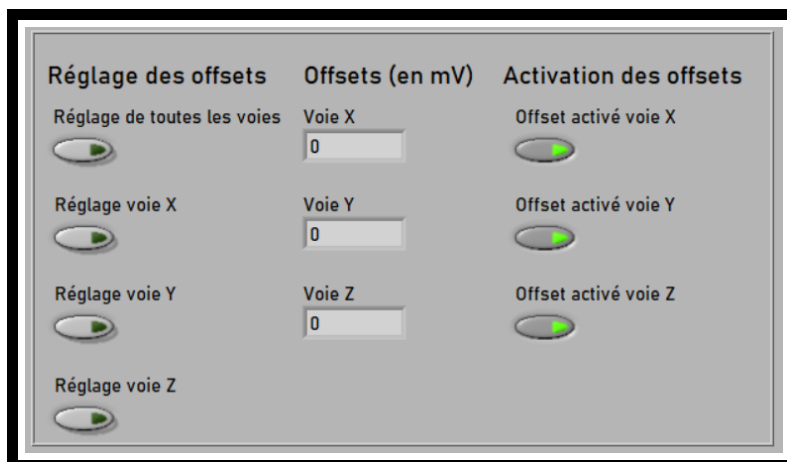


FIGURE 21 – Panneau de contrôle du réglage des offsets sur la nouvelle IHM

Un bouton de réglage de l'intégralité des offsets a également été placé à côté des graphes affichant le champ électrique et la différence de potentiel pour que l'utilisateur puisse le faire en gardant un œil sur les graphes.

Afin de permettre une meilleure représentation de la situation, la deuxième fonctionnalité ajoutée a été la représentation en 3D de la carte de champ électrique dans le repère du navire à mesurer. La figure ci-dessous donne un exemple de ce à quoi peut ressembler l'affichage des mesures de champ électrique (ici sa norme) en trois dimensions :



FIGURE 22 – Affichage de la norme du champ électrique mesuré au cours d'un passage sous un dipôle (deux sources de courant)

En plus de la norme du champ électrique, ce dernier peut aussi être affiché selon l'axe des abscisses, des ordonnées ou des côtes. Une barre de couleur présente à gauche du graphique affiche la valeur de la composante du champ affichée. Il est possible de régler ses extremums ou bien de la laisser en mode automatique, auquel cas, les extremums sont déterminés en fonction des extremums des mesures réalisés ainsi que des extremums du champ électrique théorique déterminé par le calcul du problème direct ou par la résolution du problème inverse sur un maillage ainsi qu'expliqué dans les deux sous-sections suivantes. Pour améliorer l'interprétation des données, un affichage des axes du repère (dont la longueur mesure un mètre) est proposé et permet de se représenter l'échelle du graphique. Un bouton permettant la mise au point automatique de la caméra est également disponible et donne la possibilité à l'utilisateur de retrouver instantanément une vue centrée sur l'ensemble des mesures s'il venait à ne plus se retrouver dans l'image.

Calcul du champ électrique théorique

L'une des tâches demandées à la nouvelle IHM était de pouvoir déterminer le champ électrique théorique à partir d'une configuration entrée par un utilisateur ou bien lue dans un fichier ".txt".

Un premier panneau a été développé afin de permettre à l'utilisateur d'ajouter manuellement les charges présentes dans son problème (voir figure ci-dessous). Il lui faut seulement entrer les composantes de la position dans le repère du navire à mesurer ainsi que l'intensité sortante de la charge.

FIGURE 23 – Panneau permettant l'ajout manuel des charges ainsi que la paramétrisation du problème direct

Sur ce panneau sont en outre disponibles un menu déroulant permettant le choix de la configuration de l'environnement (bassin d'essais, aucune, une ou deux interfaces) ainsi que des zones de saisie de nombres permettant de fournir à LabVIEW la distance inter-électrodes, la conductivité électrique du milieu et les paramètres des interfaces si l'on travaille avec une ou deux interfaces. Un bouton "Rafraîchissement de la configuration" est également disponible afin de supprimer l'intégralité des charges déjà entrées.

L'ajout manuel des charges peut se révéler fastidieux si les charges sont nombreuses comme cela peut être le cas pour les modèles des navires de la Marine Nationale. Un menu de recherche dans l'arborescence des fichiers ainsi qu'un bouton "Lecture de la configuration" permet à l'utilisateur de spécifier l'emplacement et le nom d'un fichier contenant la configuration d'un problème, puis de l'importer.

Une fois la configuration initialisée, il ne reste plus qu'à appuyer sur le bouton "Envoyer la configuration" pour transmettre la configuration aux noeuds ROS2 chargés de calculer le problème direct via message ROS2 personnalisé.

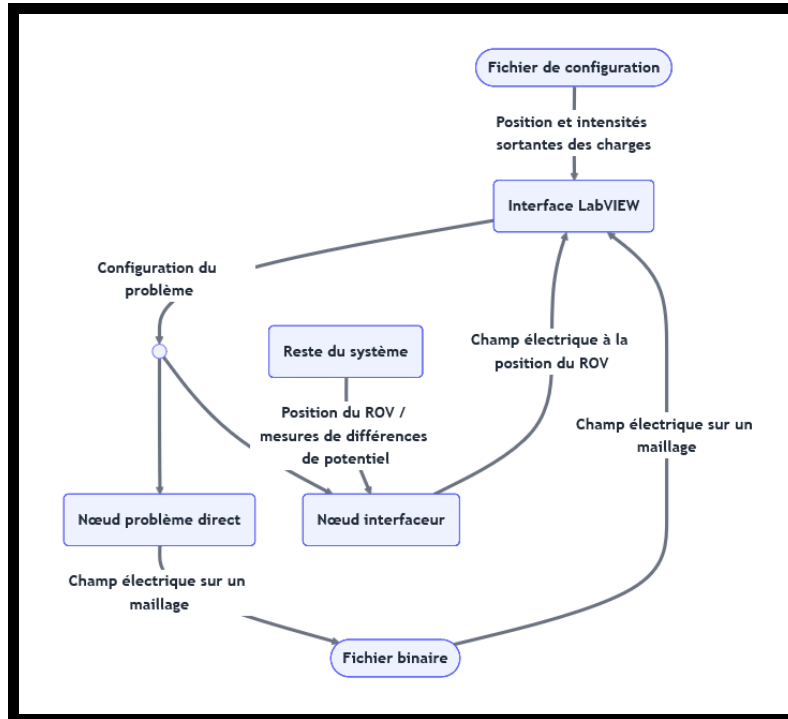


FIGURE 24 – Flux des données nécessaires au calcul du problème direct

Ces nœuds, appelés "nœud interfaceur" et "nœud problème direct", vont ensuite calculer le champ électrique théorique correspondant à la configuration envoyée par LabVIEW grâce à l'algorithme détaillé dans la partie (IV.1), le premier, à la position du ROV, le deuxième, sur un maillage dont les paramètres (profondeur, dimensions,...) sont eux aussi envoyés par LabVIEW.

Le champ calculé à la position du robot est ensuite renvoyé à LabVIEW et affiché superposé au champ mesuré par les électrodes sur les différentes voies afin de pouvoir les comparer.

Pour ce qui est du champ calculé sur un maillage, ce dernier est écrit dans un fichier binaire dont le nom et l'emplacement sont transmis à l'IHM. Cette dernière va ensuite lire le fichier et afficher le champ électrique à l'emplacement prévu. La figure suivante montre un exemple de ce à quoi peut ressembler l'affichage du champ électrique calculé :

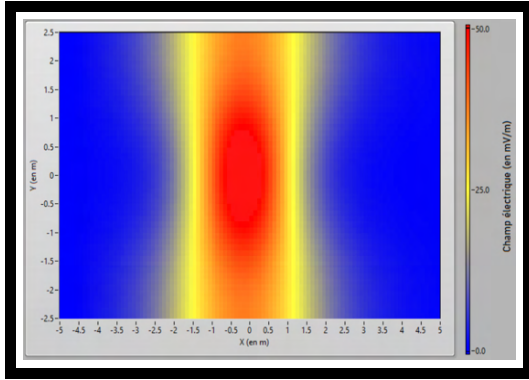


FIGURE 25 – Reconstruction du champ électrique généré par un dipôle en X sur la voie X

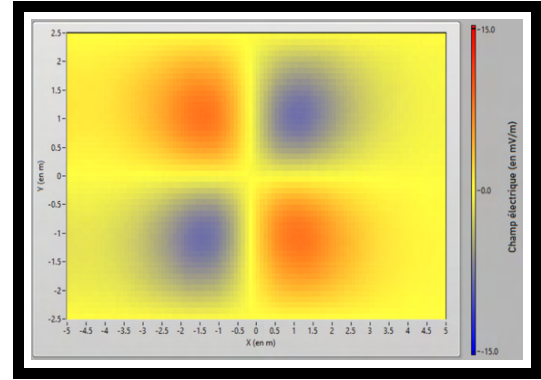


FIGURE 26 – Reconstruction du champ électrique généré par un dipôle en X sur la voie Y

Enfin, il est également à noter que l'échelle de couleurs du graphique est synchronisée avec celle de l'affichage du champ électrique en trois dimensions, afin de rendre ces deux graphes cohérents entre eux.

Résolution automatisée du problème inverse

La dernière fonctionnalité implémentée sur l'IHM est la résolution automatique du problème inverse. Le graphique suivant montre la manière dont elle fonctionne :

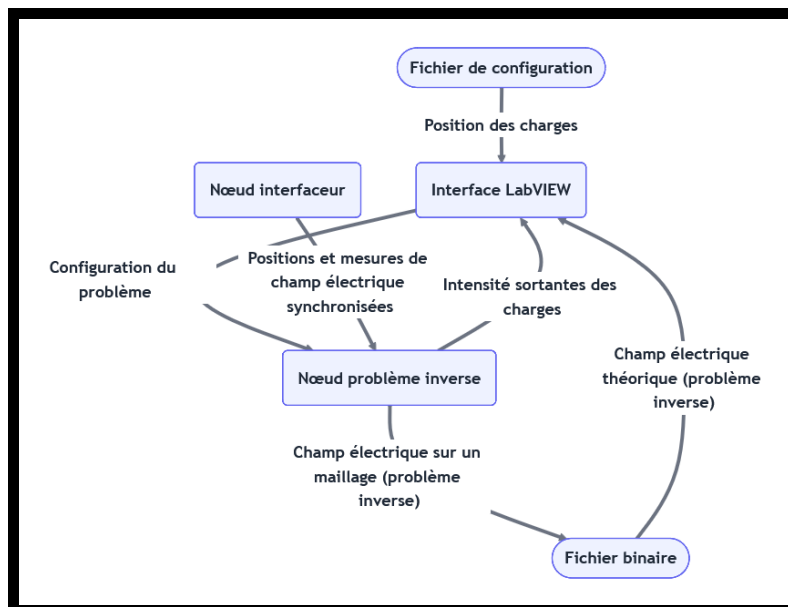


FIGURE 27 – Flux des données nécessaires à la résolution du problème inverse

Pour résoudre le problème inverse, un nœud ROS2 spécial a été développé. Il reprend et applique les algorithmes détaillés en partie IV.2. Ces algorithmes permettent de déterminer l'intensité sortante des charges modélisant le navire à mesurer à l'aide de leur position et de mesures du champ électrique.

L'IHM LabVIEW lit dans un fichier de configuration la position des charges et l'envoie au nœud ROS2 de résolution du problème inverse via message personnalisé ROS2. Les autres paramètres du problème ainsi que la méthode de résolution du problème inverse sont transmis de la même manière.

Le nœud résolvant le problème inverse récupère les mesures de champ électrique et applique l'algorithme de résolution du problème inverse. Les intensités sortantes des charges sont ensuite renvoyées à l'interface LabVIEW via ROS2, de même que le nom et l'emplacement du fichier binaire dans lequel ont été écrites les valeurs de champ électrique calculées avec les intensités sortantes des charges déterminées. L'interface LabVIEW va ensuite afficher les charges reçues et reconstruire la carte du champ électrique avec les données contenues dans le fichier binaire. Une carte de champ électrique reconstituée suite à une résolution du problème inverse a le même aspect qu'une carte réalisée pour un calcul du champ électrique par un problème direct dont un exemple est disponible plus haut (cf : figure 25).

Séquence d'utilisation de l'IHM

En pratique, l'utilisation de l'IHM se base en grande partie sur trois boutons. Une fois le BlueROV mis à l'eau et les différents nœuds ROS2 lancés, l'utilisateur doit régler les offsets inter-électrodes avec l'un des boutons "Réglage de toutes les voies". Ceci fait, il doit ensuite rentrer les charges dans l'interface LabVIEW, que ce soit manuellement ou automatiquement, via lecture dans un fichier texte. Puis, l'utilisateur doit effectuer le réglage des paramètres des problèmes direct et inverses, avant d'appuyer sur le bouton "Rafraîchissement" qui va effacer l'intégralité des points affichés sur le graphe 3D et recentrer la caméra. Enfin, lorsqu'il souhaitera effectuer la mesure du champ électrique, il devra appuyer sur le bouton "Lancement du problème inverse et de l'enregistrement des données" de l'onglet principal. Les configurations des problèmes directs et inverses seront alors envoyées aux nœuds correspondants et la résolution du problème inverse commencera.

IV Calcul du problème direct et résolution du problème inverse

La résolution du problème inverse représentait un objectif principal de mon stage. En effet, elle permet de vérifier l'adéquation de la signature électrique réelle d'un navire vis-à-vis de sa signature modélisée. Si la résolution du problème inverse permet de retrouver les intensités sortantes des charges modélisant le navire, alors la signature électrique de ce dernier peut être considérée comme nominale. Si la valeur absolue de l'intensité sortante des charges modélisant le navire déterminée est plus importante que prévue, alors la signature électrique du navire est dégradée et l'on doit s'interroger sur sa vulnérabilité aux mines électriques. La résolution du problème inverse est donc essentielle à l'étude de la signature électrique des navires.

IV.1 Calcul du problème direct

Modélisation des charges

La résolution du problème inverse a tout d'abord nécessité la création d'un modèle du champ électrique en tout point de l'espace de mesure. Dans les différents cas d'usages du projet DELFIN, l'espace de mesure peut être délimité ou non par des interfaces avec différents milieux (telles que la surface ou le fond marin par exemple, ou bien les parois du bassin d'essais du centre).

Calcul du problème direct pour une configuration sans interface

En vertu du principe de superposition [5] et en reprenant l'équation du champ électrique généré par une charge électrique (cf : équation (1)), le champ électrique généré par N charges situées en $C_i, i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ dans un milieu de conductivité électrique σ_0 limité par aucune interface et traversées par une intensité sortante I_i s'écrit :

$$\overrightarrow{E(O)} = \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{4\pi\sigma_0 \|\overrightarrow{C_i O}\|^2} * \overrightarrow{e_{r,i}} \quad (3)$$

En connaissant la position de chacune des charges modélisant les éléments du navire responsables de la génération de courant dans l'eau, ainsi que l'intensité sortante qui les traverse il est possible de calculer le champ électrique en tout point d'un milieu qui n'est limité par aucune interface. Ce modèle s'applique également pour les environnements où les interfaces sont suffisamment éloignées du point où l'on calcule le champ électrique pour ne pas avoir d'influence significative sur ce dernier.

Calcul du problème direct pour une configuration à une interface

En pratique, lors de la mesure de la signature électrique d'un navire, ce dernier se trouve à la surface de la mer. Cette interface est donc à prendre en compte lors du calcul du champ électrique théorique. Elle sera également considérée comme plane.

Considérons que nous réalisons nos mesures de champ électrique dans un milieu de conductivité électrique σ_0 et que la conductivité du milieu qui se trouve derrière l'interface est de σ_1 . Une charge d'intensité sortante I est placée en un point C de l'espace de mesure.

L'interface sera modélisée par l'ajout d'une nouvelle charge, dite charge image, située au point C' , symétrique de C par rapport au plan de l'interface (voir figure ci-dessous).

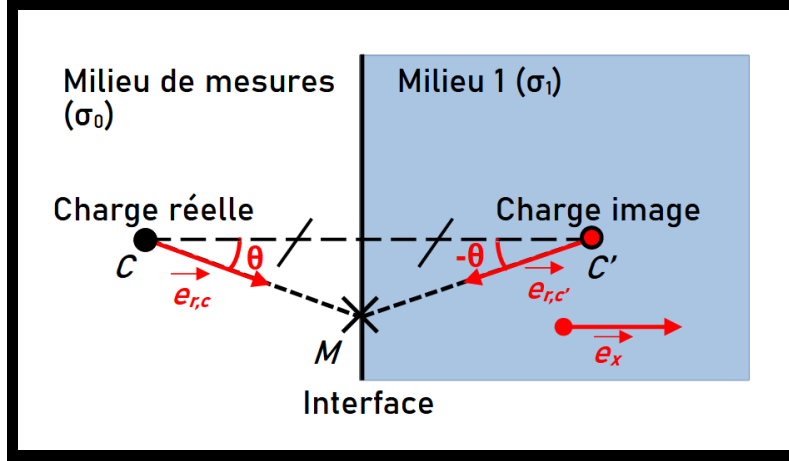


FIGURE 28 – Placement de la charge image, symétriquement à la charge réelle par rapport à l'interface

En reprenant les équations données dans le livre *Analysis and Computation of electric and magnetic field problems* [9] de K.J. Binns, P.J. Lawrenson, le champ électrique généré par la charge réelle, $E_{\text{réel}}$, est lié au champ généré par la charge image, E_{image} par l'application du principe de superposition en tout point M de l'interface :

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{réel}} + \left(\frac{\sigma_0 + \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_1} \right) * \vec{E}_{\text{image}} &= \vec{0} \\ \Rightarrow \frac{I_{\text{réel}}}{4\pi\sigma_0 ||\vec{CM}||^2} * \vec{e}_{r,C} &= - \left(\frac{\sigma_0 + \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_1} \right) \frac{I_{\text{image}}}{4\pi\sigma_0 ||\vec{C'M}||^2} * \vec{e}_{r,C'} \end{aligned} \quad (4)$$

On cherche à déterminer I_{image} . Comme C' est le symétrique de C par rapport au plan de l'interface, $||\vec{CM}|| = ||\vec{C'M}||$. En projetant selon $\vec{e}_x$:

$$\frac{I_{\text{réel}}}{4\pi\sigma_0 ||\vec{CM}||^2} = \left(\frac{\sigma_0 + \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_1} \right) \frac{I_{\text{image}}}{4\pi\sigma_0 ||\vec{C'M}||^2}$$

On déduit donc que l'intensité sortante de la charge image est :

$$I_{\text{image}} = \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0 + \sigma_1} \right) * I_{\text{réel}} \quad (5)$$

Le champ électrique généré au point O par N charges situées en $C_i, i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ dans un milieu de conductivité électrique σ_0 limité par une interface et traversées par une intensité sortante I_i est une nouvelle fois déduit via de l'application du principe de superposition, en ajoutant au champ généré par les charges réelles celui généré par les charges images comme l'indique l'équation suivante :

$$\vec{E}(O) = \sum_{i=1}^N \frac{I_{i,\text{réel}}}{4\pi\sigma ||\vec{C_iO}||^2} * \vec{e}_{r,i} + \frac{I_{i,\text{image}}}{4\pi\sigma ||\vec{C_{i,\text{image}}O}||^2} * \vec{e}_{r,i,\text{image}} \quad (6)$$

Nous avons donc adapté avec succès notre modèle à une configuration d'espace de mesure délimité par une seule interface. Ce modèle prenant en compte une interface s'applique correctement en haute mer, en supposant que la profondeur du fond soit supérieure à une centaine de mètres environ et que le ROV reste près de la cible.

Calcul du problème direct pour une configuration à deux interfaces

Les zones littorales représentent un autre cas d'usage du système DELFIN. La profondeur peut y être très faible. On ne peut donc plus négliger l'interface entre l'eau et le fond de la mer dans notre modélisation du champ électrique. Celle-ci sera considérée comme plane, bien que cette hypothèse puisse se révéler assez éloignée de la réalité dans bien des cas. Elle sera également considérée parallèle à la première interface, une hypothèse qui n'est pas vérifiée lorsque le fond est en pente.

Pour ne pas appesantir le présent document avec de longs calculs, la démonstration de l'obtention du champ électrique pour une configuration à deux électrodes se trouve en annexe page 55. Le modèle qui y est calculé s'applique en zone littorale, en supposant que l'on se trouve à plus d'une centaine de mètres des côtes car ces dernières rajoutent une ou plusieurs interfaces à prendre en compte.

Calcul du problème direct pour une configuration à six interfaces

Un modèle a également été développé par un chargé d'expertise du groupe EMSM pour une configuration à six interfaces formant un parallélépipède rectangle. Ce dernier est une généralisation des modèles précédents et servira à la prédiction du champ électrique dans le bassin d'essais du centre.

IV.2 Résolution du problème inverse

L'un des objectifs principaux de mon stage consistait à implémenter un algorithme permettant de résoudre le problème inverse. Autrement dit, en connaissant la position des charges dans l'espace ainsi qu'en disposant de plusieurs mesures du champ électrique, on souhaite retrouver l'intensité sortante des charges.

Cette résolution a été implémentée selon deux méthodes. La première utilisant la décomposition en valeurs singulières (SVD) de la matrice A modélisant le problème, la seconde implémentant une estimation récursive des paramètres au fur et à mesure que les mesures de champ électrique arrivent. L'objectif de l'implémentation des deux méthodes est de comparer leurs performances.

Modélisation matricielle du problème

La première étape de la résolution du problème inverse a consisté en une modélisation matricielle du problème. Cette dernière consiste à déterminer une matrice A reliant le vecteur des mesures B au vecteurs des paramètres estimés X . Dans notre cas, les paramètres estimés sont l'intensité sortante des charges présentes dans le milieu. La détermination de cette matrice A peut être retrouvée en annexe page 58.

Résolution du problème inverse par décomposition SVD

Une fois le problème modélisé sous forme matricielle, nous pouvons maintenant le résoudre par différentes méthodes.

La première méthode de résolution du problème inverse est basée sur la décomposition SVD et consiste à trouver le vecteur des intensités sortantes X_0 minimisant la norme 2 du vecteur des résidus $AX - B$, autrement dit, le vecteur X_0 minimisant la norme de l'écart entre le modèle (AX) et la réalité (B).

Rappelons tout d'abord le théorème dont est issue la décomposition en valeurs singulières de toute matrice A (cf : [7]) :

"Soit $A \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$. Il existe $U \in \mathcal{M}_m(\mathbb{R})$, $V \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $D \in \mathcal{M}_{m,n}(\mathbb{R})$ et $d_{\min(m,n)} > \dots > d_1 \geq 0$, $\min(m,n)$ réels tels que :

- $A = U \times D \times V^T$
- D est une matrice diagonale telle que $\forall i \in \llbracket 1, \min(m, n) \rrbracket, D_{i,i} = d_i$

Cette décomposition est appelée décomposition en valeurs singulières de A et les d_i sont appelées valeurs singulières de A "

La résolution du problème inverse par décomposition SVD est détaillée en annexe page 59.

Cette méthode possède néanmoins quelques inconvénients. Le premier consiste dans le fait que, si l'on regarde l'équation (19), les scalaires d_i sont au dénominateurs, ce qui implique que les valeurs singulières les plus faibles ont le plus d'importance dans la reconstruction de la matrice A . La faible inexactitude introduite dans la SVD par les calculs numériques peut suffire à rendre un ou plusieurs d_i très petit alors qu'il devrait être nul. Ces d_i influenceront beaucoup la reconstruction de la matrice A , alors qu'il devrait pas en être ainsi. Un filtrage des d_i par rapport à leur maximum peut donc se révéler nécessaire (en pratique, on filtre les d_i inférieurs à $\epsilon * \max(d_i)$ avec ϵ choisi entre 10^{-4} et 10^{-6}).

Le deuxième inconvénient est le fait que si les mesures arrivent petit à petit (et c'est le cas lorsque l'on souhaite réaliser une résolution du problème inverse en temps réel), il est nécessaire de refaire ce calcul avec l'intégralité des mesures pour prendre en compte l'impact de chacune d'entre elle sur le calcul du vecteur des paramètres, ce qui, lorsque l'on a beaucoup de mesures, peut conduire à des calculs très coûteux, les dimensions des matrices devenant de plus en plus élevées.

Enfin, le dernier inconvénient est que les points où sont réalisées les mesures doivent être suffisamment espacés dans l'espace pour que l'impact du bruit de mesure ne fausse pas les calculs. Si la valeur du champ électrique mesuré en deux points très proches (quelques centimètres, par exemple) est suffisamment différente à cause du bruit de mesure, le modèle obtenu pourra être capable de coller aux mesures mais pas de généraliser correctement.

Résolution du problème inverse par méthode bayésienne

La résolution du problème inverse par méthode bayésienne repose sur une approche différente. On ne cherche plus à minimiser la norme 2 du résidu entre le modèle (AX) et les mesures réalisées (X), mais on suppose que les paramètres suivent la loi de probabilité de la variable aléatoire $\mathcal{X}$ et que les mesures suivent la loi de probabilité de la variable aléatoire $\mathcal{B}$. L'objectif est donc de déterminer X_{opt} tel que la densité de probabilité de $\mathcal{X}|\mathcal{B}$ ($\mathcal{X}$ sachant $\mathcal{B}$) soit maximale pour $X = X_{opt}$.

La résolution du problème inverse par décomposition méthode bayésienne est également détaillée en annexe page 59.

L'un des avantages de cette méthode réside dans le fait que les ressources nécessaires pour réaliser la résolution du problème inverse sont équivalentes à chaque itération de l'algorithme. En effet, l'information portée par les mesures traitées pendant les itérations précédentes servant à corriger l'estimation des paramètres, il n'y a pas besoin de les conserver. Le vecteur de mesure et sa matrice de covariance ainsi que la matrice modélisant le problème sont donc vidés après chaque résolution du problème inverse. Ainsi, leur taille n'explose pas au fur et à mesure de l'obtention de nouvelles mesures.

Ajout loi des noeuds aux équations du problème

En considérant qu'il n'y a pas d'accumulation de charges dans l'eau (que l'on considérera comme un noeud du circuit), on en déduit que la somme des intensités sortantes des charges présentes dans l'eau est nulle. Autrement dit, pour N charges d'intensités sortantes $I_i, i \in \llbracket 1, N \rrbracket$:

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0 \quad (7)$$

En réécrivant matriciellement cette équation, on obtient :

$$(1 \dots 1) \underbrace{\begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix}}_X = 0 \quad (8)$$

On peut donc insérer dans la matrice A la ligne $(1 \dots 1)$ et dans le vecteur B la valeur 0 afin de modéliser la loi des nœuds et d'inciter les méthodes de résolution du problème inverse à tendre vers des solutions qui la vérifie.

Lorsque l'on ajoute l'équation de la loi des nœuds à la modélisation problème et que l'on souhaite le résoudre de manière inverse grâce à la méthode bayésienne, il est également nécessaire de mettre à jour S_m , la matrice de covariance des mesures. Cette mise à jour est réalisée sous la forme de l'ajout d'une ligne et d'une colonne de 0 à cette matrice. Le nouveau coefficient présent sur la diagonale, représentant la variance de la mesure fictive que nous donne la loi des nœuds, ne peut pas être gardé à 0 même si la loi est exacte car cela rendrait la matrice S_m non inversible. On choisit donc arbitrairement la variance que l'on souhaite autoriser pour cette équation (plus la valeur de cette dernière est importante, plus on autorise l'algorithme résolvant le problème inverse à s'en écarter).

À l'issue de ce travail de modélisation, nous sommes donc :

- capable de calculer le problème direct, à savoir, de prédire le champ électrique en tout point de l'espace de mesures à partir de la position et de l'intensité sortante des charges ainsi que de la position des interfaces avec les milieux adjacents (murs, air, etc...)
- capable de résoudre le problème inverse en temps réel, autrement dit, à partir de la position des charges et des interfaces, et des mesures de champ électrique réalisées, de retrouver l'intensité sortante de ces charges. Ces valeurs d'intensités sortantes pourront être ensuite comparées aux valeurs présentes dans le modèle du navire mesuré afin de déterminer s'il est vulnérable aux mines électriques et dans quelle proportion il est détectable par des moyens de mesures du champ électrique.

V Vérifications et validations expérimentales de la nouvelle version du système

Après avoir réussi à stabiliser la dérive des électrodes et particulièrement l'offset à leurs bornes (cf : section [III.2]), puis à développer les algorithmes permettant de calculer le problème direct et de résoudre le problème inverse (cf : section IV.1), il a ensuite fallu valider un à un les jalons nous séparant de la résolution du problème inverse en bonne et due forme. Il est également à préciser que l'intégralité des expériences a été menées en configuration USBs seuls. Bien que cette configuration ne soit que temporaire, elle reste néanmoins suffisante pour étudier les performances de la chaîne de mesure.

Calibration des électrodes (09-07-2026)

Avant de se lancer plus avant dans le calcul du champ électrique théorique et la résolution problème inverse, il a tout d'abord fallu calibrer les électrodes : l'influence

du porteur (BlueROV) sur ces dernières étant inconnue, il a donc fallu la déterminer pour ensuite corriger les mesures effectuées par les électrodes, et ce, sur les trois voies de mesures.

Le montage utilisé pour la calibration a été le suivant :

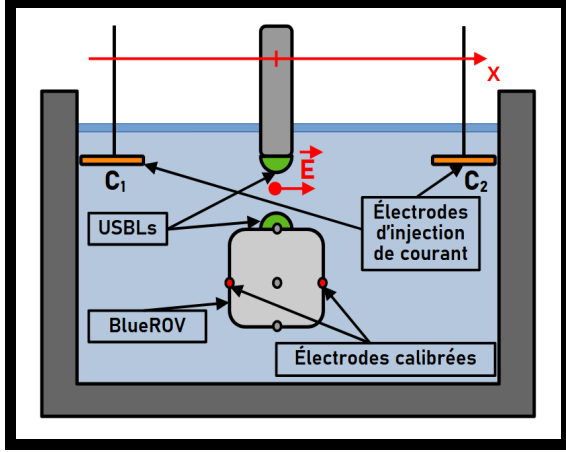


FIGURE 29 – Montage utilisé pour réaliser l'expérience

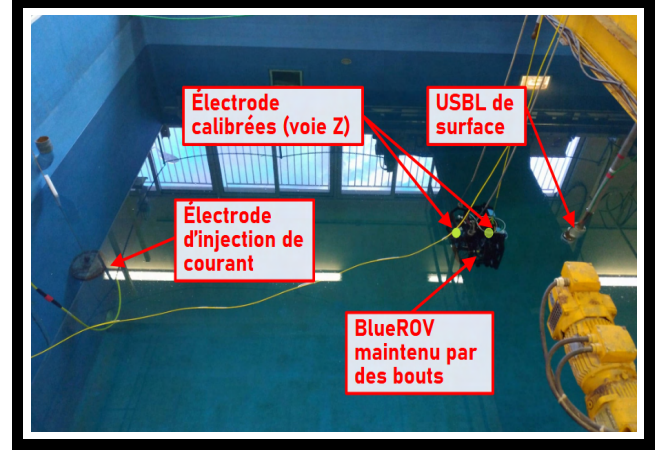


FIGURE 30 – Calibration de la voie Z

Deux électrodes d'injection de courant (en orange sur le schéma ci-dessus) sont placées de part et d'autre du bassin. L'USBL est placée au milieu du segment séparant les deux électrodes. Un courant I circule de l'électrode de gauche vers l'électrode de droite. Le robot est placé vers le milieu du bassin.

Toujours en se basant sur le schéma ci-dessus, on définit comme abscisse de référence celle de l'USBL de surface. La distance entre l'électrode $C1$ et la droite verticale d'abscisse nulle est notée d . L'électrode $C2$ étant placée symétriquement à l'électrode $C1$ par rapport à l'USBL de surface, la distance entre elle et l'USBL de surface est également d . En reprenant l'équation (3), on détermine le champ électrique en tout point M d'abscisse nulle :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{E(M)} &= \frac{I}{4\pi\sigma_0^2} * \overrightarrow{e_{r,1}} + \frac{-I}{4\pi\sigma_0 d^2} * (-\overrightarrow{e_{r,2}}) \\ &= \frac{2I}{4\pi\sigma_0 d^2} * \overrightarrow{e_x}\end{aligned}\tag{9}$$

Le champ électrique en tout point de la droite d'abscisse nulle est donc parallèle au vecteur $\overrightarrow{e_x}$.

Pour effectuer la calibration de chaque voie, il est donc nécessaire de placer le robot sous l'USBL de surface de telle manière à ce que le segment formé par les deux électrodes de la voie soit parallèle au vecteur $\overrightarrow{e_x}$. Ceci est très facilement réalisable pour les voies X et Y. Cependant, pour la voie Z, il a fallu avoir recours au montage détaillé sur la figure (30). Ce montage ne permettait malheureusement pas d'obtenir un champ électrique mesuré uniquement sur la voie Z dans ces conditions. De plus, ce dernier augmentait également l'incertitude sur l'orientation du segment entre les deux électrodes.

Plusieurs valeurs de courant ont ensuite été injectées dans les électrodes d'injection et les valeurs de différence de potentiel aux bornes des électrodes des voies calibrées ont été relevées. Le champ électrique théorique a lui aussi été calculé à la position du repère de mesures pour les différentes valeurs de courant grâce au modèle développé par le chargé d'expertise du groupe EMSM et présenté en partie IV.2. Au niveau de la voie Z, le calcul du champ électrique théorique a pris en compte la position excentrée du ROV par rapport à l'axe vertical de l'USBL. Les résultats des mesures pour la voie Z sont présentés dans le tableau ci-dessous :

I (en mA)	U (en mV)	E théorique (en mV/m)
0	-0,14	-1,09
1	1,80	0,00
5	7,45	2,26
10	14,60	11,34
20	29,13	45,37
30	43,14	68,00
40	57,18	90,72

En remaniant l'équation (2), on peut réécrire la relation entre le champ électrique théorique E_z et la différence de potentiel aux bornes des électrodes de la voie Z, U_z , comme suit :

$$U_z = D_z * E_z \quad (10)$$

avec D_z la distance calibrée entre les deux électrodes.

En effectuant la régression linéaire entre U_z et E_z , on obtient la relation suivante :

$$U_z(mV) = 0,629(m) * E_z(mV/m) - 0,249(mV) \quad (11)$$

En négligeant l'offset de $-0,249mV$ résultant du calcul de la régression, la distance inter-électrodes calibrée résultante est de $62,9cm$ (pour information, la distance-inter électrodes réelle est de $41cm$).

Désormais, c'est cette distance inter-électrodes que l'on utilisera pour convertir les mesures de différence de potentiel lues sur la voie Z en champ électrique.

L'application du même protocole sur les voies X et Y a permis de compléter la calibration du système de mesure.

Validation du calcul du champ électrique théorique (05-08-2026)

Après avoir effectué la calibration des électrodes, l'objectif a été de vérifier la correspondance entre les modèles développés en partie [IV.1] et mes mesures réalisées par le ROV. Le montage utilisé pour réaliser cette expérience est décrit par le schéma ci-dessous :

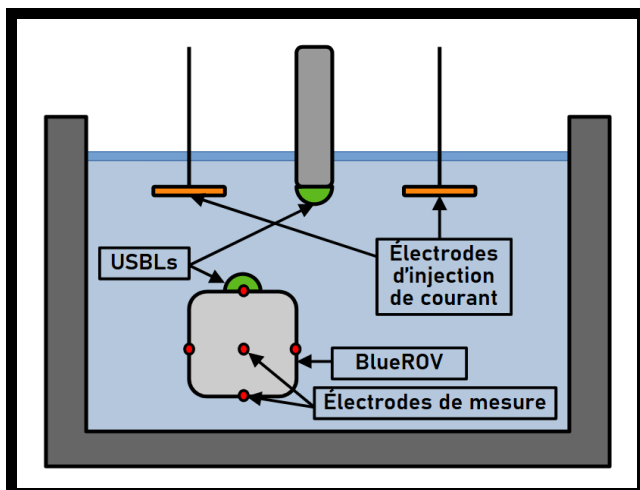


FIGURE 31 – Montage utilisé pour réaliser l'expérience

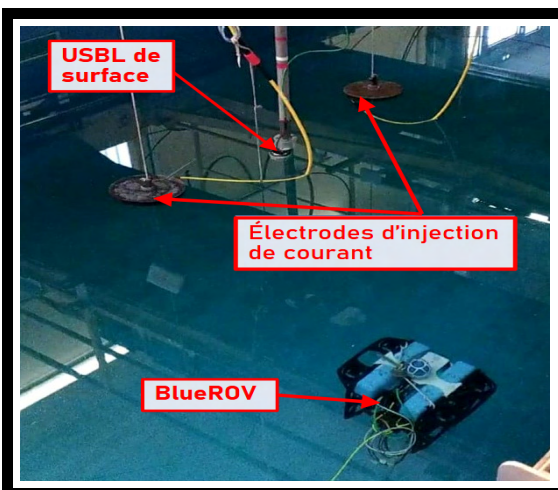


FIGURE 32 – BlueROV mesurant le champ électrique dans le bassin d'essai du centre

Deux larges électrodes injectaient un courant dans l'eau du bassin (en orange sur le schéma). Le BlueROV a circulé en-dessous des charges avec une trajectoire rectiligne et différentes orientations. Après quelques ajustements, nous avons obtenus la courbe affichée sur la figure ci-dessous :

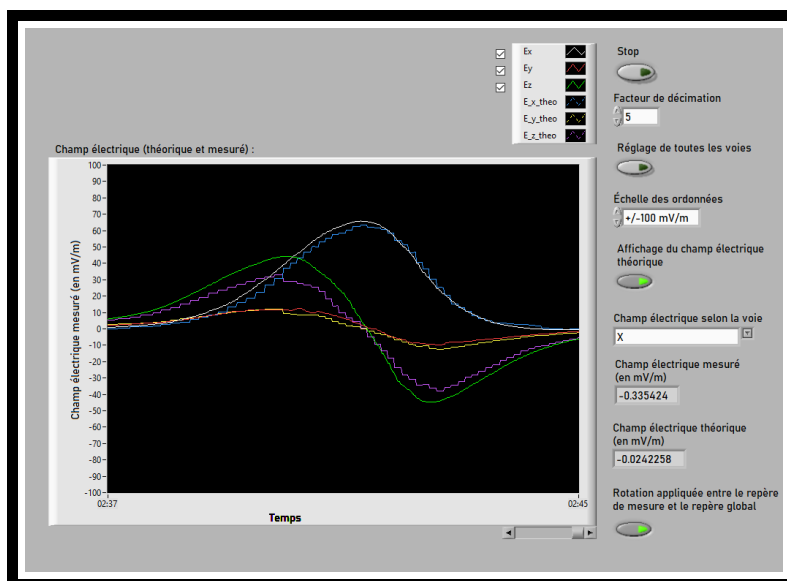


FIGURE 33 – Comparaison entre le champ électrique théorique et le champ électrique mesuré

On remarque qu'au niveau des voies X (mesures courbe blanche et théorie courbe bleue) et des voies Y (mesures courbe rouge et théorie courbe jaune), les mesures ne s'écartent de la théorie que de l'ordre du millivolt tandis que sur la voie Z (mesures courbe verte et théorie courbe violette), cet écart est de l'ordre de la dizaine de millivolts lorsque le champ sur cette voie est important.

Ces écarts peut avoir plusieurs raisons. Tout d'abord, il peut s'agir d'un défaut de calibration (ce qui est probable sur la voie Z, considérant les conditions peu fa-

vorables dans lesquelles a été réalisée sa calibration). Ensuite peuvent se rajouter à ces incertitudes les incertitudes de positionnement des sources et des murs du bassin par rapport à l'origine du repère. Enfin, une dérive progressive des offsets, lente mais potentiellement bien réelle après une heure de manipulations.

Validation de la résolution du problème inverse (06-08-2026)

Une fois montré que notre modèle correspond bien à la réalité (bien que les écarts qui y sont constatés demeurent à investiguer), la validation de la résolution du problème inverse en direct a pu être menée. Le dispositif est resté le même que celui décrit sur la figure 31. Le robot a effectué plusieurs passes sous les électrodes pendant lesquelles il a mesuré le champ électrique. Pendant ce temps, la résolution du problème inverse était réalisée en temps réel.

Les images suivantes montrent les résultats obtenus pour une résolution du problème inverse par méthode SVD.

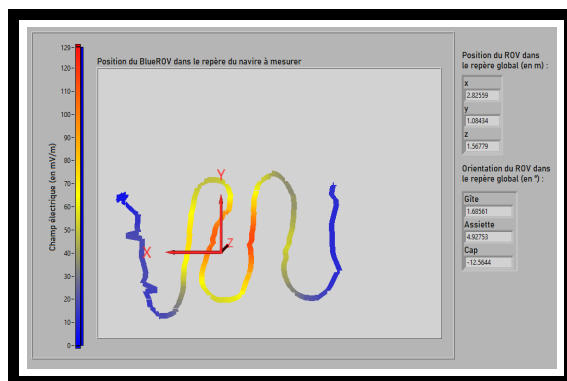


FIGURE 34 – Trajectoire du ROV dans le bassin d'essais par rapport au repère du navire à mesurer (en rouge) - méthode SVD

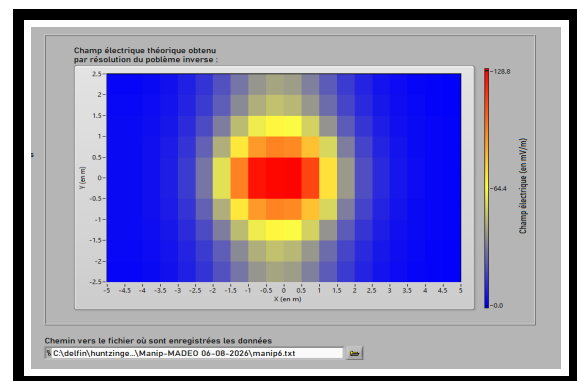


FIGURE 35 – Norme du champ électrique reconstruit à l'aide des charges déterminées par résolution du problème inverse - méthode SVD

Charges					
	X (en m)	Y (en m)	Z (en m)	I_sortante (en A)	Idem - pb inv
Charge n°1	-0.877000	0.000000	0.100000	0.050000	0.051938
Charge n°2	0.550000	0.000000	0.100000	-0.050000	-0.048141

FIGURE 36 – Paramètres des charges (les intensités sortantes des charges retrouvées par le problème inverse se trouvent sur la dernière colonne, les intensités sortantes réelles se trouvent sur l'avant-dernière) - méthode SVD

On peut remarquer que les intensités sortantes des charges retrouvées par le problème inverse, affichées sur la dernière colonne du tableau, sont du même ordre de

grandeur que les intensités sortantes réelles, affichées sur l'avant-dernière colonne du tableau.

En notant $X_{\text{réel}} = \begin{pmatrix} 0,050 \\ -0,050 \end{pmatrix}$ le vecteur des intensités sortantes réelles et $X_0 = \begin{pmatrix} 0,052 \\ -0,048 \end{pmatrix}$ le vecteur des intensités sortantes déterminées par la résolution du problème inverse par méthode SVD, l'erreur relative en norme 2 entre les deux est de :

$$\epsilon_{SVD} = \frac{\|X_{\text{réel}} - X_0\|}{\|X_{\text{réel}}\|} = \frac{\left\| \begin{pmatrix} 0,050 \\ -0,050 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0,052 \\ -0,048 \end{pmatrix} \right\|}{\left\| \begin{pmatrix} 0,050 \\ -0,050 \end{pmatrix} \right\|} = 0,040 \quad (12)$$

Les intensités sortantes des charges ont donc été retrouvées avec 4,0% d'erreur au niveau de la norme 2 de leur vecteur pour une résolution du problème inverse par méthode SVD.

Les images suivantes montrent les résultats de la même expérience pour une méthode de résolution du problème inverse bayésienne :

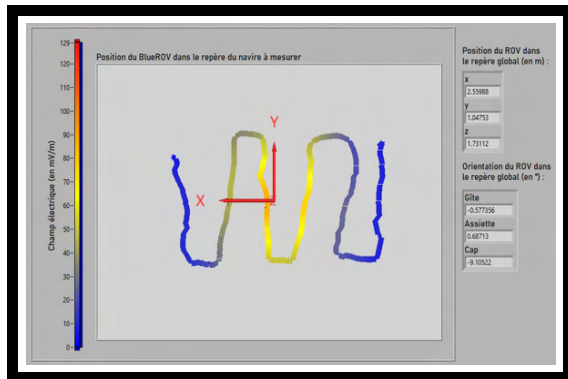


FIGURE 37 – Trajectoire du ROV dans le bassin d'essais par rapport au repère du navire à mesurer (en rouge) - méthode bayésienne

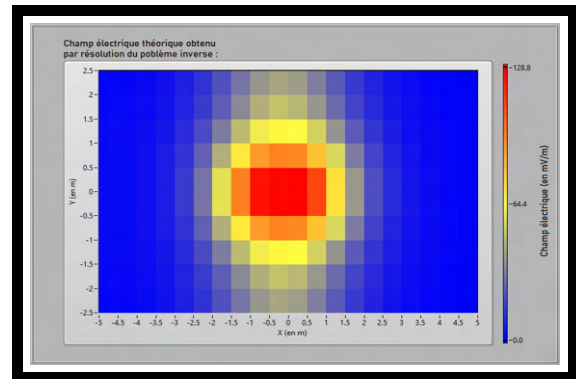


FIGURE 38 – Norme du champ électrique reconstruit à l'aide des charges déterminées par résolution du problème inverse - méthode bayésienne

Charges					
	X (en m)	Y (en m)	Z (en m)	I_sortante (en A)	Idem - pb inv
Charge n°1	-0.877000	0.000000	0.100000	0.050000	0.049484
Charge n°2	0.550000	0.000000	0.100000	-0.050000	-0.048432

FIGURE 39 – Paramètres des charges (les intensités sortantes des charges retrouvées par le problème inverse se trouvent sur la dernière colonne, les intensités sortantes réelles se trouvent sur l'avant-dernière) - méthode bayésienne

Le vecteur des intensités sortantes a priori a été initialisé par le vecteur nul.

De la même manière que précédemment, on peut remarquer que les intensités sortantes des charges retrouvées par le problème inverse et affichées sur la dernière colonne du tableau sont du même ordre de grandeur que les intensités sortantes réelles, affichées sur l'avant-dernière colonne du tableau.

Une nouvelle fois, en notant $X_{\text{réel}} = \begin{pmatrix} 0,050 \\ -0,050 \end{pmatrix}$ le vecteur des intensités sortantes réelles et $X_0 = \begin{pmatrix} 0,049 \\ -0,048 \end{pmatrix}$ le vecteur des intensités sortantes déterminées par la résolution du problème inverse par méthode SVD, l'erreur relative en norme 2 entre les deux est de :

$$\epsilon_{SVD} = \frac{\|X_{\text{réel}} - X_0\|}{\|X_{\text{réel}}\|} = \frac{\left\| \begin{pmatrix} 0,050 \\ -0,050 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0,049 \\ -0,048 \end{pmatrix} \right\|}{\|X_0\|} = 0,032 \quad (13)$$

Les intensités sortantes des charges ont donc été retrouvées avec 3,2% d'erreur au niveau de la norme 2 de leur vecteur pour une résolution du problème inverse par méthode bayésienne.

L'erreur au niveau de la norme 2 s'est révélée plus faible pour une résolution du problème inverse utilisant la méthode bayésienne. Cependant, pour conclure avec certitude sur une efficacité supérieure de cette dernière sur la méthode SVD, un plus grand nombre d'expériences - et des expériences plus complexes - seraient nécessaires.

Toutefois, une précision plus importante de la mesure de la position du ROV et particulièrement une précision plus importante du positionnement acoustique serait bénéfique à la résolution du problème inverse. Combinée à une calibration plus précise des différentes voies, et particulièrement de la voie Z, elle devrait fournir des données plus précises aux algorithmes de résolution du problème inverse, et par là, leur permettre d'obtenir une plus grande exactitude dans la détermination des intensités sortantes des charges.

Conclusion

L'objectif de ce projet de fin d'études était de développer un robot sous-marin capable de mesurer la signature électrique d'un navire dans le cadre du projet DELFIN mené par la Direction Générale de l'Armement. Ce stage s'est divisé en plusieurs parties (voir diagramme de Gantt en annexe page V).

La première visait à m'approprier et à réaliser un audit des codes et autres éléments de l'architecture du système ayant été développé par mes prédécesseurs pour ce projet.

Une fois ces éléments appropriés, il m'a tout d'abord fallu corriger et améliorer la partie GNSS de la chaîne de mesures. Un travail qui a rendu opérationnelle la réception des transformations entre les différents récepteurs GNSS du système. Une amélioration possible du système pourrait être le choix automatique des zones de projections depuis le repère géographique par le nœud ROS2 en charge de la récupération des différentes transformations, la zone UTM 30N n'étant pas pertinente sur l'ensemble du globe. Une quantification en profondeur de la précision du positionnement reste également à mener.

Ensuite, il a fallu investiguer les raisons de la variation des offsets de mesure entre les électrodes. Cette investigation m'a demandé d'analyser les performances de plusieurs types d'électrodes et de cartes d'acquisition avant de déterminer la meilleure combinaison ainsi que ses performances. Bien qu'une amélioration conséquente ait déjà été apportée à la stabilisation de la mesure, il reste néanmoins du travail sur ce sujet, les performances des bases de mesures fixes de la DGA n'ayant pas encore été atteintes et la partie fréquentielle du problème ayant été mise de côté durant ce stage.

Une étude théorique de la modélisation du champ électrique sous la direction d'un chargé d'expertise du groupe EMSM m'a amené à développer des modèles permettant de prédire le champ électrique au sein d'un milieu. Elle m'a aussi fourni la base théorique nécessaire à l'implémentation de la résolution du problème inverse (à savoir la détermination de l'intensité sortante des charges à partir des mesures de champ électrique). Deux algorithmes ont été mis en place pour ce faire : l'un repose sur une approche par Décomposition en Valeurs Singulières (SVD) classique tandis que l'autre est basé sur une approche probabiliste bayésienne.

En parallèle, un important travail de développement d'une interface homme-machine a été mené. De nombreuses fonctionnalités ont été rajoutées à l'IHM précédente : la capacité d'afficher les différentes composantes du champ électrique en trois dimensions, celle de superposer le champ électrique théorique à celui mesuré ou bien celle de résoudre le problème inverse en temps réel.

Enfin, différentes expériences ont été menées dans le bassin d'essais du centre et ont permis de valider la stabilisation de la variation des offsets inter-électrodes, de même que la chaîne de positionnement en configuration simplifiée (USBLs seuls), le calcul du champ électrique théorique ainsi que la résolution du problème inverse dans le cas simple d'un dipôle.

Les perspectives d'amélioration du système sont nombreuses. Tout d'abord, il s'agit de valider la résolution du problème inverse sur des cas plus compliqué. Des essais ont déjà été menés en ce sens et les résultats sont prometteurs. Cependant, ils n'ont pas été présentés dans ce rapport par manque du temps nécessaire pour les concrétiser. Ensuite, une validation du système complet, c'est-à-dire du système pour lequel le positionnement acoustique est déporté sur une vedette de soutien, reste à mener. Une quantification plus poussée de la précision en position du système reste à mener, ainsi que de la dérive de l'offset aux bornes des électrodes sur une heure environ, afin de pouvoir répondre précisément à la question de l'adéquation de notre système au cahier des charges. Pour finir, l'aspect fréquentiel des mesures reste également à implémenter. Pour cela il sera sans doute nécessaire de s'affranchir de ROS2 pour le transfert des mesures ainsi que de refondre une partie de l'IHM développée pour l'adapter à une communication utilisant le protocole TCP.

Mon stage mené au sein du groupe Électro-Magnétisme Sous-Marin de DGA Techniques Navales a été pour moi une occasion unique de mettre en application la formation que j'ai reçue à l'ENSTA à travers l'utilisation de ROS2 et la manipulation des transformations inter-repères, notamment... Il m'a également permis d'apprendre les rudiments d'un nouveau domaine : l'électro-magnétisme sous-marin, ce qui me permettant ainsi d'enrichir ma culture personnelle et professionnelle. Bien que le projet DELFIN n'ait été achevé à la fin de mon stage, c'est avec joie que j'ai pu apporter ma pierre à cet édifice.

Annexes

Annexe A : frames GNSS récupérées par le récepteur GNSS V200 d'He-misphere

Trame GGA (Global Positioning System Fix Data)

Exemple de trame GLL : `$GPGGA,123519,4807.038,N,01131.324,E,1,08,0.9,545.4,M,46.9,M,,*42`.

123519 indique que le fix a été reçu à 12h 35min 19s UTC, 4807.038, *N* et 01131.324, *E* représentent une latitude de 48°07,038' nord et une longitude de 11°31,324' est, 08 le nombre de satellite en poursuite, 545 l'altitude au-dessus du niveau moyen de la mer et 46.9, *M* la correction de la hauteur de la géoïde en mètres par rapport à l'ellipsoïde WGS84 (MSL).

Trame GLL (Geographic Position – Latitude/Longitude)

Exemple de trame GLL : `$GPGLL,4916.45,N,12311.12,W,225444,A`.

4916.46, *N* représente une latitude de 49°16,46' nord, 12311.12, *W* une longitude de 123°11,12' nord. 225444 indique l'heure d'acquisition du fix (22h 55min 44s UTC) et A indique que le message est valide.

Trame RMC (Recommended Minimum Navigation Information)

Exemple de trame RMC : `$GPRMC,225446,A,4916.45,N,12311.12,W,000.5,054.7,191194,020.3,E*68`

225446 indique l'heure du Fix 22h 54min 46s UTC, A l'alerte du logiciel de navigation (A = OK, V = warning). 4916.45, *N* représentent une latitude de 49°16,45' nord et 12311.12, *W* une longitude de 123°11,12' ouest, 000.5 la vitesse par rapport au sol en noeuds, 054.7 le cap et 191194 la date du fix, à savoir le 19 Novembre 1994.

Trame HDT (Heading from True North)

Exemple de trame HDT : `$GPHDT,123.456,T*00`

123.456 indique un cap de 123,456° et T indique que ce cap est défini par rapport au vrai nord.

Trame ZDA (Coordinated Universal Time)

Exemple de trame ZDA : $\$GPZDA, 172809.456, 24, 07, 1996, 00, 00 * 45$

172809.456 indique que l'heure du Fix est 17h 28min 09,456s, 24, 07, 1996, que le Fix a été réalisé le 24 juillet 1996

Trame GPGST (GNSS Pseudorange Error Statistics)

Exemple de trames GPGST : $\$GPGST, 172814.0, 0.006, 0.023, 0.020, 15.2525, 0.023, 0.020, 0.031 * 6A$

172814.0 indique que l'heure du Fix est 17h 28min 14,0s, 0.006 et 0.023 indiquent que les écarts-types des erreurs par rapport au demi-grand axe et au demi-petit axe sont de 0,006m et de 0,023m, 0, 020 représente l'erreur sur l'orientation du demi-grand-axe de l'ellipse par rapport au vrai nord et 15.2525, 0.023 et 0.031 représente les écarts-types des erreurs en latitude, longitude et altitude (en m).

Annexe B : Architecture logicielle de la nouvelle version du système

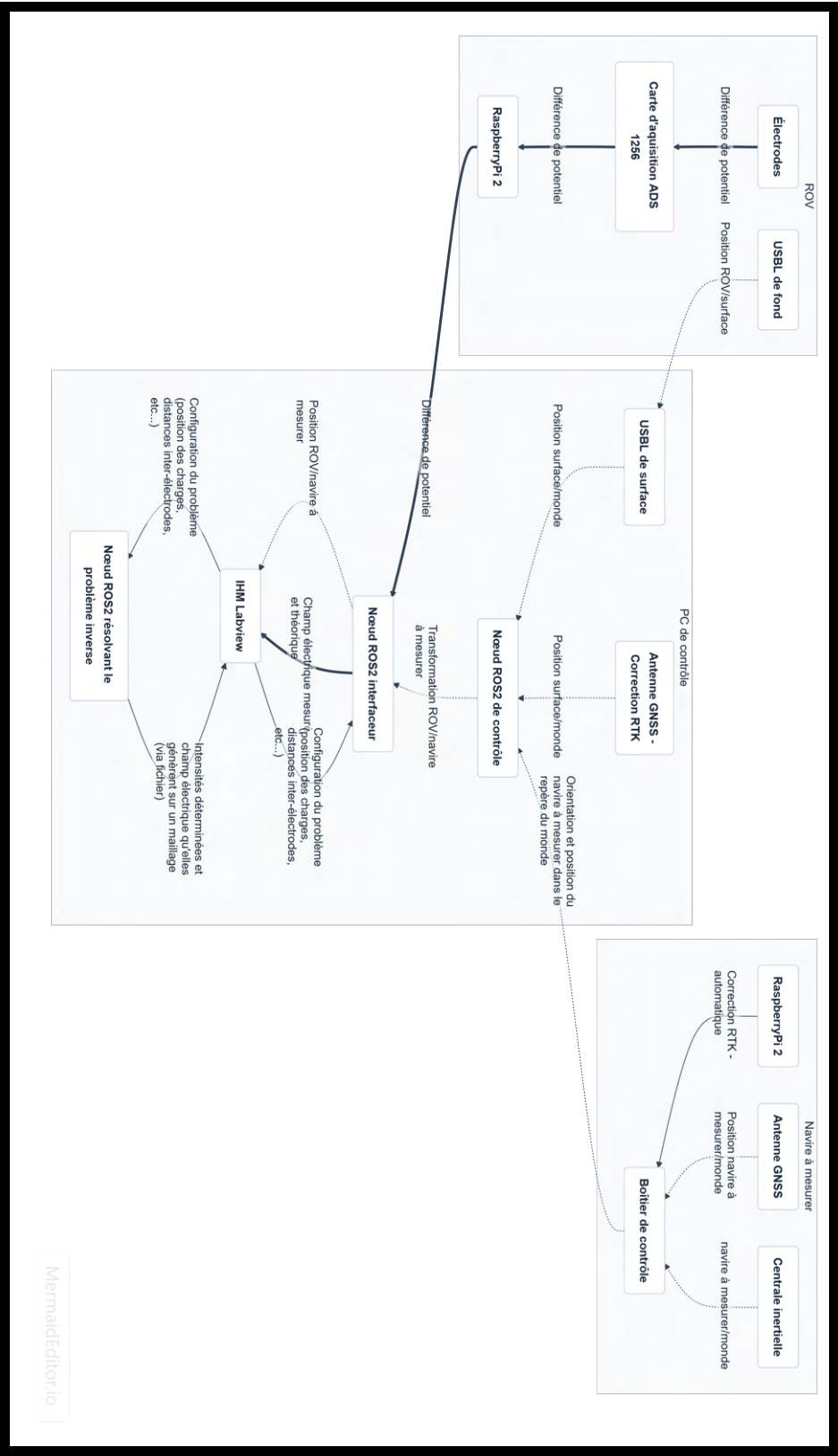


FIGURE 40 – Architecture logicielle du système - configuration totale

Annexe C : Chaîne de positionnement en configuration totale

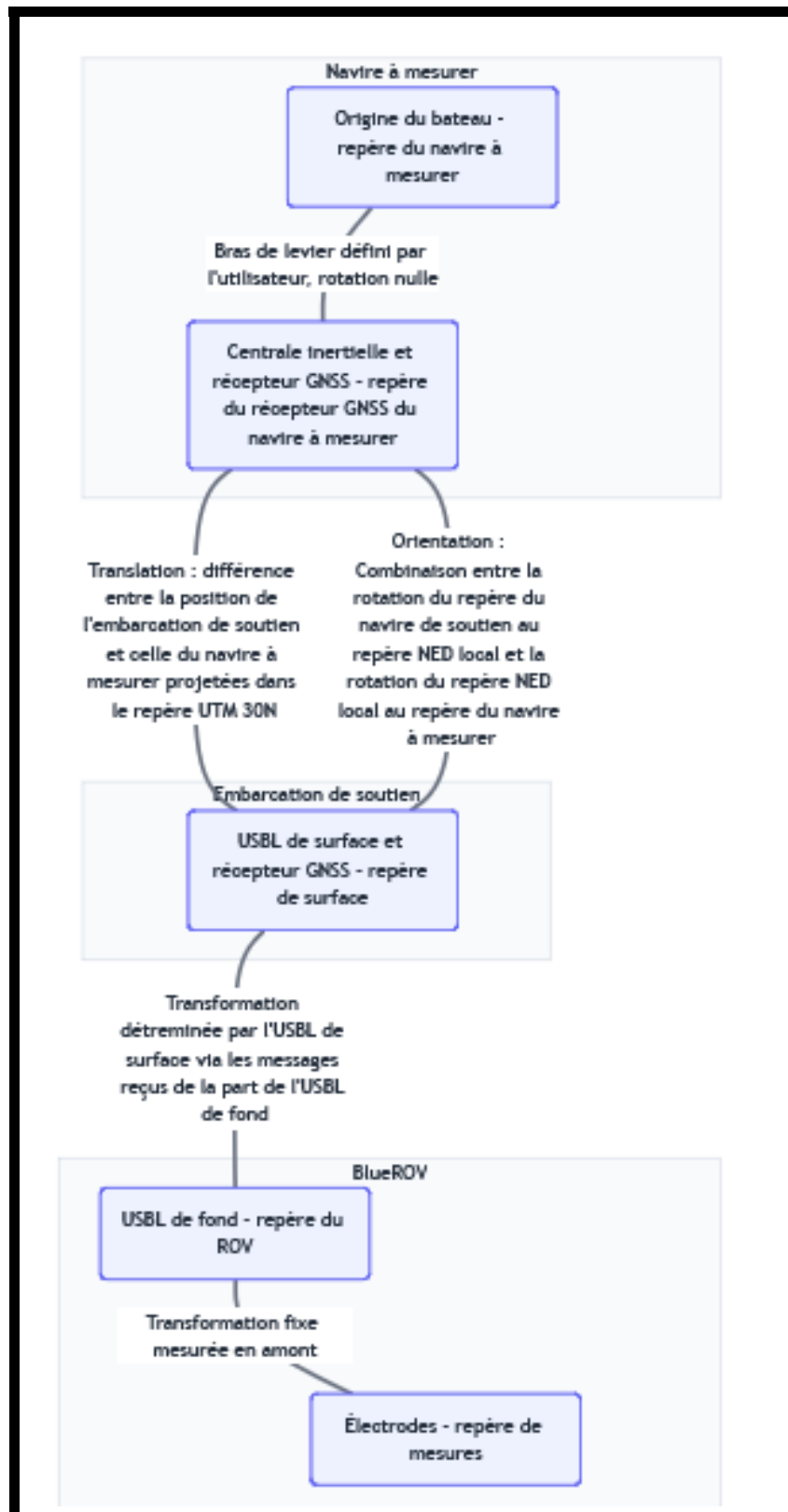


FIGURE 41 – Chaîne de positionnement en configuration totale

Annexe D : Diagramme de Gantt du projet de fin d'études

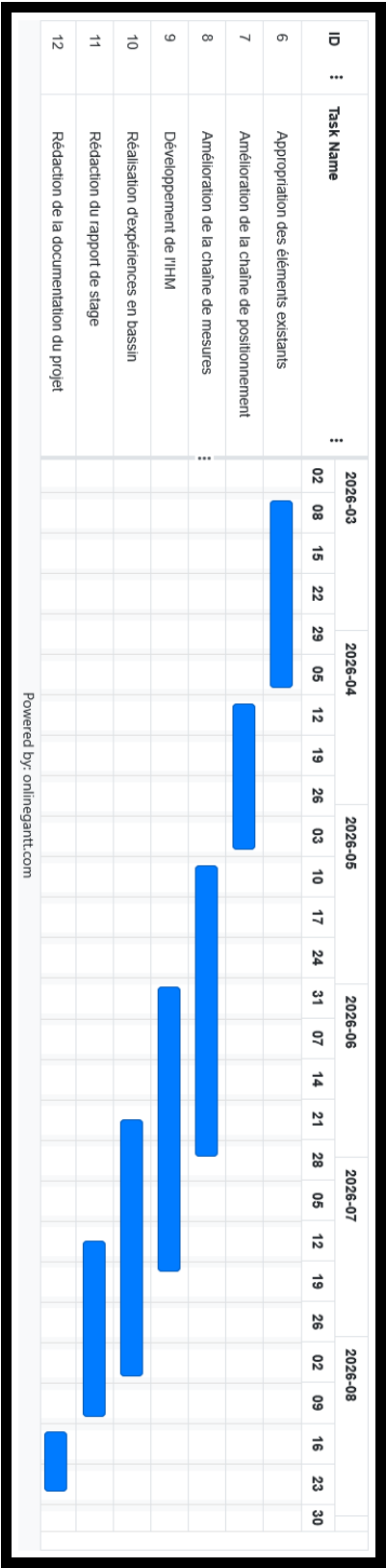


FIGURE 42 – Diagramme de Gantt du projet de fin d'études

Annexe E : Calcul du problème direct pour une configuration à deux interfaces

Considérons que nous faisons toujours nos mesures de champ électrique dans un milieu de conductivité électrique de σ_0 séparée par deux interfaces. Notons σ_1 la conductivité du milieu au-delà de l'interface 1 et σ_2 celle du milieu au-delà de l'interface 2. Une charge d'intensité sortante I est placée en un point C de l'espace de mesure.

L'interface 1 sera modélisée par une charge image placée en $C_{1,1}$, le symétrique de C par rapport à cette même interface. L'interface 2 quant à elle sera modélisée par une charge placée en $C_{2,1}$, le symétrique de C par rapport à cette interface (voir figure ci-dessous).

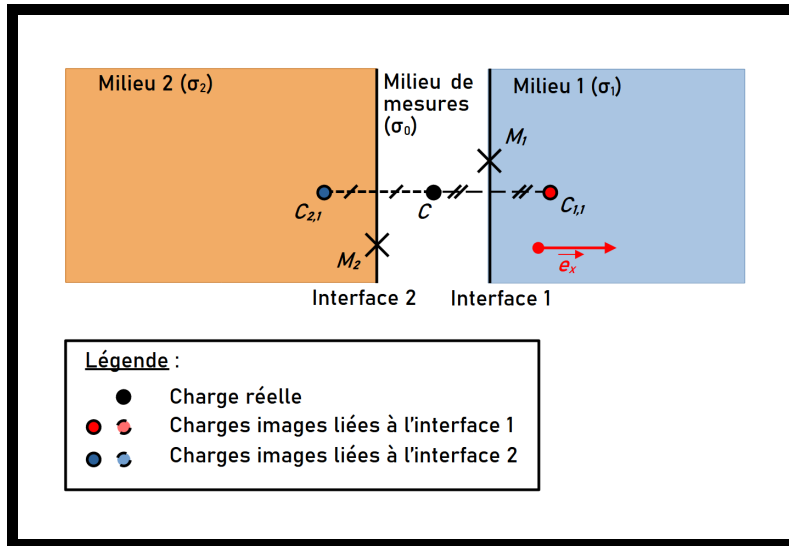


FIGURE 43 – Placement des charges images vis-à-vis de la charge réelle pour une itération de la méthode des charges images

Pour chaque interface, en sommant le champ électrique généré par la charge réelle et sa charge image par rapport à cette interface en tout point de M_i de celle-ci, on obtient en reprenant l'équation (4) :

$$\begin{cases} \vec{E}_{\text{réel}} + \left(\frac{\sigma_0 + \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_1}\right) * \vec{E}_{C_{1,1}} = \vec{0} \\ \vec{E}_{\text{réel}} + \left(\frac{\sigma_0 + \sigma_2}{\sigma_0 - \sigma_2}\right) * \vec{E}_{C_{2,1}} = \vec{0} \end{cases} \quad (14)$$

où $\vec{E}_{C_{1,1}}$ et $\vec{E}_{C_{2,1}}$ sont les champs électriques générés par la charge image $C_{1,1}$ et la charge image $C_{2,1}$ respectivement. Puis, on obtient de la même manière que précédemment :

$$\begin{cases} I_{C_{1,1}} = \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0 + \sigma_1}\right) * I_{\text{réel}} \\ I_{C_{2,1}} = \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_2}{\sigma_0 + \sigma_2}\right) * I_{\text{réel}} \end{cases}$$

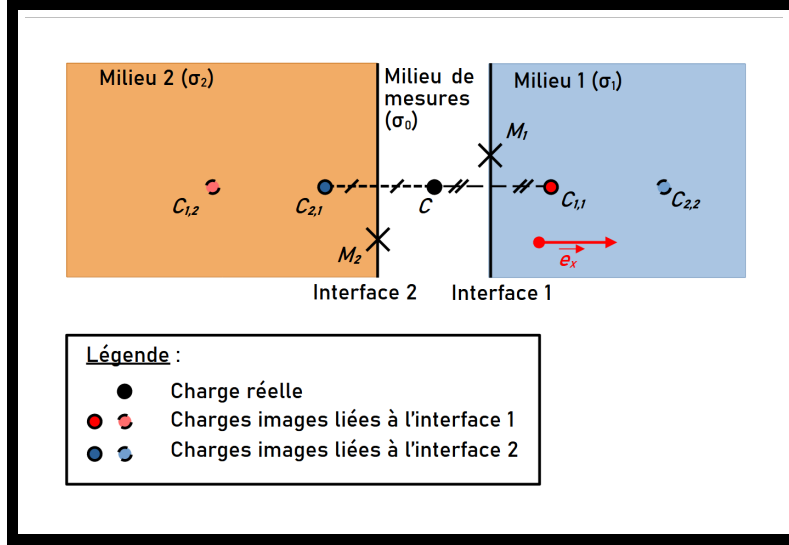


FIGURE 44 – Placement des charges images vis-à-vis de la charge réelle pour deux itération de la méthode des charges images

Cependant, les charges images introduites, en plus de rectifier le champ électrique au niveau de leur interface associée, ont également une influence sur le champ électrique situé sur l'interface qui leur est opposé. Il va donc falloir introduire deux nouvelles charges image $C_{1,2}$ et $C_{2,2}$ afin de rectifier le champ électrique généré par les charges $C_{1,1}$ et $C_{2,1}$ sur leurs interfaces opposées. Ces charges images seront placées symétriquement à la charge à laquelle elle sont associée par rapport à leur interface associée (voir figure ci-dessus). Ainsi, la charge $C_{1,2}$ est placée symétriquement à $C_{1,1}$ par rapport à l'interface 2 tandis que la charge $C_{2,2}$ est placée symétriquement à $C_{2,1}$ par rapport à l'interface 1.

En sommant le champ électrique généré par la charge image $C_{1,1}$ et sa charge image $C_{1,2}$ par rapport à l'interface 2 en tout point M_2 de cette dernière, on obtient en adaptant l'équation (4) :

$$\begin{aligned} \vec{E}_{C1,1} + \left(\frac{\sigma_0 + \sigma_2}{\sigma_0 - \sigma_2} \right) * \vec{E}_{C1,2} &= \vec{0} \\ \Rightarrow \frac{I_{C1,1}}{4\pi\sigma_0 ||\vec{C}_{1,1}M_2||^2} * \vec{e}_{C1,1} &= - \left(\frac{\sigma_0 + \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_1} \right) \frac{I_{C1,2}}{4\pi\sigma_0 ||\vec{C}_{1,2}M_2||^2} * -\vec{e}_{C1,2} \end{aligned}$$

Puisque $C_{1,1}\vec{M}_2 = C_{1,2}\vec{M}_2$, en projetant selon $\vec{e}_x$:

$$\begin{aligned} I_{C1,2} &= \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_2}{\sigma_0 + \sigma_2} \right) * I_{C1,1} \\ \Rightarrow I_{C1,2} &= \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_2}{\sigma_0 + \sigma_2} \right) * \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0 + \sigma_1} \right) * I_{\text{réel}} \end{aligned}$$

De même, en sommant le champ électrique généré par la charge image $C_{2,1}$ et sa charge image $C_{2,2}$ par rapport à l'interface 1 en tout point M_2 de cette dernière, on en déduit qu'il faut que, pour compenser l'influence de la charge image $C_{2,1}$ au niveau de l'interface 1, $I_{C2,2}$ vérifie :

$$I_{C2,2} = \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0 + \sigma_1} \right) * \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_2}{\sigma_0 + \sigma_2} \right) * I_{\text{réel}}$$

Une nouvelle fois, ces charges $C_{1,2}$ et $C_{2,2}$ vont générer un champ électrique sur leur interface opposée. On va donc introduire des charges images $C_{1,3}$ et $C_{2,3}$ pour le compenser, puis des charges images $C_{1,4}$ et $C_{2,4}$ pour compenser le champ généré par les charges $C_{1,3}$ et $C_{2,3}$ sur leur interface opposée, et ainsi de suite (voir figure ci-dessous)... L'intensité sortante de ces charges images est déterminée de la même manière que pour les charges images précédentes. On obtient donc un modèle où le placement des charges images et le calcul de leur intensité sortante se fait par récurrence.

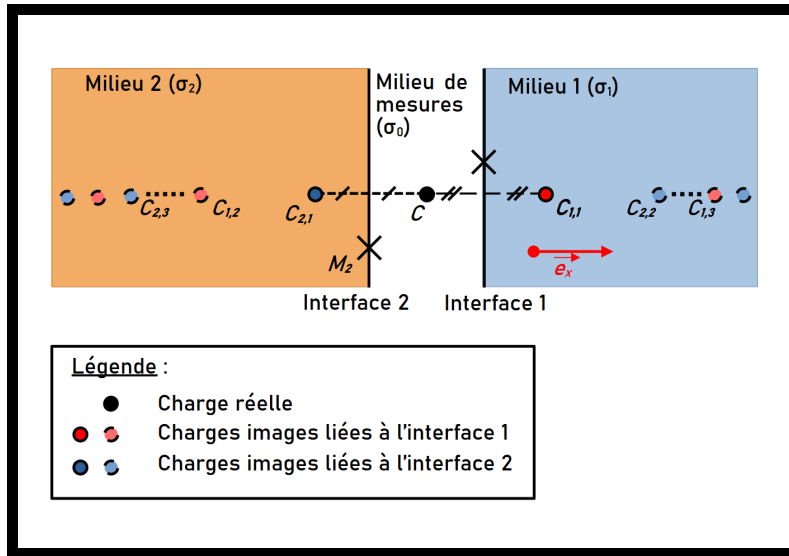


FIGURE 45 – Placement des charges images vis-à-vis de la charge réelle C pour trois et plus itérations de la méthode des charges images

Pour être aussi précis que possible, il faudrait placer un nombre infini de charges images pour compenser l'effet qu'elles ont sur leur interface opposée. Cependant, en considérant l'équation (1), on remarque que le champ électrique généré par une charge en un point décroît au carré de la distance entre cette charge et du point considéré. Les charges images étant placées de plus en plus loin des interfaces, et donc de l'espace de mesure, leur influence sur les points de ce dernier se fait peu à peu négligeable. En pratique, on se limite à cinq itérations du processus de placement des charges images. Le champ électrique généré au point O par N charges situées en $C_i, i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ dans un milieu de conductivité électrique σ_0 limité par deux interfaces et traversées par une intensité sortante I_i vaut, en appliquant le principe de superposition aux N charges réelles et à leurs images à l'ordre 5 :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{E(O)} &= \overrightarrow{E_{\text{réel}}(O)} + \overrightarrow{E_{\text{charges image interface 1}}(O)} + \overrightarrow{E_{\text{charges image interface 2}}(O)} \\ &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_{i,\text{réel}}}{4\pi\sigma ||\overrightarrow{C_i O}||^2} * \overrightarrow{e_{r,i}} + \sum_{j=1}^5 \frac{I_{i,1,j}}{4\pi\sigma ||\overrightarrow{C_{i,1,j} O}||^2} * \overrightarrow{e_{r,i,1,j}} + \sum_{j=1}^5 \frac{I_{i,2,j}}{4\pi\sigma ||\overrightarrow{C_{i,2,j} O}||^2} * \overrightarrow{e_{r,i,2,j}} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Notre modèle a donc été adapté à une configuration d'espace de mesure délimité par deux interfaces parallèles.

Annexe F : Modélisation matricielle du problème inverse

Pour la suite de cette partie, les différents vecteurs $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$ seront décomposés de la sorte :

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} x_x \\ x_y \\ x_z \end{pmatrix}$$

Considérons N charges situées en $C_i, i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ dans un milieu de conductivité électrique σ_0 limité par aucune interface et traversées par une intensité sortante I_i . On suppose que l'on possède M mesures du champ électrique réalisées en $O_j, j \in \llbracket 1, M \rrbracket$. En reprenant l'équation (3), le champ électrique généré par ces charges en $O_j, j \in \llbracket 1, M \rrbracket$ s'écrit :

$$\vec{E}(O_j) = \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{4\pi\sigma_0 \|\vec{C_iO_j}\|^2} * \vec{e}_{r,i}$$

Les M équations correspondant aux M mesures peuvent se mettre sous forme matricielle :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} e_{x,1,1}/4\pi\sigma_0 \|\vec{C_1O_1}\|^2 & \dots & e_{x,N,1}/4\pi\sigma_0 \|\vec{C_NO_1}\|^2 \\ \text{même principe voie Y} & \dots & \text{même principe voie Y} \\ \text{même principe voie Z} & \dots & \text{même principe voie Z} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{x,1,M}/4\pi\sigma_0 \|\vec{C_1O_M}\|^2 & \dots & e_{x,N,M}/4\pi\sigma_0 \|\vec{C_NO_M}\|^2 \\ \text{même principe voie Y} & \dots & \text{même principe voie Y} \\ \text{même principe voie Z} & \dots & \text{même principe voie Z} \end{pmatrix}}_A * \underbrace{\begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix}}_X = \underbrace{\begin{pmatrix} E_x(O_1) \\ E_y(O_1) \\ E_z(O_1) \\ \vdots \\ E_x(O_M) \\ E_y(O_M) \\ E_z(O_M) \end{pmatrix}}_B \quad (16)$$

où

- A représente la matrice modélisant le problème (de taille (M, N))
- X représente le vecteur des paramètres à déterminer (de taille N)
- B représente le vecteur de mesures (de taille M)
- pour toute charge $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$ et toute mesure $j \in \llbracket 1, M \rrbracket$, $e_{x,i,j}$, $e_{y,i,j}$ et $e_{z,i,j}$ sont les composantes du vecteur unitaire entre la charge et le point de mesure du champ électrique.

Dans le cas où l'espace de mesures est délimité par plusieurs interfaces respectant les configurations vues dans la partie IV.1, on ajoute aux composantes de la matrice

A les contributions des charges images. Si l'on suppose que dans la configuration dans laquelle on se trouve, une charge réelle possède F images, alors A vaudra :

$$A = \begin{pmatrix} \frac{e_{x,1,1}}{4\pi\sigma||\vec{C_1O_1}||^2} + \sum_{f=1}^F \frac{K_{1,f}*e_{x,1,1,f}}{4\pi\sigma||\vec{C_{1,f}O_j}||^2} & \dots & \frac{e_{x,N,1}}{4\pi\sigma||\vec{C_NO_1}||^2} + \sum_{f=1}^F \frac{K_{N,f}*e_{x,N,1,f}}{4\pi\sigma||\vec{C_{1,f}O_j}||^2} \\ \text{même principe voie Y} & \dots & \text{même principe voie Y} \\ \text{même principe voie Z} & \dots & \text{même principe voie Z} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{e_{x,1,M}}{4\pi\sigma||\vec{C_1O_1}||^2} + \sum_{f=1}^F \frac{K_{1,f}*e_{x,1,1,f}}{4\pi\sigma||\vec{C_{1,f}O_j}||^2} & \dots & \frac{e_{x,N,M}}{4\pi\sigma||\vec{C_NO_1}||^2} + \sum_{f=1}^F \frac{K_{N,f}*e_{x,N,M,f}}{4\pi\sigma||\vec{C_{1,f}O_j}||^2} \\ \text{même principe voie Y} & \dots & \text{même principe voie Y} \\ \text{même principe voie Z} & \dots & \text{même principe voie Z} \end{pmatrix} \quad (17)$$

où pour toute charge $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$, pour toute mesure $j \in \llbracket 1, M \rrbracket$ et pour toute charge image $f \in \llbracket 1, F \rrbracket$ de la charge réelle i :

- $e_{x,i,j}$, $e_{y,i,j}$ et $e_{z,i,j}$ sont les composantes du vecteur unitaire entre la charge et le point de mesure du champ électrique.
- $e_{x,i,j,f}$, $e_{y,i,j,f}$ et $e_{z,i,j,f}$ sont les composantes du vecteur unitaire entre la charge image et le point de mesure du champ électrique.
- $C_{i,f}$ est le point où se trouve la charge image f associée à la charge i
- O_j est le point où est effectué la mesure j
- $K_{i,f}$ est un coefficient faisant intervenir les différentes conductivités électriques du problème et permettant de relier par récurrence l'intensité sortant de la charge réelle I_i à l'intensité sortante de la charge image $I_{i,f}$

Il est également à noter que la taille de la matrice A reste la même pour toutes les configurations, à savoir (M, N) .

Annexe G : Méthodes de résolution du problème inverse

Résolution du problème inverse par décomposition SVD

En notant $\{u_i, i \in \llbracket 1, m \rrbracket\}$ et $\{v_i, i \in \llbracket 1, n \rrbracket\}$ les colonnes des matrices U et V résultant de la décomposition en valeurs singulières de A , la matrice A s'écrit également :

$$A = \sum_{i=1}^{\min(m,n)} d_i * u_i * v_i^T \quad (18)$$

Le vecteur X_0 minimisant la norme 2 du résidu est $X_0 = A^\dagger B$, où $A^\dagger$ représente la pseudo-inverse de Moore-Penrose de la matrice A [7].

Dans notre cas, ce dernier s'écrit $A^\dagger = V * D^\dagger * U^T$ où $D^\dagger \in \mathcal{M}_{n,m}(\mathbb{R})$ est telle que :

- $\forall i \in \llbracket 1, \min(m, n) \rrbracket, d_i^\dagger = \begin{cases} \frac{1}{d_i} & \text{si } d_i > 0 \\ 0 & \text{si } d_i = 0 \end{cases}$

Le vecteur des intensités sortantes X_0 minimisant la norme 2 du résidu vérifie donc :

$$X_0 = \sum_{i=1}^k \frac{u_i^T * B * v_i}{d_i} \quad (19)$$

en notant k l'indice maximal pour lequel $d_i \neq 0$.

En appliquant cette méthode à notre problème, on peut donc déterminer à partir de la matrice A modélisant le problème et du vecteur de mesures du champ électrique B le vecteur des intensités sortantes des charges X_0 minimisant la norme 2 du résidu $AX - B$.

Résolution du problème inverse par méthode bayésienne

On suppose que les paramètres suivent la loi de probabilité de la variable aléatoire $\mathcal{X}$ et que les mesures suivent la loi de probabilité de la variable aléatoire $\mathcal{B}$. L'objectif est donc de déterminer X_{opt} tel que la densité de probabilité de $\mathcal{X}|\mathcal{B}$ ($\mathcal{X}$ sachant $\mathcal{B}$) soit maximale pour $X = X_{opt}$.

Rappelons tout d'abord la formule de Bayes pour deux événements a et b des lois de probabilités $\mathcal{A}$ et $\mathcal{B}$:

$$\mathbb{P}(\mathcal{A} = a|\mathcal{B} = b) = \frac{\mathbb{P}(\mathcal{B} = b|\mathcal{A} = a) * \mathbb{P}(\mathcal{A} = a)}{\mathbb{P}(\mathcal{B} = b)} \quad (20)$$

Cette formule appliquée à notre problème, nous obtenons que :

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\mathcal{X} = X|\mathcal{B} = b) &= \frac{\mathbb{P}(\mathcal{B} = b|\mathcal{X} = X) * \mathbb{P}(\mathcal{X} = X)}{\mathbb{P}(\mathcal{B} = b)} \\ \implies \mathbb{P}(\mathcal{X} = X|\mathcal{B} = b) &\propto \mathbb{P}(\mathcal{B} = b|\mathcal{X} = X_0) * \mathbb{P}(\mathcal{X} = X) \end{aligned} \quad (21)$$

Avant de modéliser les lois de probabilité $\mathcal{X}$ et $\mathcal{X}|\mathcal{B}$, notons que le vecteur des mesures réalisées b , échantillon de la loi de probabilité B , se décompose ainsi :

$$b = b_{réel} + b_{offset} + b_{bruit} \quad (22)$$

où :

- $b_{réel}$ représente la mesure exacte,
- b_{offset} représente l'offset sur la mesure (en pratique, il est supprimé par l'interface LabVIEW)
- b_{bruit} représente le bruit aléatoire sur la mesure

Pour la suite, nous réaliserons les hypothèses suivantes :

- l'offset sur les mesures ne varie pas de manière importante, aussi est-il négligé une fois qu'il est retranché aux mesures par l'interface LabVIEW.

- $\mathcal{X} \sim \mathcal{N}(X_0, S_0)$, autrement dit que $\mathcal{X}$ suit une loi normale de vecteur moyenne $X_0 \in \mathbb{R}_N$ et de matrice de covariance $S_0 \in \mathcal{M}_N(\mathbb{R})$ (avec N le nombre de charges, soit le nombre de paramètres à déterminer).
- $\mathcal{X}|\mathcal{B} \sim \mathcal{N}(AX, S_m)$ où $S_m \in \mathcal{M}_M(\mathbb{R})$ (M étant le nombre de mesures). Cette hypothèse modélise le fait que l'écart des mesures B au modèle AX est représenté par une variance et une covariance de S_m .

Une fois ces hypothèses posées, il nous reste maintenant à initialiser les trois paramètres X_0 , S_0 et S_m .

Le paramètre X_0 représente l'estimation a priori des paramètres. Si l'on sait à peu près quelles vont être la valeur de ces paramètres (parce que l'on dispose d'un modèle de la signature électrique du navire, par exemple), alors on peut les initialiser avec ces valeurs. Si l'on ne connaît pas leur valeur a priori, et ce n'est pas rédibitoire, on initialise X_0 à $\vec{0}$.

Le paramètre S_0 représente la covariance des paramètres. Si l'on a un modèle de la signature du navire, on peut initialiser S_0 avec les valeurs du modèle. Sinon, on fait une estimation large de la valeur absolue maximale des courants qui vont circuler dans la mer I_{max} et on initialise S_0 de la sorte :

$$S_0 = \text{diag}(I_{max}^2, \dots, I_{max}^2) \quad (23)$$

S_0 est donc initialisée comme une matrice diagonale dont les coefficients diagonaux sont égaux à la variance maximale, I_{max}^2 , qui est susceptible d'être celle des paramètres. Il est à noter qu'il est préférable d'initialiser les variances avec des valeurs trop importantes par rapport aux variances réelles qu'avec des valeurs trop faibles devant les valeurs réelles.

Le paramètre S_m , quant à lui, correspond à la matrice de covariance des mesures sachant la configuration. Les mesures étant indépendantes les unes des autres, cette matrice sera initialisée comme une matrice diagonale. Les mesures réalisées par chaque voie auront une variance différente. Cette dernière sera déterminée en lisant $A_{cac,i}$, l'amplitude crête-à-crête maximale du bruit de mesures du champ électrique sur la voie correspondante en gardant le robot immobile. En considérant que pour une loi normale, 99,73% des valeurs sont comprises dans un intervalle de 6 écarts-types centrés sur la moyenne, la variance V_i des mesures sur chaque voies sera alors déterminée par la formule suivante :

$$V_i = \left(\frac{A_{cac,i}}{6} \right)^2 \quad (24)$$

La matrice diagonale $S_m \in \mathcal{M}_M(\mathbb{R})$ s'initialise donc ainsi :

$$\forall i \in \llbracket 1, M \rrbracket, S_{m,i,i} = \begin{cases} V_x & \text{si } i \equiv 0[3] \\ V_y & \text{si } i \equiv 1[3] \\ V_z & \text{si } i \equiv 2[3] \end{cases} \quad (25)$$

Une fois ces coefficients initialisés, on va pouvoir mettre à jour notre a priori sur le vecteur des paramètres X_0 et sur sa matrice de covariance à l'aide du vecteur des

mesures B et de la matrice A modélisant le problème. En reprenant les équations utilisées dans la thèse de M. Derenty-Camenen [4], on détermine X_{MAP} (maximum a posteriori) et S_{POST} , la nouvelle moyenne et la nouvelle matrice de covariance de la loi de probabilité $\mathcal{X}$.

$$\begin{cases} X_{MAP} = X_0 + S_0 A^\top (A S_0 A^\top + S_m)^{-1} (b - A X_0) \\ S_{POST} = (A^\top S_m^{-1} A + S_0^{-1})^{-1} \end{cases} \quad (26)$$

$\mathcal{X}$ suivant une loi normale, l'échantillon pour laquelle la densité de probabilité de cette dernière est la plus importante est sa moyenne. La nouvelle estimation des paramètres X_{OPT} est donc X_{MAP} .

En pratique, les données arrivent petit-à-petit. On applique donc l'algorithme suivant à intervalles réguliers :

1. *Construction du vecteur des mesures B et des matrices A et S_m à l'aide des mesures reçues.*
2. *Initialisation des coefficients. Si il ne s'agit pas de la première itération de l'algorithme, $X_0 := X_{MAP}$ et $S_0 := S_{POST}$. Sinon, on initialise X_0 et S_0 comme mentionné plus haut.*
3. *Résolution du problème inverse : on détermine le vecteur des paramètres à posteriori X_{MAP} ainsi que sa matrice de covariance S_{POST}*
4. *Suppression des lignes et des colonnes du vecteur de mesures B , de la matrice A modélisant le problème ainsi que de la matrice de covariance des mesures S_m (les mesures qu'elles représentent sont déjà intervenues dans l'estimation du vecteur des paramètres).*
5. *Test de la convergence de la détermination des paramètres (non effectué au cours du stage. On se contente donc d'appliquer l'algorithme encore et encore.)*
6. *On reprend l'étape (1) avec les nouvelles mesures.*

Pour chaque itération de l'algorithme, on récupère l'estimation des paramètres réalisée à l'itération précédente et on lui applique la résolution du problème inverse, la corrigeant ainsi à l'aide des nouvelles mesures reçues.

Toutefois, il est bon de noter que plusieurs cas d'usage peuvent rendre la résolution du problème inverse par méthode bayésienne moins pertinente. En reprenant une nouvelle fois les équations utilisées par M. Derenty-Camenen dans sa thèse [4], on détermine que X_{MAP} peut également s'écrire :

$$X_{MAP} = (A^\top S_m^{-1} A + S_0^{-1})^{-1} (A^\top S_m^{-1} B + S_0^{-1} X_0) \quad (27)$$

Si on est en situation de sous-confiance au niveau de notre a-priori, alors la norme de la covariance sur les mesures S_m est très faible devant la norme de la covariance sur les paramètres, S_0 , et en reprenant l'équation ci-dessus :

$$X_{MAP} \approx A^{-1} S_m A^{-\top} A^\top S_m^{-1} B = A^{-1} B \quad (28)$$

Attention ! La matrice A peut ne pas être inversible. L'équation ci-dessus a seulement pour but d'illustrer ce qui se passe lorsque l'on ne connaît pas assez notre vecteur des paramètres X_0 . Dans ce cas, on retombe sur la solution du problème donnée par la méthode des moindres carrés, et ce, seulement pour les mesures de champ électriques prises en compte dans les matrices A , B et S_m . L'information contenue dans les mesures précédentes n'est pas transmise d'itération en itérations et l'a priori initial sur la valeur des paramètres n'est pas pris en compte.

Ce cas montre l'importance de l'initialisation de S_0 . Bien qu'il faille s'assurer que la variance initiale de chaque composante de S_0 soit supérieure à la variance réelle, celles-ci ne doivent pas être exagérément grandes, sous peine de voir l'algorithme avoir besoin d'un plus grand nombre d'itérations pour converger.

Si on est en situation de sur-confiance au niveau de l'estimation de nos paramètres, alors la norme de la covariance sur ces derniers, S_0 , est très faible devant la norme de la covariance sur les mesures S_m . En reprenant l'équation (27), on en déduit que dans ce cas X_{MAP} est approximé par :

$$X_{MAP} \approx S_0 S_0^{-1} X_0 = X_0 \quad (29)$$

L'estimation des paramètres X_0 corrigée a posteriori X_{MAP} est la même que l'estimation des paramètres a priori. L'a priori sur les paramètres n'est donc pas mis à jour par les mesures effectuées.

Bibliographie

- [1] Ministère des armées et des anciens COMBATTANTS. *DGA Techniques Navales*. URL : <https://www.defense.gouv.fr/dga/dga-techniques-navales> (visité le 25/04/2026).
- [2] Ministère des armées et des anciens COMBATTANTS. *Les missions de la DGA*. URL : <https://www.defense.gouv.fr/dga/nous-connaitre/missions-dga> (visité le 29/03/2026).
- [3] Measurement COMPUTING. *MCC 128 - 16 bits Voltage Measurement DAQ HAT for RaspberryPi*. URL : <https://docs.rs-online.com/eb69/A700000008186541.pdf> (visité le 10/07/2026).
- [4] Gauthier DERENTY-CAMENEN. *Contribution à la modélisation de sources équivalentes magnétostatiques multipolaires et identification en champ proche par inférence bayésienne, pour des objets de forme quelconque*. URL : <https://theses.hal.science/tel-05362146v1/document> (visité le 24/07/2026).
- [5] Éditions ELLIPSES. *Champ électrostatique*. URL : https://www.editions-ellipses.fr/PDF/9782340000285_extrait.pdf (visité le 17/07/2026).
- [6] Maël GODARD. *Développement d'un robot sous-marin pour évaluer la signature électrique sous-marine d'un navire*. URL : https://webperso.ensta.fr/jaulin/rapport_pfe_godard.pdf (visité le 17/07/2026).
- [7] Matthias HOSTEIN. *Autour de la décomposition en valeurs singulières*. URL : https://perso.eleves.ens-rennes.fr/people/matthias.hostein/Fichiers_site/SVD_et_moindres_carres.pdf (visité le 22/07/2026).
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. *ADS126x 32-Bit, Precision, 38-kSPS, Analog-to-Digital Converter (ADC) with Programmable Gain Amplifier (PGA) and Voltage Reference*. URL : <https://docs.rs-online.com/c5d3/A700000006801687.pdf> (visité le 15/07/2026).
- [9] P.J. LAWRENSEN K.J. BINNS. *Analysis and Computation of electric and magnetic field problems*.
- [10] TARMACVIEW. *WGS84 (Système géodésique mondial 1984)*. URL : <https://www.tarmacview.com/fr/glossary/wgs84/> (visité le 03/07/2026).