



HAL
open science

Communication et positionnement simultanés pour les drones sous-marins autonomes

Raphaël Garin

► **To cite this version:**

Raphaël Garin. Communication et positionnement simultanés pour les drones sous-marins autonomes. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2023. Français. NNT : 2023BRES0097 . tel-04584884

HAL Id: tel-04584884

<https://theses.hal.science/tel-04584884>

Submitted on 23 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

ÉCOLE DOCTORALE N° 644

Mathématiques et Sciences et Technologies

de l'Information et de la Communication en Bretagne Océane

Spécialité : *Signal, Image, Vision, Son*

Par

Raphaël GARIN

Communication et positionnement simultanés pour les drones sous-marins autonomes

Thèse présentée et soutenue à Brest, le 15 Décembre 2023

Unité de recherche : L@BISEN Yncréa Ouest / équipe SEACom

Rapporteurs avant soutenance :

Audrey GIREMUS Maître de Conférence HDR, Université de Bordeaux, IMS Bordeaux
Stéphane MERIC Professeur, INSA, IETR

Composition du Jury :

Président :	Luc JAULIN	Professeur, Université de Bretagne Occidentale, ENSTA, Lab-STICC
Examineurs :	Pierre-Jean BOUVET	Enseignant chercheur HDR, Directeur de thèse, L@BISEN Ouest
	Audrey GIREMUS	Maître de Conférence HDR, Université de Bordeaux, IMS Bordeaux
	Stéphane MERIC	Professeur, INSA, IETR
Dir. de thèse :	Pierre-Jean BOUVET	Enseignant chercheur HDR, Directeur de thèse, L@BISEN Ouest

Invité(s) :

Beatrice TOMASI Chercheuse, Encadrante, NORCE
Philippe FORJONEL Enseignant Chercheur, Encadrant, L@BISEN Ouest

Remerciements

Une thèse n'est pas le seul fruit de son doctorant. C'est pourquoi je tiens à remercier toutes les personnes impliquées de près ou de loin, qui ont permis la réalisation de cette étape de ma vie.

Je souhaite remercier en premier lieu les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail de thèse. Merci monsieur Luc Jaulin qui m'a fait l'honneur de présider le jury. Merci à mes rapporteurs madame Audrey Giremus et monsieur Stéphane Meric pour le temps que vous avez consacré à mon travail. Je n'oublie pas également mon comité de suivi composé de Alain Loussert et Sébastien Pennec. Merci à vous.

Je remercie chaleureusement l'intégralité de mon encadrement composé de mon directeur de thèse monsieur Pierre-Jean Bouvet et de mes encadrants monsieur Philippe Forjonel, madame Beatrice Tomasi ainsi que monsieur Charles Vanwynsberghe. Votre soutien n'a pas été seulement que technique, mais aussi et surtout émotionnel lors de mes passages à vide. Votre pédagogie et amour de la recherche scientifique m'a poussé à aller au bout des choses malgré les difficultés qu'amène la réalisation d'une thèse pluridisciplinaire et expérimentale. Merci pour votre temps consacré à mon travail. Vos conseils et votre compréhension m'ont été précieux.

Merci également au personnel de l'ISEN Brest, que j'ai fini par très bien connaître puisque j'y ai réalisé non seulement ma thèse de doctorat mais aussi mes 5 ans d'études d'ingénieur. La liste est donc longue, je pense notamment à l'équipe SEACOM bien sûr (André, Léo-Paul, Thomas et les autres), les roboticiens (Henriques et Titouan!), mes anciens professeurs (Yves, Joël, Jean-Yves, Alain, Chantal, Thibault, ...) et bien sûr Ayman Al Falou sans qui cette thèse n'aurait pas pu exister. Sincères remerciements à vous tous, travailler à l'ISEN a été un plaisir grâce à vous.

Je tiens à remercier mes proches pour votre soutien sans faille malgré la distance qui nous sépare. Mes parents bien sûr, votre fierté de mes travaux me touche et m'a fait ne rien lâcher. Mon frère, avec qui je partage la même passion pour l'automobile et nos conversations de longueurs inavouables m'ont permis de m'évader lorsque j'en avais besoin, ta présence quotidienne m'a bien plus aidé que tu ne le penses certainement. Merci également à mes sœurs, vos passages à Brest m'ont marqué.

Enfin merci à mes autres proches : famille et amis, éloignés ou non. Pour finir merci à mon chat, que j'ai adopté pendant la première année de thèse, véritable producteur de câlins surtout pendant la rédaction. Très joueur, on peut dire que c'était un gros chat-pitre!

Table des matières

1	Introduction générale	7
1.1	Contexte de la thèse	7
1.2	Présentation de la thèse	7
1.3	Véhicules sous-marins	9
1.4	Communication sans-fil en milieu sous-marin	12
1.5	Problématique de la navigation d'un AUV	16
1.6	Travaux en relation	18
1.7	Plan du manuscrit	19
2	Les systèmes de positionnement sous-marins	21
2.1	Introduction	21
2.2	Systèmes extéroceptifs	22
2.3	Systèmes proprioceptifs	29
2.4	Estimateurs et navigation	34
2.5	Conclusion	42
3	Communication Acoustique Sous-Marin (ASM) et positionnement simultanés pour la navigation	43
3.1	Introduction	43
3.2	Modem de communication ASM	44
3.3	Définition de la mission d'un Autonomous Underwater Vehicle (AUV)	53
3.4	Architecture générale du système	54
3.5	Modèle dynamique pour le positionnement et communications simultanés en balise unique	58
3.6	Conclusion	64
4	Simulation d'une mission et analyse de la performance	65
4.1	Introduction	65
4.2	Scénarios de test et définition de la simulation	66
4.3	Résultats des simulations	76
4.4	Discussion et limitation de la simulation	92

5	Résultats expérimentaux	99
5.1	Introduction	99
5.2	Essais préliminaires en bassin de taille réduite	100
5.3	Expérimentation au lac de Ty Colo, Saint-Renan, France	106
5.4	Expérimentation mobile en rade de Brest	110
5.5	Essais mobiles en condition de plus grande profondeur à Vilanova i la Geltrú, Espagne	122
5.6	Conclusion	126
6	Conclusion générale et perspectives	129
6.1	Synthèse	129
6.2	Production scientifique	131
6.3	Perspectives	132
A	Performance et calibration de l'angle de cap de la centrale inertielle	135
A.1	Protocole expérimental	135
A.2	Calibration et filtrage	137
A.3	Résultats	139
	Table des figures	141
	Liste des tableaux	145
	Glossary	147
	Acronyms	149
	Bibliographie	151

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Contexte de la thèse

Cette thèse a été réalisée dans le laboratoire L@bISEN Yncréa Ouest au sein de l'équipe de recherche [Systèmes Embarqués, Acoustique et Communications \(SEA-Com\)](#). Elle a été financée par l'ISEN Brest Yncréa Ouest sur fonds propres et fait suite à une étude préliminaire menée au sein de l'équipe [4]. Les expérimentations ont été réalisées d'une part au moyen de la plateforme LMAIR-IROMI et d'autre part au moyen du projet TNA CAN financé au travers du projet européen MINKE.

1.2 Présentation de la thèse

La Terre étant recouverte d'environ 70,8% d'océans, les enjeux sous-marins sont cruciaux et en constante évolution avec les technologies modernes. On estime que l'homme n'a exploré que 5% des fonds marins. Les drones sous-marins offrent la possibilité d'applications très diverses, militaires, scientifiques ou civiles tout en réduisant considérablement le risque humain sous l'eau. On parle, en anglais, des 4D : *Dull* (ennuyeux et/ou répétitif), *Dirty* (exploration en milieu difficile par exemple), *Dangerous* (dangereux tel que la détection de mine) et *Dear* (Gain de temps, réduction des délais et gain financier) [65]. En conséquence, cette thématique connaît un essor important parmi la communauté scientifique. Elle implique de multiples domaines de recherche tels que par exemple l'acoustique, la bathymétrie, la cartographie, la robotique et le positionnement. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux drones sous-marins autonomes abrégés [AUVs](#) en anglais. Les [AUVs](#) ont l'avantage de pouvoir réaliser une mission autonome sans nécessité de lien physique par câble avec l'opérateur mais tout en gardant bien souvent un lien de communication sans fil avec ce dernier. La zone de mission

peut être grande, de l'ordre de la dizaine de kilomètres carrés, et il est possible de réaliser une flotte d'**AUV** pour des applications par exemple de *data-muling*, d'exploration ou de surveillance. Toutefois, le milieu sous-marin n'est pas uniquement une zone à risques pour l'homme, mais possède également une physique particulière : les ondes radios utilisées classiquement dans le milieu aérien sont fortement atténuées ce qui empêche les communications radio-fréquences haut débit conventionnelles ou la réception de données de géo-positionnement par satellites type **Global Navigation Satellite System (GNSS)**, entre autres. A l'inverse, les ondes acoustiques se propagent dans le milieu sous-marin à plusieurs dizaines voir centaines de kilomètres et sont donc principalement utilisées pour communiquer avec les **AUVs** et également pour les localiser. Toutefois, les ondes acoustiques ont pour propriété de se propager beaucoup plus lentement que les ondes radios et sont affectées par de nombreux effets délétères pour le traitement du signal en réception tels que l'effet Doppler, les trajets multiples, les sources de bruits à la fois naturelles et anthropogéniques, la limitation en fréquence des bandes de transmission ... Ces phénomènes impactent directement les **AUVs** dans le cadre de leur positionnement et de leurs communications avec l'opérateur et donc leur navigation.

Nous verrons dans l'état de l'art que pour palier à cela, les technologies utilisées dans l'industrie offrent la possibilité aux **AUV** de se positionner dans l'espace de manière précise pendant une longue durée sans communication **ASM**. L'objectif de la thèse est de développer un système qui permet à l'**AUV** de communiquer et de naviguer simultanément tout en gardant une architecture technique peu coûteuse et rapide à mettre en place. Le procédé décrit au long de cette thèse consiste à utiliser une forme d'onde de communication **ASM** et de transformer de manière opportuniste la synchronisation de trame et l'estimation du décalage Doppler, obligatoire pour décoder une communication acoustique, en mesure de positionnement. La finalité est, par exemple, des applications d'exploration, de surveillance ou de flotte mettant en jeu des drones de taille réduite.

Ce premier chapitre commence par une présentation des divers types de véhicules utilisés en milieu sous-marin afin de mettre en évidence l'importance des **AUVs**. Ensuite, nous examinons les différents modes de communication utilisés sous l'eau, en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients. Cette analyse permettra au lecteur de comprendre les situations dans lesquelles un mode de communication est privilégié par rapport à un autre, ainsi que les différentes formes de communication acoustique sous-marine. Enfin, nous concluons ce chapitre en exposant le plan du manuscrit et en présentant les contributions spécifiques réalisées tout au long de cette thèse.

1.3 Véhicules sous-marins

Depuis que la navigation marine existe, les fonds marins sont un sujet de recherche permanent : pêche, risque humain, exploration des profondeurs, richesses des ressources et biodiversité sous-marine en sont des exemples. Pour explorer ce vaste écosystème très profond, obscur et pauvre en oxygène, l'homme seul, même équipé, ne peut s'affranchir de la mission. La solution est alors d'utiliser un véhicule sous-marin. On dénombre deux types de véhicules sous-marins : les véhicules habités et les véhicules non-habités.

Les véhicules sous-marins habités

Les sous-marins, populairement appelés, sont une catégorie de véhicules sous-marins habités mais ils sont complétés par les submersibles. Les sous-marins sont des navires de grande taille manoeuvrés par un équipage, et généralement conçus pour des longues missions pouvant aller jusqu'à plusieurs mois. Ils sont alors utilisés principalement dans le domaine militaire pour des missions de déminage, d'espionnage, ou encore pour des mission d'attaque et de dissuasion. On peut citer comme exemple le [Sous Marin Nucléaire Lanceur d'Engin \(SNLE\)](#) mais également le sous-marin de sauvetage, également utilisé à de rares occasions dans le civil.

La seconde catégorie de véhicules habités, les submersibles, sont de taille bien plus réduite. Ils sont conçus pour l'exploration, la recherche scientifique ou l'intervention en petite ou grande profondeur. Historiquement, le premier véhicule sous-marin était un submersible appelé **Turtle**, mis en opération en 1776. Dans une période plus proche de nous, on peut citer le submersible **Alvin**, conçu en 1964 et médiatisé pour avoir participé à la première expédition visant à explorer l'épave du Titanic, pendant l'été 1986.

Les véhicules sous-marins non habités

Les missions sous-marines non habitées peuvent être effectuées soit par des [Remotely Operated Vehicles \(ROV\)](#), véhicules téléopérés en français soit par des [AUVs](#), véhicules sous-marins autonomes en français. Ces robots ont l'avantage d'éviter tout risque humain sous la mer. Les deux intègrent une charge utile et un ensemble d'outils spécifiques à la mission, tels que des pinces ou un sonar de détection. On peut citer également des véhicules sous-marins non habités moins courant tels que les hybrides AUV-ROV appelés HROV, les *gliders* ou les *crawlers* [21].

Les véhicules téléopérés

Pour la première catégorie de drone sous-marin, la liaison entre l'opérateur et le ROV se fait par un câble ombilical. Sa longueur dépend de la zone de la mission. Dans les cas les plus extrêmes, ce câble peut faire 500 m. Pour intervenir au delà de ce seuil en eaux profondes, il existe deux possibilités : soit le drone est déployé depuis un véhicule habité, soit l'engin est déployé depuis un système intermédiaire lui-même téléopéré permettant d'enrouler/dérouler l'ombilical du ROV. Ce système est appelé **Tether Management System (TMS)**, ayant la forme d'une cage (cf figure 1.1). Le câble du TMS est plus gros et adapté aux eaux profondes, de l'ordre de 2000 m. Avec ou sans TMS, la navigation et la télémétrie se font par câble et les ROV sont équipés de nombreux instruments d'observations (caméras, sonar, etc.) et de mesures (magnétomètre, pression, etc.). Les ROV présentent de nombreux avantages, tels que leur prix, leur maniabilité et la télémétrie en direct. Leur charge utile (*payload*, en anglais), peut intégrer des outils de maniement comme des pinces ou des bras. Les ROV sous-marins peuvent être utilisés pour diffuser en continu des vidéos de coraux ou d'épaves pour l'inspection, l'actionnement à distance ou les mesures en temps réel. Enfin, on les utilise dans le domaine militaire pour l'identification de mines.

Les ROV grand public les moins chers commencent à 600 \$ avec le modèle Dory de Chasing Innovation. Il permet au grand public d'accéder aux drones sous-marin à faible profondeur, avec un câble de 15m relié à une bouée WIFI. Pour des utilisations universitaire, le BlueROV2 de BlueRobotics photographié sur la gauche de la figure 1.1 est très prisé. Son prix en 2023 est de l'ordre de 4000\$.

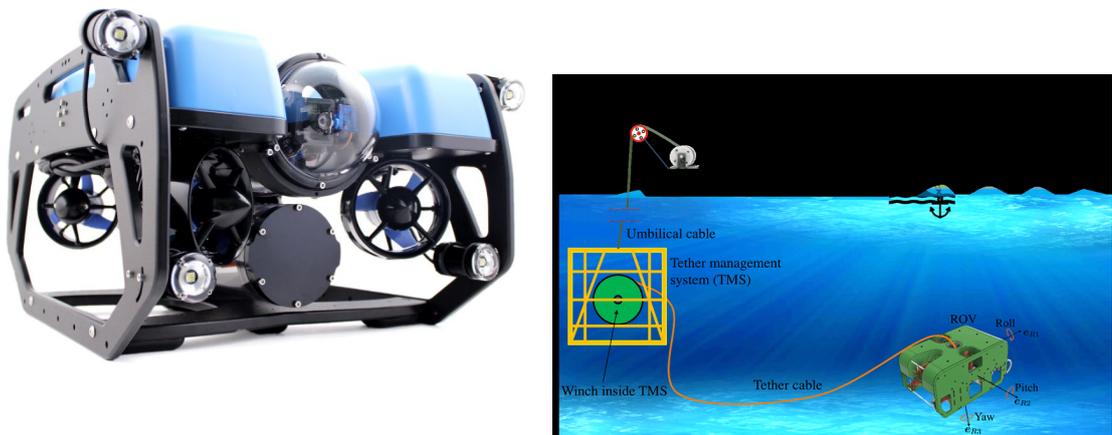


FIGURE 1.1 – BlueROV2 ©BlueRobotics (gauche) et Système TMS (droite)

Les véhicules autonomes

Dans la deuxième catégorie de véhicules sous-marins non habités, les [AUVs](#), le câble est absent. Les missions envisagées à l'aide de ce type de drone sont alors bien plus étendues. Par exemple le REMUS 6000, développé par la Woods Hole Oceanographic Institution, permet des missions pouvant durer jusqu'à 24 heures pour une distance de 125 kilomètres. Lorsqu'un besoin de télémétrie ou de retour d'observation s'impose, le câble est donc remplacé par des communications sans fil sous-marines. La seule contrainte restante étant la portée maximale de celle-ci. Comparé à un [ROV](#), un [AUV](#) peut donc aller plus profondément, dans un rayon plus large avec une trajectoire donnée sans guidage manuel. Les applications courantes sont la surveillance sous-marine, l'inspection, l'exploration ou la cartographie dans les domaines civil et militaire. Cependant, les [AUVs](#) sont encore confrontés à de nombreux défis tels que la navigation autonome, l'autarcie énergétique, le coût de fabrication ou encore la communication avec d'autres éléments. Le canal sous-marin absorbant les ondes [RadioFréquence \(RF\)](#) après quelques mètres (voir section 1.4), par voie de conséquence, en milieu sous-marin, les systèmes de localisation [GNSS](#) ne sont pas disponibles et les communications sans-fils sont complexes. Ainsi pour un [AUV](#), connaître en temps réel sa position pour son propre guidage est un sujet de recherche en tant que tel. La figure 1.2 montre à gauche un [AUV](#), le Remus 100, dans sa forme hydrodynamique la plus typique : la forme d'un cigare. La partie droite représente l'architecture classique d'un [AUV](#). La partie arrière est consacrée à la propulsion et aux blocs électroniques principaux. La partie avant comporte les batteries chargées de maintenir l'autonomie du robot. Enfin, la partie centrale, celle qui va nous intéresser dans le cadre de la thèse, comporte une charge utile, divers instruments de mesures et capteurs, mais surtout les instruments cruciaux à la navigation de l'[AUV](#). Dans la figure 1.2, sont soulignés les éléments utiles pour le positionnement : un [Doppler Velocity Log \(DVL\)](#), une [Inertial Navigation System \(INS\)](#) à gyroscope à fibre optique et un système acoustique [Long BaseLine \(LBL\)](#). Ces éléments sont détaillés dans la partie état de l'art du positionnement sous-marin du chapitre 2. Financièrement, un drone sous-marin autonome a un coût largement supérieur aux [ROVs](#) du fait de ces systèmes de navigation autonome. Les premiers drones accessibles sont souvent nommé μ -[AUV](#) et sont équipés seulement d'une [INS](#) pour le positionnement avec des prix commençant à 20 k\$.

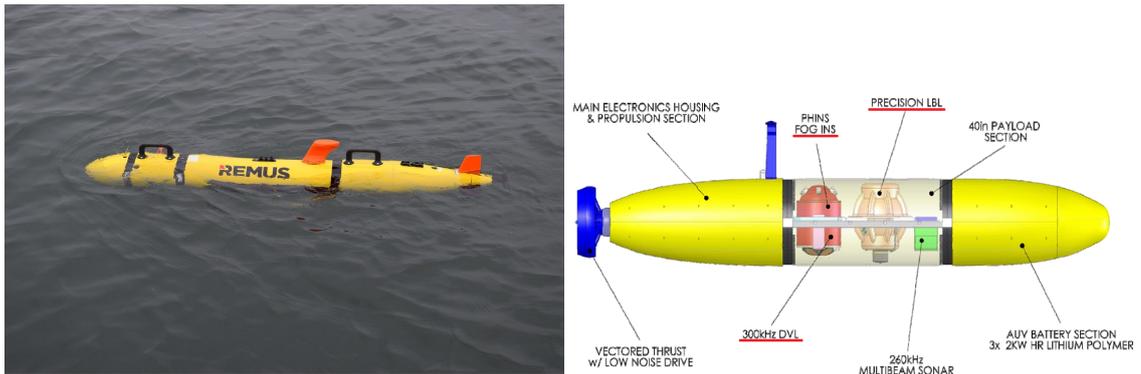


FIGURE 1.2 – AUV Remus©100 et plan général d'un AUV

1.4 Communication sans-fil en milieu sous-marin

Il existe 3 principaux liens de transmission de données à distance sans-fil sous la mer : le lien radio, le lien optique et le lien acoustique. Le sujet des communications filaires n'est pas traité ici car difficile à adapter pour l'utilisation d'un AUV. Les communications par câble ont de nombreux désavantages compromettant leurs utilisations dans le cadre d'une mission utilisant un AUV : coût de l'installation, coût d'entretien, poids, et problèmes vis à vis de la mobilité. Cependant, il existe des sujets de recherche qui combinent les câbles de fibre optique avec de la localisation et/ou communication non filaire [40].

Communication radio

Ce type de communication, connu également sous le nom de radiocommunication, met en jeu des ondes électromagnétiques. Ces ondes forment une propagation d'énergie qui se manifeste sous la forme d'un champ électrique combiné à un champ magnétique. L'information est transmise en modulant les propriétés de l'onde, telles que son amplitude, sa fréquence, sa phase ou la largeur d'impulsion. Dans le milieu sous-marin, les ondes électromagnétiques sont rapidement absorbées en raison de la conductivité élevée de l'eau de mer, ce qui entraîne une massive dissipation d'énergie. En effet, les ondes supérieures à 1 MHz ne peuvent pénétrer que de quelques dizaines de centimètres dans l'eau de mer. Par conséquent, les communications radio sont utilisées sur de courtes distances, allant de quelques millimètres à quelques mètres, avec des débits compris entre 1 Mbit/s et 100 bit/s [12, 16, 63, 84]. La communication sur de longues distances est possible, mais elle nécessite des fréquences extrêmement basses, des antennes de grande taille et une puissance de transmission élevée [70].

Communication optique

Pour obtenir du très haut débit sous la mer, les communications optiques sous marine sont un atout de choix. Elles utilisent une technologie à base de [Laser Diode \(LD\)](#) ou alors de diodes électroluminescentes ou [Light-Emitting Diode \(LED\)](#) en anglais. Le choix entre ces deux systèmes est dépendant de l'analyse de l'efficacité spectrale et de l'efficacité énergétique pour minimiser l'énergie consommée par bit dans différentes conditions de l'eau [43, 48, 57]. Les communications optiques sont très dépendantes de plusieurs facteurs : la turbidité de l'eau (naturelle ou pollution), l'absorption de l'onde lumineuse, les interférences lumineuses (soleil, lumière artificielle, ...) et la dispersion (chromatique et modale) [42, 48]. Même si la portée théorique maximale est de l'ordre de 100 mètres, en pratique cette valeur est très dépendante de l'atténuation de la lumière sous l'eau. La puissance du signal optique reçu est exprimée par la loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 e^{-c(\lambda)d} \quad (1.1)$$

où d représente la distance entre l'émetteur et le récepteur optique, $c(\lambda)$ le coefficient d'absorption de l'onde et I_0 la puissance émise. Les modems optiques à base de [LED](#) sont employés pour des communication à débit modéré (de l'ordre de 150 Mbit/s) à courte distance (<5 m). Les modems [LD](#), plus coûteux, sont utilisés quant à eux pour des débits plus importants, de l'ordre du Gbit/s, et une distance supérieure mais requièrent une attention particulière à l'alignement des faisceaux.

Dans le domaine de la robotique sous-marine, les applications peuvent être diverses. La navigation optique est exploitée soit par un réseau de capteurs optiques soit par caméra. Plusieurs algorithmes proposés [40] se basent sur des "points d'intérêt" permettant de localiser l'appareil pour atteindre une cible ou suivre une route définie [39]. Pour répondre au besoin grandissant des systèmes de *docking* (amarrage) d'[AUV](#), les communications optiques peuvent être déployées dans le cadre de restitution de données haut débit une fois l'[AUV](#) déposé sur la plateforme avant de repartir en mission.

Cependant, les deux plus grands défauts des communications optiques sous-marines étant la portée et la nécessité pour les transmetteurs d'être alignés dans une ligne de vue, cette architecture est assez peu utilisée dans le cadre de la navigation / communication mobile d'un robot sous-marin. Les communications optiques sont également sensibles à la lumière du jour en petits fonds et à la turbidité de l'eau. En revanche, l'un des intérêts de cette technologie (notamment dans le domaine militaire) est sa discrétion, une communication optique étant très peu détectable.

Communication acoustique

Paul Langevin dans la décennie 1910 est souvent associé aux premiers travaux sur les communications [ASM](#), en dehors de l'étude du son dans l'eau. La deuxième guerre mondiale a définitivement lancé la popularisation de ce domaine de recherche pour des besoins militaires. Grâce aux bonnes propriétés du son dans l'eau, le canal [ASM](#) permet des portées de communication bien plus intéressantes que les précédents liens présentés. La bande spectrale est toutefois limitée en fonction de la fréquence et de la distance de transmission souhaitée. Les fréquences de transmission théoriques se situent dans la bande 10 Hz à 1 MHz. Le protocole *JANUS*, décrit en figure 1.3 est le premier standard de communications [ASM](#) permettant l'interopérabilité entre les différents systèmes marins et sous-marins [72].

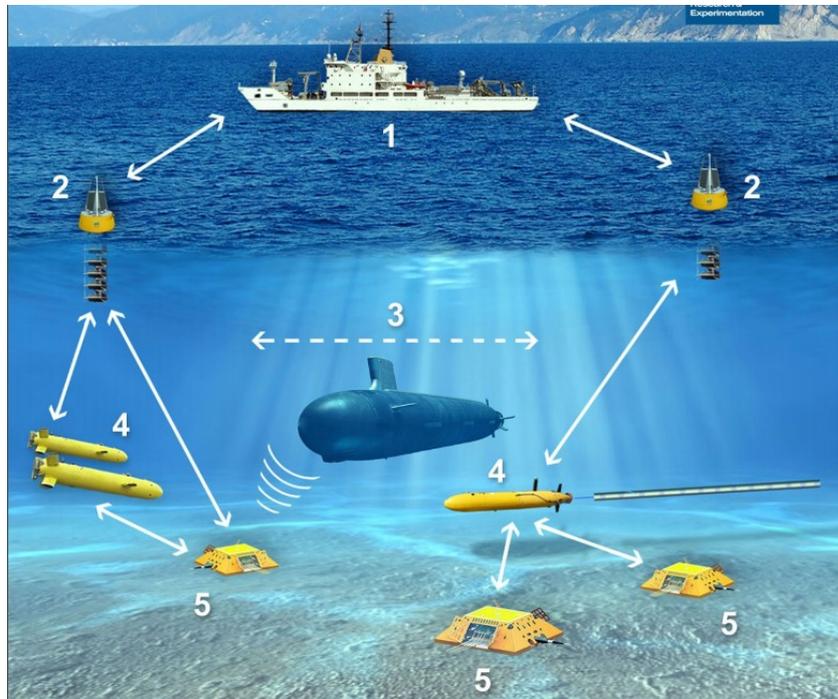


FIGURE 1.3 – Le protocole JANUS, ©Centre for Maritime Research and Experimentation, OTAN

La vitesse de propagation du son en milieu sous-marin, notée c_w , est relativement faible (environ 1500 m/s) par rapport aux ondes [RF](#) ou optiques dans l'air (similaire à la vitesse de la lumière, soit environ 3×10^8 m/s). De plus, la célérité du son dans l'eau n'est pas fixe. L'équation de Medwin (1.2) modélise cette vitesse en fonction de la température T en degré Celsius, la salinité S en partie par 1000 et

la profondeur D en mètres [67].

$$c_w = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016D \quad (1.2)$$

Cette faible vitesse de propagation entraîne des effets négatifs de temps de trajet (appelé temps de vol [Time-Of-Flight \(TOF\)](#) en anglais) et de décalage fréquentiel par effet Doppler. Comme autres challenges liés au canal [ASM](#), on dénote les trajets multiples d'un signal émis (considérables en petit fond ou *shallow-water* en anglais lorsque la profondeur est inférieure à 100 m), mais également les phénomènes de réfraction, dispersion, diffraction et bruits d'origine naturelle et artificielle qui impactent sévèrement les liens de communication [81]. Les produits commerciaux actuels, qu'on appelle modem [ASM](#) ne dépassent pas des débits de l'ordre de 50 kbps·km[31, 79], soit 50 kbps à 1km, 25 kbps à 2 km, Il est possible d'augmenter la portée aux portes du millier de kilomètre mais avec des débits théoriques extrêmement faibles et un système coûteux. On peut citer des fabricants tels que EvoLogics, KongsBerg, LinkQuest ou Sercel [79].

En conclusion, le canal [ASM](#) est certes le meilleur des différents canaux de communication sans-fil sous-marin mais il reste difficile de communiquer dans ce canal en comparaison avec les transmissions radio en milieu aérien.

Synthèse

La Table 1.1 et la figure 1.4 présentent une synthèse des caractéristiques des différents moyens de communication sans fils utilisés en milieu sous-marin. Pour des communications à très courte distance, telles que la communication sans contact, une liaison radio est typiquement utilisée. Par exemple, un [AUV](#) peut se rapprocher d'une station de base pour transmettre ses données à haut débit. La liaison optique offre également la possibilité de réaliser des communications à très haut débit sur de courtes distances, principalement en eaux profondes où la turbidité et la lumière ambiante sont réduites. Par exemple, un [AUV](#) peut collecter ou restituer des données à partir d'une plateforme située en fond marin en se positionnant à quelques mètres de celle-ci. Enfin, les communications acoustiques sous-marine offrent un rayon d'action largement supérieur, sans problème d'alignement mais au prix de débits plus faibles, une latence de communication importante du fait de la vitesse des ondes sonores dans l'eau et un grand nombre de phénomène néfastes pour la communication tels que les trajets multiples, la sélectivité temporelle et le bruit ambiant.

Lien	Distance typique	Exemple de débit
Radio	[0, 10] m	1 Mbit/s (≈ 1 m), 100 bit/s (200 m)
Optique	[0, 200] m	100 Mbit/s (10 m), 10 Mbit/s (100 m)
Acoustique	[1, 10^6] m	100 kbit/s (100 m), 1 kbit/s ([50, 200] km)

TABLE 1.1 – Caractéristiques des différents moyens de communications sans fil en milieu sous-marin [31].

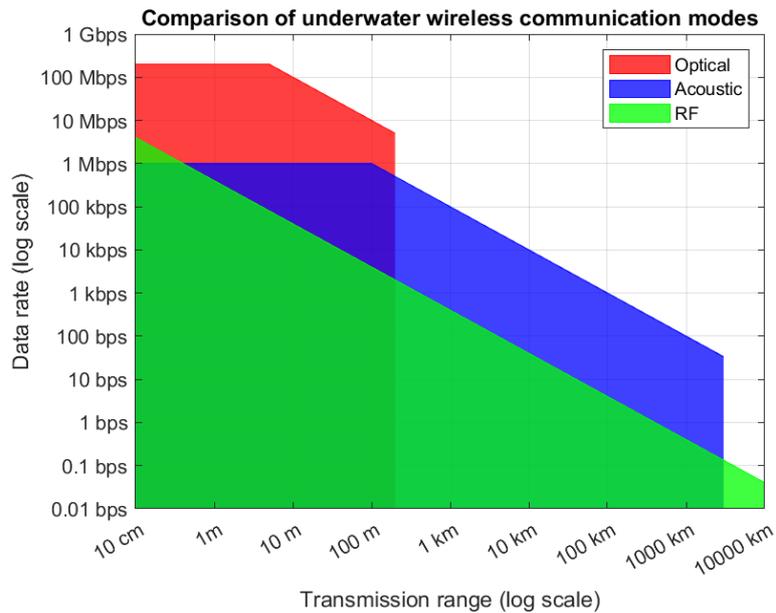


FIGURE 1.4 – Débits empiriques en fonction de la distance (échelle logarithmique) pour les différents moyens de communication sans fil en milieu sous-marin à partir des données de [31]

1.5 Problématique de la navigation d'un AUV

Le sujet de la thèse porte sur la thématique de la navigation d'[AUV](#). Nous avons vu dans les sections précédentes les problématiques liées aux communications sans-fil sous-marines ainsi que les différents véhicules sous-marins. Pour rappel, le système de positionnement [Global Positioning System \(GPS\)](#) est absent dans le milieu sous-marin en raison de l'atténuation des ondes [RF](#) dans celui-ci. En conséquence, la navigation autonome d'un [AUV](#) est un sujet complexe. Contrairement à l'autonomie terrestre ou aérienne, une navigation erronée ou une panne peut entraîner la perte définitive du véhicule.

Dans le domaine de la robotique sous-marine, les termes "navigation" et "positionnement" sont deux concepts distincts mais inter-connectés. Voici leurs définitions et leurs différences :

- Navigation : la navigation sous-marine fait référence à la capacité d'un [AUV](#) à planifier et à suivre un trajet spécifique tout en se déplaçant dans un environnement aquatique. La navigation implique généralement l'utilisation de capteurs, d'algorithmes et de systèmes de contrôle pour permettre au drone de prendre des décisions sur sa trajectoire, d'éviter les obstacles, de suivre un itinéraire prédéterminé, de maintenir un cap ou de revenir à un point de départ. La navigation sous-marine peut impliquer des techniques telles que la localisation, la navigation à l'estime (estimation de la position en fonction des mouvements du robot et la position précédente, aussi appelé *dead reckoning* en anglais), l'estimation de la vitesse, la cartographie de l'environnement et la planification de trajectoire. L'objectif de la navigation est de permettre au robot de se déplacer de manière autonome et précise dans son environnement.
- Positionnement : le positionnement sous-marin fait référence à la détermination précise de la position d'un drone sous-marin dans l'espace tridimensionnel de l'environnement sous-marin. Le positionnement permet de connaître les coordonnées géographiques (latitude, longitude, profondeur) ou les coordonnées relatives (par rapport à un point de référence) du drone sous-marin à un instant donné. Le positionnement sous-marin peut être réalisé à l'aide de différentes techniques, notamment l'utilisation de systèmes de navigation par satellite (comme le GPS) lorsque le robot est à la surface, de balises acoustiques, de capteurs d'inertie, de sonars, de caméras stéréoscopiques, etc. L'objectif du positionnement est de fournir une information précise sur la position du robot, ce qui peut être essentiel pour la réalisation de tâches spécifiques, telles que la collecte de données scientifiques (par exemple la bathymétrie), l'inspection d'infrastructures sous-marines ou la manipulation d'objets.

En résumé, la navigation sous-marine concerne le déplacement autonome du robot sous-marin dans l'environnement, tandis que le positionnement sous-marin concerne la détermination précise de sa position à un instant donné. La navigation permet au robot de se déplacer d'un endroit à un autre, tandis que le positionnement fournit des informations sur sa position précise dans l'espace. Ces deux concepts sont essentiels pour le fonctionnement efficace et précis des [AUVs](#). Ils sont inter-connectés car la navigation utilise généralement l'information de positionnement.

Nous aborderons dans le chapitre suivant l'état de l'art de ces concepts. Les recherches et les systèmes industriels sous-marins actuellement sur le marché per-

mettent une très bonne précision de positionnement tout en gardant un biais contenu dans le temps. Les éléments décrits en figure 1.2 présentent un condensé de ces instruments à la pointe de la technologie. Ceux-ci offrent, aux AUV équipés de ces systèmes, la possibilité d’une navigation juste sur plusieurs dizaines d’heures.

Néanmoins, ces systèmes de positionnement et de navigation sont généralement dissociés des systèmes de communication présentés plus tôt. De plus, ils sont énergivores et encombrants ce qui limite l’autonomie finale ainsi que le design du drone ou sa charge utile. Enfin, le principal désavantage de ces systèmes existants est l’aspect financier. En plus de leurs coûts élevés, ils demandent un temps de calibration et d’architecture physique important. Cela limite grandement l’utilisation des AUVs (et notamment les μ -AUV) pour la formation d’essaims ou de meutes et la recherche scientifique sous-marine en général.

Les recherches menées dans le cadre de cette thèse ont pour objectifs de répondre à ces problématiques. Pour décoder une communication ASM entre un véhicule sous-marin et une plateforme, il est nécessaire d’estimer des paramètres du canal de propagation tels que le temps de vol (ou TOF) et l’effet Doppler afin de les compenser. Si le temps de vol renseigne sur la distance entre l’AUV et la plateforme, l’effet Doppler est une image de la vitesse relative du véhicule par rapport à la plateforme dans la direction de la communication. L’idée est donc de combiner simultanément communication et positionnement de façon à naviguer en s’affranchissant de capteurs coûteux et encombrants tels qu’un DVL et/ou INS à fibre optique. Nous verrons dans le chapitre 2 qu’il existe sur le marché industriel un système permettant simultanément de communiquer et positionner le drone appelé Ultra-Short BaseLine (USBL). En revanche, l’USBL intègre un modem acoustique à 4 hydrophones sans estimation de Doppler mais à base de triangulation permettant également d’estimer l’angle d’arrivée de l’onde acoustique. Dans cette thèse, nous utiliserons une forme d’onde ASM qui permet d’estimer facilement et dynamiquement cet effet Doppler dans un système fonctionnant avec un seul hydrophone à la réception.

1.6 Travaux en relation

La genèse des travaux de la thèse est un article publié dans le cadre de la conférence OCEANS’19 à Marseille [4]. Dans cet article, une simulation met en place une unique balise acoustique émettant régulièrement une communication ASM à l’AUV, celui-ci estimant l’effet Doppler pour se positionner. Un filtre Bayésien, appelé filtre de Kalman, permettant d’obtenir une estimation de la position grâce à un modèle et des mesures, est utilisé pour cela. Après comparaison avec l’état de

l'art, les résultats montrent une amélioration de la précision de positionnement.

Dans [66], le sujet de thèse traite du positionnement des AUVs utilisant uniquement une seule balise acoustique et sans Doppler (DVL ou autre). Cette technique est appelée également en anglais **Range-Only Single Beacon (ROSB)**. Une comparaison est effectuée lorsque la balise est statique ou dynamique et une étude avancée est portée sur les filtres estimateurs tels que le filtre de Kalman, le filtre particulaire, le filtre **Maximum A Posteriori (MAP)**, etc.

Dans [24], est décrit un modèle très complet pour son filtre de Kalman avec notamment le courant marin, l'effet Doppler, le **TOF** et une **INS** mais sans système **DVL** énergivore et coûteux. Pour évaluer les performances de leur algorithme, une étude sur la complexité et les bornes de Cramer Rào est détaillée. Les résultats proviennent de simulations et d'essais en mer. Plusieurs sources acoustiques distancées de plusieurs dizaines voir centaines de mètres sont utilisées, permettant une triangulation optimale mais nécessitant une architecture acoustique conséquente.

L'article de journal [89] est un excellent point de départ sur le sujet du positionnement sous-marin à base d'une unique source acoustique. Le sujet crucial de la synchronisation des horloges entre l'AUV et la balise acoustique est traité. Le focus est porté sur les communications **ASM** unidirectionnelles (**One Way Travel Time (OWTT)**) pour réduire le délai lié à la faible vitesse du son dans l'eau. Lorsque les horloges sont synchronisées et que l'AUV connaît l'horodatage (*timestamp* en anglais) de départ de la communication, il est possible d'estimer la distance drone-balise. Nous verrons dans ce manuscrit la méthode sans synchronisation, nécessitant un aller-retour de la communication (**Two Way Travel Time (TWTT)**).

Enfin, une thèse sur le concept de **LBL** virtuel a été proposé en 2007 [60]. Cette technique et la méthode **sparse-LBL** [78] (ou *synthetic LBL* [61]) se rapprochent. En **LBL**, on utilise au moins 3 sources acoustiques à distance de façon à réaliser une triangulation pour estimer la position de l'AUV. Pour se passer de cette architecture conséquente, ces systèmes utilisent une seule source acoustique mais se servent d'une bonne centrale inertielle pour réaliser une navigation à l'estime. A chaque réception acoustique, le biais qu'entraîne la navigation à l'estime au court du temps est corrigé par les mesures de distances.

1.7 Plan du manuscrit

Ce manuscrit se compose de 6 chapitres. Chacun d'eux commence par une introduction présentant le contexte et se termine par une conclusion, ou ouverture

sur les chapitres suivants.

Le chapitre 2 est une revue de l'état de l'art des systèmes de positionnement sous-marins. Il décrit chaque système ou capteur utilisé dans le domaine, que ce soit dans le milieu de la recherche scientifique, industriel ou militaire.

Les contributions de la thèse commencent dans le chapitre 3, où sont présentés l'architecture du système développé dans le cadre de ce manuscrit, les communications ASM utilisées ainsi que le modèle robotique qui sera utilisé, en trois dimensions puis en deux dimensions. La méthode d'estimation et de compensation du décalage fréquentiel Doppler y est enfin introduite.

Les résultats de simulations sont présentés dans le chapitre 4. En utilisant le modèle 2D, on développe la simulation sous Matlab. Sept scénarios de tests sont définis pour pouvoir analyser la performance du système de positionnement. Après une description des résultats associés à chaque scénario, une analyse puis une discussion des résultats sont réalisées en comparaison avec l'état de l'art. Enfin, les limitations de telles simulations sont détaillées.

Les résultats expérimentaux sont regroupés dans le chapitre 5. Ils se composent de 3 grandes expérimentations : une expérimentation en bassin de 6 m³ restreint et contrôlé, une expérimentation en "petits fonds" en mer dans la rade de Brest puis enfin une expérimentation "moyens fonds" en mer dans la baie de Vilanova i la Geltrú. Nous proposons des comparaisons avec les simulations et avec l'état de l'art.

Finalement, le manuscrit se termine par une conclusion générale dans le chapitre 6. Les éléments présentés dans le manuscrit sont tout d'abord synthétisés. Ensuite, nous présentons les différentes contributions scientifiques apportées au long du manuscrit. Enfin, nous détaillons les différentes perspectives de recherche que laissent entrevoir les travaux décrits dans le manuscrit de thèse.

Chapitre 2

Les systèmes de positionnement sous-marins

Sommaire

2.1	Introduction	21
2.2	Systèmes extéroceptifs	22
	Méthode de positionnement	22
	Systèmes de positionnement acoustique	25
	Localisation non acoustique	28
2.3	Systèmes proprioceptifs	29
	Centrales inertielles	29
	Doppler Velocity Log - DVL	31
	Autres capteurs	33
2.4	Estimateurs et navigation	34
	Estimateurs	34
	Navigation des AUVs	40
2.5	Conclusion	42

2.1 Introduction

Ce chapitre détaille l'état de l'art des systèmes de positionnement sous-marins. Dans un premier temps, nous décrivons les systèmes extéroceptifs. Ils sont composés de technologies acoustiques en très grande majorité mais on compte aussi une minorité de technologies optiques pour des utilisations spécifiques. Ensuite, la section suivante aborde l'autre grande catégorie cruciale pour le positionnement sous-marin à savoir les systèmes proprioceptifs composés d'inertiel, de capteurs

liés à la position du drone dans l'espace et de [DVL](#). Enfin, pour faire le lien entre positionnement et navigation, une dernière section aborde les estimateurs et les systèmes de navigation. Ils sont la clé, peu importe les capteurs embarqués, car ils définissent la qualité finale de la navigation de l'[AUV](#).

2.2 Systèmes extéroceptifs

Avant de rentrer dans les détails des différents systèmes extéroceptifs, il est important de définir certaines méthodes de positionnement acoustique. En effet, au delà de leur architecture technique, ces systèmes utilisent des algorithmes de calcul pour extraire des mesures (par exemple de distance ou de différence de temps).

Méthode de positionnement

Positionnement par [Time Difference Of Arrival \(TDOA\)](#) : l'estimation de position par mesure de [TDOA](#) repose sur le principe de différence de temps d'arrivée d'un même signal pour des récepteurs (au moins 2) éloignés d'une distance connue. Les applications de cette méthode ne se situent pas uniquement dans le domaine de l'acoustique sous-marine : on retrouve également ce principe dans les télécommunications [5]. Grâce à trois mesures de [TDOA](#), il est possible de calculer la position de l'émetteur (cf figure 2.1).

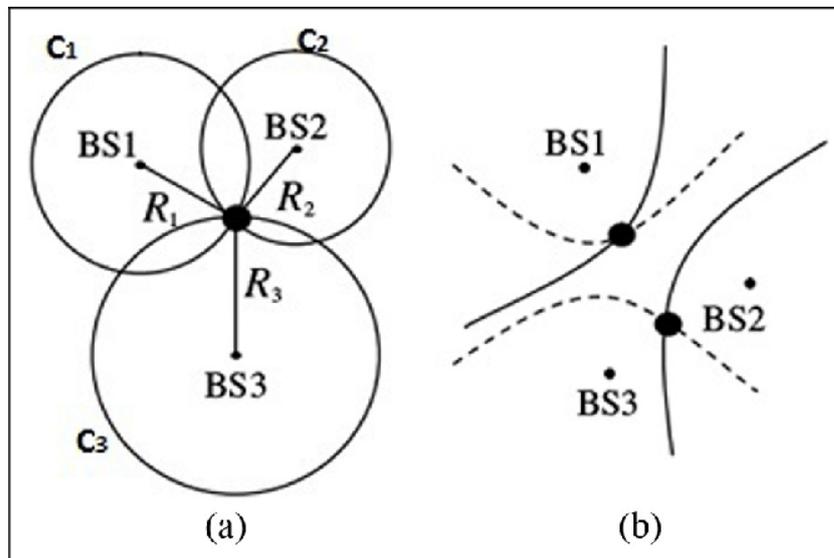


FIGURE 2.1 – Principe du [TDOA](#) [26]

Positionnement par Time Of Arrival (TOA)/TOF : le terme **TOA** désigne le temps d'arrivée du signal. Si l'on connaît le temps de départ de celui-ci, on en déduit le temps de trajet du signal, appelé également temps de vol ou **TOF** en anglais. La distance d entre l'émetteur et le récepteur est obtenue simplement à partir de la célérité du son dans l'eau c_w et le **TOF** dénommé t_{TOF}

$$d = c_w \cdot t_{\text{TOF}} \quad (2.1)$$

Cependant ce calcul n'est possible uniquement que si l'on connaît le temps de départ du signal acoustique et donc que les horloges à l'émission et à la réception sont synchronisées. Cette condition n'est jamais atteinte dans des situations réalistes, sans horloge atomique. Pour contrer cela, on utilise des transpondeurs. Concrètement l'**AUV** envoie un signal à un transpondeur acoustique qui lui répond en un temps déterministe connu précisément par l'**AUV**. En connaissant le temps de départ puis le temps d'arrivée final et en ajoutant la durée fixe de traitement au niveau du transpondeur, il est alors possible de connaître le temps de vol et donc la distance **AUV**-transpondeur comme le montre la figure 2.2. L'estimation de t_{TOF} avec un seul trajet de signal est appelé **OWTT**, tandis que le mode transpondeur est appelé **TWTT**.

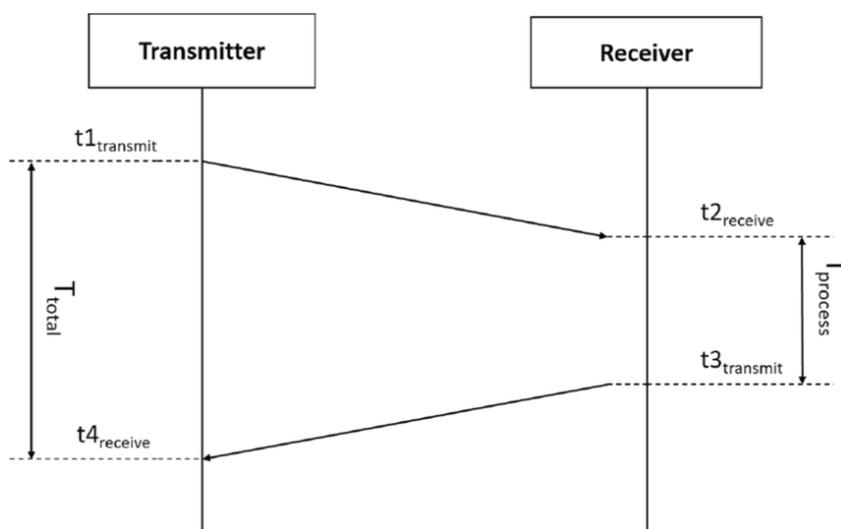


FIGURE 2.2 – Principe du calcul du temps de vol au moyen d'un transpondeur

Lorsque l'**AUV** a connaissance d'au moins 3 distances par rapport à 3 balises à des positions de référence différentes, il est possible d'estimer la position de l'**AUV**.

Positionnement par Angle Of Arrival (AOA) : la dernière solution couramment utilisée dans l'état de l'art du positionnement sous-marin est la méthode

par les angles d'arrivées des signaux ou [AOA](#). Cette méthode requiert au moins trois récepteurs sur l'objet qui a besoin d'estimer cet angle. De la même manière que pour le [TDOA](#), lorsqu'au moins trois émetteurs sont utilisés, il est possible de faire une triangulation et donc d'estimer la position de l'objet. Pour la suite de ce manuscrit, on appellera l'angle d'arrivée d'un signal acoustique le *bearing angle*.

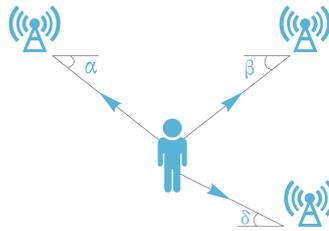


FIGURE 2.3 – Principe du positionnement par angle d'arrivée ou [AOA](#)

Vitesse du son dans l'eau : Les méthodes de positionnement que l'on a vu précédemment reposent sur une connaissance précise des temps et des positions des sources acoustiques. La dernière inconnue à déterminer est la célérité du son. Comme évoqué précédemment, cette vitesse est autour de 1500 m/s et la loi de Medwin (cf equation 1.2) est une estimation approximative de sa dynamique. Une valeur erronée entraîne un biais important. Il existe plusieurs solutions industrielles pour cela : un capteur [Conductivity, Temperature & Depth \(CTD\)](#) (conductivité température profondeur), un capteur [SVS Sound Velocity Sensor](#) ou un capteur [SVP Sound Velocity Profiler](#). Le capteur [CTD](#), couplé à l'équation 1.2, permet d'estimer la vitesse du son. Le capteur [Sound Velocity Sensor \(SVS\)](#) mesure la vitesse du son à l'instant t sur l'actuelle profondeur de l'objet grâce à un embout en U dont la distance est connue entre un émetteur acoustique et un récepteur acoustique, contrairement au [Sound Velocity Profiler \(SVP\)](#) qui mesure la vitesse du son sur toute la colonne d'eau.

Systèmes de positionnement acoustique

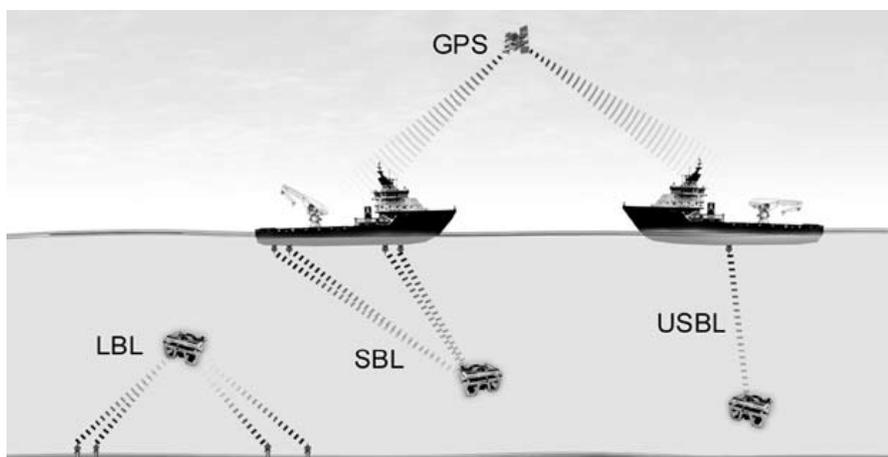


FIGURE 2.4 – Systèmes de positionnement par balise de référence

LBL et GPS Intelligent Buoy (GIB)

Le système **LBL** consiste en un ensemble de transpondeurs **ASM** séparés d'une distance allant de 50 m à plus de 2 km l'un de l'autre, disposés sur les fonds marins, autour de la zone de la mission. Les transpondeurs ont une position précise connue et sont synchronisés. Au moins trois transpondeurs sont déployés, plus communément quatre, mais plus il y a de transpondeur, meilleure sera la précision de positionnement. La distance entre le drone et chaque transpondeur est calculé avec le **TOF**. Cependant il existe également des systèmes utilisant le **TDOA**. Il existe un système extrêmement similaire mais avec des transpondeurs à la surface de l'eau lorsque la profondeur nécessaire à l'accomplissement de la mission est faible : il s'agit du système **GIB**. Les transpondeurs sont alors sur des bouées équipées du **GPS**. De cette façon les coûts de déploiement peuvent être réduits mais sont donc limités par la profondeur. Deux points sont cruciaux pour ces deux systèmes : Le déploiement et la calibration [14].

Le déploiement des balises **LBL** n'est pas fait au hasard. Les fonds marins ne sont que rarement plats et nécessitent une étude préalable à la mission. De plus, en fonction de la profondeur de la mission et des trajectoires souhaitées par l'**AUV**, le placement des balises doit être différent. Certains fabricants de système **LBL** proposent un outil pour estimer la précision de positionnement en fonction de la bathymétrie de la zone de mission. En effet on peut tout à fait imaginer qu'à un endroit où se situe l'**AUV**, une des balises sur le fond marin soit masquée par un

relief ce qui dégrade la triangulation.

Ensuite, l'autre étape clé est donc la calibration [14]. La calibration consiste à localiser parfaitement les transpondeurs, la vitesse du son dans cette zone ainsi que de la précision de leurs horloges. De nouveau, le système GIB facilite cette procédure.

Selon la mise en place du système LBL ou GIB, la précision est de l'ordre du mètre, jusqu'à quelques centimètres si le tout est parfaitement calibré.

Short BaseLine (SBL)

Le système SBL est un dérivé du LBL. Le fonctionnement est quasi identique, à la différence que le déploiement des transpondeurs est réalisé sur une plus courte distance, de 50 cm à 50 m. Le système est donc le plus couramment monté sur un navire. La précision du positionnement SBL est dépendant de la taille de la structure (souvent la taille du navire, donc). Le déploiement et la calibration sont rendus plus accessible et donc moins long et coûteux.

USBL

Le fonctionnement du système USBL (également nommé SSBL pour Super Short BaseLine) se détache plus des systèmes précédents. Cette fois-ci, on met en place une unique antenne disposant de plusieurs hydrophones à très courte distance (env. 10 cm) et d'un projecteur au centre. Les distances relatives ou absolues sont toujours calculés soit par TOF soit par TDOA comme pour les autres systèmes mais un calcul du *bearing angle* (angle d'arrivée) est réalisé pour augmenter la précision de positionnement. Cette valeur est obtenue par la méthode AOA. Plus précisément, on estime la différence de phase entre les différences signaux reçus. La principale limitation de l'USBL est la portée, bien que les plus performants peuvent atteindre 10 000 m de distance oblique, mais le coût et le temps de déploiement est largement inférieur pour une précision légèrement inférieure aux SBL, GIB et LBL. Cependant, couplé à des systèmes proprioceptif comme nous le verrons ensuite, l'USBL offre des résultats très satisfaisants. Seul, la précision de positionnement dépend de la distance. Plus l'AUV est loin de l'antenne USBL, plus la précision diminue et la latence (fréquence à laquelle les mesures apparaissent) augmente. On estime la précision à 1-2% de la distance AUV-antenne (donc 1 m pour 100 m de distance) [49]. Il est important de souligner que l'USBL propose la fonctionnalité de communication et de positionnement simultané selon les modèles. Le coût d'un produit USBL sans centrale inertielle est situé entre 15 k\$ et 60 k\$.

Balise unique fixe

Bien que l'[USBL](#) rentre dans cette catégorie lorsqu'il est ancré (fixe), dans cette section nous nous intéressons plus largement aux systèmes à balise unique et fixe. L'architecture traditionnelle est de naviguer à l'estime (*dead reckoning*) avec des capteurs proprioceptifs haute précision et de corriger leur biais ou d'ajouter une donnée à fusionner avec une balise acoustique longue portée [92]. A la différence de l'[USBL](#), on ne regroupe pas plusieurs transpondeurs mais un unique modem [ASM](#) avec un seul hydrophone [89]. Cependant on ne retrouve qu'assez peu cette application en pratique car trop proche de l'[USBL](#).

En revanche, les systèmes à mesure de distance seule avec une balise unique ([ROSB](#) [66]), sont beaucoup plus répandus et constituent un sujet de recherche très actif dans la communauté scientifique [15][92]. Ces systèmes comprennent généralement une centrale inertielle mais pas de [DVL](#) ni d'autres capteurs encombrants ou coûteux. Il s'agit donc d'une architecture plus simple et moins énergivore que les systèmes qui comprennent un [DVL](#). Son intérêt a donc grandi récemment par la nécessité de réduire les coûts du positionnement sous-marin [77] [15]. Le [ROSB](#) est également utilisé pour du *mapping* de type [Simultaneous Localisation and Mapping \(SLAM\)](#) [69], qui sera détaillé en section suivante. Néanmoins, ce système fait face à de nombreux challenges : portée, nombre de mesures requises, précision et robustesse. Plusieurs articles et conférences ont étudié l'observabilité et les performances d'une telle architecture [19] [18].

Pour compléter cette liste, nous citerons les systèmes à balise unique [Sparse-LBL](#) de [iXblue](#) et le système [V-LBL](#) [60].

Autres systèmes acoustiques

La méthode de la localisation simultanée avec le *mapping*, [SLAM](#), évoquée précédemment est également un sujet revêtant un intérêt croissant [47]. Combiné à un estimateur et des moyens de positionnement, le drone cartographie la zone de mission. L'architecture la plus courante dans le domaine de la navigation d'[AUV](#) est l'[Extended Kalman Filter \(EKF\)-SLAM](#) [64]. A partir de ses observations, le drone est alors capable d'affiner son positionnement. Néanmoins le [SLAM](#) requiert une capacité de calcul supérieure, surtout si la localisation acoustique est complétée par de l'imagerie (caméra ou sonar). De plus, les deux challenges du [SLAM](#) peuvent être un milieu qui varie dans le temps et une tendance à accumuler les erreurs au cours du temps jusqu'à ce qu'une correction soit effectuée [47].

Deux autres techniques de positionnement [ASM](#) sont les systèmes à base de

SONAR et les systèmes à base d’AUV coopératif [71]. Dans le premier cas, on les retrouve principalement dans tous les systèmes à base de SLAM [64]. Il existe en outre plusieurs sujets de recherche sur le positionnement à base de SONAR : dans [33], l’auteur propose un système de navigation en deux dimensions à partir d’un SONAR placé à l’avant d’un AUV de petite taille. L’article [62] présente un système INS/DVL classique, agrémenté d’un SONAR pour améliorer la précision de positionnement.

Dans le deuxième cas, on parle de technique dite de navigation coopérative ou *Cooperative Navigation* (CN) [71]. On distingue deux scénarios courants : l’équipe d’AUVs hétérogènes ou l’équipe d’AUVs homogènes.

Le premier scénario est un AUV, avec un faible équipement de positionnement, se positionnant en étant dans la zone d’un ou plusieurs autres AUVs disposant d’un système de positionnement perfectionné [27]. Il s’agit alors d’un système de leader-suiveur. L’autre scénario considère les AUVs d’une flotte comme étant égaux mais pouvant avoir des capteurs sous-marins différents [17] [13]. Les AUVs d’une flotte communiquent entre eux par communication ASM pour se positionner dans l’espace et effectuer des triangulations. Si l’un des AUVs remonte à la surface, il partage son point GPS à toute l’équipe.

Localisation non acoustique

L’état de l’art du positionnement des AUVs par optique comprend diverses méthodes et technologies utilisées pour estimer avec précision la position et l’orientation de ces véhicules dans l’environnement sous-marin. Voici un aperçu des principales approches utilisées :

- Systèmes de marquage optique : des marques visuelles, telles que des motifs spécifiques ou des balises lumineuses, peuvent être placées dans l’environnement sous-marin. Les caméras à bord ou le modem optique de l’AUV peuvent détecter ces marques et les utiliser pour la localisation. Des techniques telles que la stéréovision ou le suivi visuel peuvent être utilisées pour estimer la position de l’AUV en se basant sur la détection et la triangulation de ces marques.
- Systèmes de localisation par caméra externe : des caméras placées sur des structures fixes, telles que des balises ou des caméras installées sur le fond marin, peuvent être utilisées pour suivre et localiser l’AUV. Les caméras peuvent détecter des caractéristiques spécifiques de l’AUV, telles que des lumières, des motifs ou des formes distinctives, et calculer sa position. On

utilise ces méthodes principalement pour du *docking* [20]. Mais également pour du [SLAM](#) [29].

- Systèmes de localisation par faisceau laser : les [AUVs](#) peuvent être équipés de réseaux de photo-diodes laser qui projettent des faisceaux laser sur des surfaces sous-marines. Les capteurs détectent la réflexion des faisceaux et mesurent le temps de vol pour estimer la distance entre l'[AUV](#) et les surfaces environnantes. En combinant ces mesures avec des informations de *dead-reckoning* ou d'autres capteurs, la position de l'[AUV](#) peut être estimée avec précision [40].

Ces différentes approches de positionnement par optique pour les [AUVs](#) offrent des avantages tels que la précision et la rapidité mais des inconvénients en termes de portée, de complexité de mise en place et de coût. Cependant, aucune de ces solutions n'apportent une réelle autonomie au drone sous-marin. De plus, les deux premiers systèmes cités, par marquage optique et par caméra externe se déroulent dans un environnement maîtrisé. Contrairement au dernier qui est dans un environnement libre.

Le système de positionnement [GNSS](#) est également intégré systématiquement aux [AUVs](#) malgré l'atténuation totale du signal radio au delà de quelques mètres sous l'eau. Il sert à deux choses : premièrement l'initialisation en début de mission pour obtenir la position avant de plonger. Sans cette information importante, le positionnement sous-marin ne serait que relatif et non absolu. De cette manière, on calibre ou recalcule les capteurs du drone avant de démarrer. Deuxièmement, le capteur [GNSS](#) (ou les capteurs en cas d'utilisation du [Differential Global Positioning System \(DGPS\)](#)) servent à réaliser un *GPS fix* en cours de mission. On planifie alors à l'[AUV](#) de remonter à la surface et d'interrompre sa trajectoire avant de continuer. De plus, on peut profiter de cette remontée pour échanger des données, recalculer les biais des capteurs (notamment inertiel) ou vérifier les systèmes entre autres.

2.3 Systèmes proprioceptifs

Centrales inertielles

La centrale inertielle, ou [Inertial Measurement Unit \(IMU\)](#) en anglais, est une technologie bien connue. Vastement utilisée dans le monde, on la retrouve dans les smartphones, les voitures, les bateaux, les avions et bien sûr les drones et donc les drones sous-marins autonomes. Les composants de base d'une centrale inertielle sont le gyroscope pour obtenir les vitesses angulaires et donc par intégration l'orientation de l'objet et l'accéléromètre pour obtenir les accélérations de l'objet

sur les 3 dimensions. Les centrales qui disposent de ces 2 capteurs uniquement sont appelées centrales inertielles 6 DOF pour 6 degrés de liberté (*Degrees Of Liberty*). Il existe également des centrales 9 DOF une fois le magnétomètre ajouté, permettant de mesurer le champs magnétique dans les 3 dimensions. Une centrale inertielle est représentée figure 2.5 à gauche.

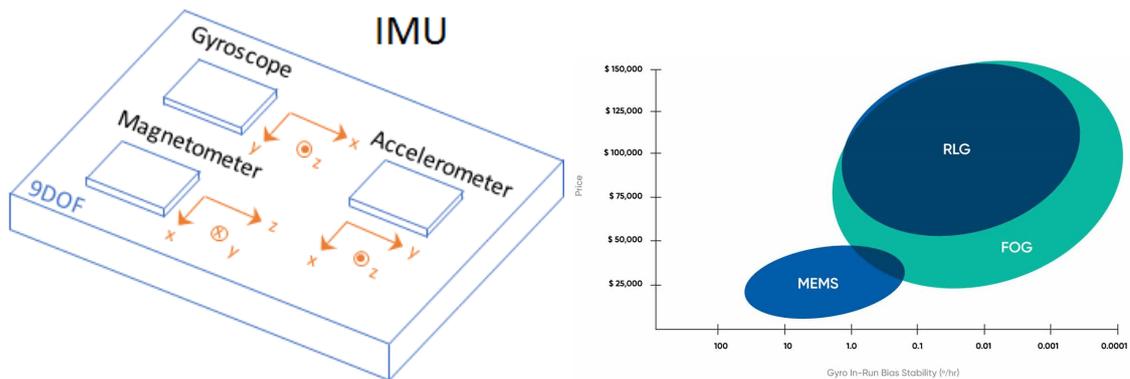


FIGURE 2.5 – 9 DOF IMU à gauche, et comparaison des technologies gyroscopiques à droite.

Trois niveaux de complexité d’une centrale inertielle existent :

- L’IMU, la plus simple. Soit il n’y a aucun calculateur et il agit comme un capteur, nécessitant à l’utilisateur de gérer tout le traitement des données brutes pour interprétation. Soit il y a un calculateur présent sur la carte électronique et dans ce cas, il est possible que le fabricant ait intégré un système de calibration et/ou de filtrage des données, permettant une meilleure précision et un biais moindre.
- L’Attitude and Heading Reference System (AHRS), le niveau intermédiaire. L’AHRS permet d’avoir une interprétation supplémentaire des valeurs mesurées, en plus d’un système de filtrage et de calibration de tous les capteurs. Selon le fabricant et le modèle, ceux-ci sont plus ou moins avancés pour améliorer la précision et la justesse des résultats. Plus important encore, l’AHRS permet d’avoir à chaque instant le cap et l’orientation de l’objet sur lequel est monté le capteur grâce à ses résultats.
- L’INS, le plus haut niveau de centrale inertielle. Comme son nom l’indique, il s’agit d’un système de navigation. Une INS estime donc la position de l’objet sur lequel elle est liée. C’est ce type de système qui est couramment intégré dans un AUV. Dans le domaine de l’aérien, une INS est très souvent couplé avec un GPS pour une précision optimale. Dans le positionnement sous-marin, c’est avec d’autres capteurs ou systèmes acoustiques.

Une **INS** contient un **AHRS** qui lui même contient un **IMU**. Il existe trois types de centrale inertielle sans contact. Les centrales microsystèmes électromécaniques, **Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)** en anglais, les centrales à base de gyroscope laser en anneau, **Ring Laser Gyroscope (RLG)** en anglais et enfin les centrales à base de gyroscope fibre optique, **Fiber Optical Gyroscope (FOG)** en anglais. La technologie **RLG** est une technologie historique, apparue dans les années 1960 [74]. Le **RLG** était le gyroscope de choix pour les conceptions requérant le plus de précision possible. Cependant, ces dernières années la technologie **FOG** a progressivement éclipsé celui-ci, devenant l'acteur haute précision majoritaire voire unique dans le domaine sous-marin. Les centrales **MEMS** sont apparues dans les années 1990 et se sont perfectionnées rapidement. Il s'agit de la centrale la plus répandue lorsque deux critères sont en jeu : Le prix et la taille. La droite de la figure 2.5 montre la performance de l'**IMU**, mesurée par la stabilité du biais du gyroscope en degrés par heure, par rapport à son prix. En réalité, le coût d'un **IMU MEMS** commence à partir de 10\$.

Cet indicateur de performance en degrés par heure n'est pas anodin : il s'agit du principal challenge des centrales inertielles. Généralement, le cap, *heading angle* en anglais, d'un véhicule dérive plus que les angles de roulis et de tangage. Pour les **MEMS** les plus low-cost, on parle de dix degrés par heure de dérive. De plus, on peut citer des difficultés liées au bruit, au magnétisme ou plus généralement au filtrage et à la calibration de la centrale inertielle, peu importe la technologie.

Pour toutes ces raisons, le choix idéal lors de l'intégration d'une centrale inertielle dans un **AUV** est une **INS** à base de gyroscope **FOG**. Dans l'industrie, on considère un drone autonome pour un biais inférieur à $0.1^\circ/\text{h}$ [49]. Toutefois une telle solution comporte cependant deux défauts : le coût et l'encombrement.

Doppler Velocity Log - **DVL**

La figure 2.6 ci-dessus, montre les caractéristiques physiques classiques d'un **DVL**. Il s'agit de nouveau d'un capteur acoustique mais qui cette fois-ci mesure les vitesses linéaires d'un véhicule sous-marin par rapport au fond marin [76]. Son fonctionnement est le suivant : trois ou quatre (selon le modèle) signaux **ASM** à impulsion longue sont émis vers le fond marin dans des directions différentes précises. Si le **DVL** est à portée acoustique du fond, il reçoit la réflexion de tout ces signaux. Plus la fréquence d'émission du **DVL** sera basse, plus la portée (profondeur entre l'**AUV** et le sol) sera importante mais la taille du **DVL** conséquente [76]. Dans tous les cas, la portée minimale de fonctionnement est de 3 mètres [50].

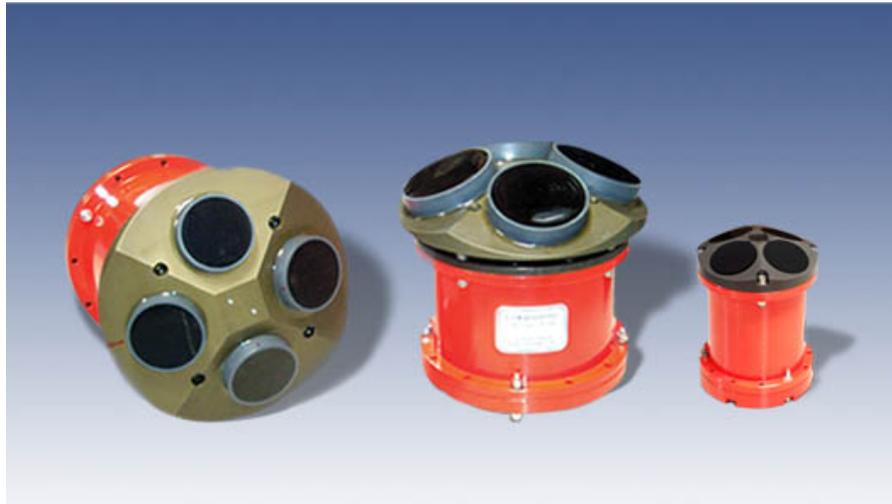


FIGURE 2.6 – Doppler Velocity Log (DVL) de LinkQuest.

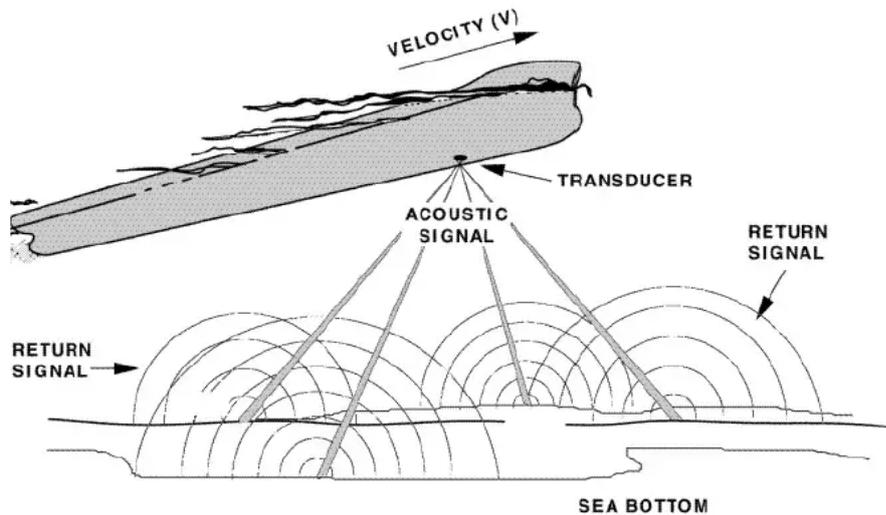


FIGURE 2.7 – Principe de fonctionnement du DVL.

Grâce à la réception de ces trois ou quatre signaux, un calcul de chaque décalage Doppler f_D permet d'obtenir une vitesse finale appelé v_r qui, lorsqu'elle est projetée, permet d'estimer les vitesses linéaires par rapport au fond marin. L'équation reliant le décalage Doppler et la vitesse de drone est la suivante [76] :

$$f_D = \frac{2v_r f_0}{c_w} \quad (2.2)$$

où v_r est la vitesse dans la direction de l'un des transducteurs avant calcul final, c_w est la célérité du son dans l'eau, f_0 est la fréquence d'émission et f_D est le décalage

Doppler entre la fréquence reçue et f_0 . Le facteur 2 est présent car le signal fait un aller-retour. Les fréquences typiques d'un **DVL** sont entre 75 kHz pour les plus basses et 1.2 MHz pour les plus hautes. Les erreurs de mesure d'un système **DVL** peuvent être multiples : vitesse du son, orientation des transducteurs, fréquence d'émission, déplacement de l'**AUV** en rotation ou encore réflexion du signal contre un obstacle au lieu du terrain.

Néanmoins, la précision de mesure est très satisfaisante. Pour les **DVL** les plus petits comme par exemple le A50 de Waterlinked, l'erreur est d'environ 1% de la vitesse (soit 0,02 m/s pour une vitesse de 2 m/s) mais à des profondeurs faibles (< 100 m) [76]. Les plus performants contiennent un capteur **Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)** de courant marin et de vitesse du son et gardent des précisions de l'ordre de 0,3% à 0,5% malgré une profondeur plus importante (Sonardyne, Teledyne, etc.).

Très couramment fusionné avec une **INS** de façon à combler les lacunes d'estimation de la vitesse de celui-ci, le **DVL** est un système omniprésent dans le domaine des **AUVs**. Il a cependant un coût conséquent (entre 7 k\$ et 50 k\$), une certaine complexité de mise en oeuvre ainsi qu'un encombrement conséquent.

Autres capteurs

A ces deux grandes familles de capteurs proprioceptifs, viennent s'ajouter plusieurs capteurs qui, mis bout à bout, permettent à l'**AUV** de connaître ses paramètres de navigation le plus précisément possible pour évoluer sous l'eau. Cela inclut :

- Le capteur de courant marin, **ADCP**, déjà précédemment cité. Il n'est pas obligatoire dans un **AUV**, contrairement à un capteur de pression ou de profondeur et à une centrale inertielle, mais il permet à l'**AUV** de mieux appréhender son environnement. En grande profondeur, l'utilité d'un **ADCP** est moindre mais en eau peu profonde (<100 m) son intérêt est non négligeable. Leur fonctionnement est similaire à celui des **DVL** (4 faisceaux acoustiques orientés différemment vers le fond de façon à obtenir le Doppler). De ce fait, les **DVL** peuvent dans certains cas faire les deux.
- Le capteur de pression, permettant de calculer la profondeur du véhicule sous-marin. La relation de proportionnalité entre pression et profondeur dépend de la densité de l'eau de mer et donc majoritairement de la salinité. On estime que la pression augmente de 1,025 bar tous les 10 mètres [21]. Le choix de ce capteur dépend de l'application car il existe également des capteurs

de profondeur acoustique. Ceux-ci sont plus précis mais plus onéreux. Ils permettent une bonne précision même en très forte profondeur.

2.4 Estimateurs et navigation

Nous avons vu les différents capteurs disponibles pour les véhicules sous-marins non habités, et plus particulièrement les AUVs. Dans cette section, nous allons traiter de la fusion de données, de l'estimation de position et enfin le système final de navigation d'un AUV.

Estimateurs

Le rôle de l'estimateur englobe deux aspects. Tout d'abord, il consiste à fusionner les données lorsque plusieurs mesures sont disponibles. Ensuite, il vise à estimer un état en se basant sur les mesures, en prenant en compte le bruit d'estimation, ainsi que l'état initial. Il existe une multitude d'estimateurs car aucun n'est parfait dans toutes les conditions. C'est un sujet de recherche en constante évolution et ouvert aux contributions. Nous allons rentrer dans les détails pour quatre d'entre eux, les plus robustes et utilisés en robotique sous-marine : Le filtre de Kalman linéaire ou [Kalman Filter \(KF\)](#) [6] en anglais, le filtre de Kalman étendu ou [EKF](#) [58] en anglais, le filtre de Kalman sans parfum ou [Unscented Kalman Filter \(UKF\)](#) [88] [2] en anglais et enfin le filtre particulaire ou [Particle Filter \(PF\)](#) [3] en anglais.

D'autres estimateurs sont toutefois cités dans la littérature :

- Des dérivés supplémentaires du filtre de Kalman. Ces dérivés répondent à un besoin précis, lié à une des faiblesses du [KF](#). Par exemple, le filtre de Kalman étendu adaptatif (abrégé [AEKF](#)) [44] [90]. Celui-ci est donc basé sur un [EKF](#) classique. Il améliore néanmoins l'estimation des caractères statistiques des bruits d'état et de mesure à chaque temps d'échantillonnage selon l'environnement ou la dynamique. Dans l'article [22], l'auteur utilise le filtre [AEKF](#) pour la navigation sous-marine.
- Les estimateurs moindre carrés ou [Least Square \(LS\)](#) et maximum de vraisemblance ou [Maximum Likelihood \(ML\)](#) . Ces deux algorithmes sont utilisés lorsqu'aucune solution directe n'est possible [9]. Par exemple, pour des systèmes non linéaires, non réguliers ou surdéterminés. Cependant, lorsque le véhicule à localiser n'est pas statique mais en mouvement et que le suivi est souhaité, les estimateurs [LS](#) et [ML](#) ne sont pas adaptés.
- Enfin, on peut citer l'estimateur Maximum A Posteriori ou [MAP](#). L'estimateur [MAP](#) est une méthode similaire à celle du maximum de vraisemblance. Elle

est utilisée pour estimer des paramètres inconnus, tels que les paramètres d'une densité de probabilité, à partir d'un échantillon donné. Bien qu'elle soit étroitement liée au maximum de vraisemblance, elle diffère en permettant de prendre en compte un *a priori* non uniforme sur les paramètres à estimer. C'est un estimateur reconnu dans le domaine du suivi de cible. Dans la thèse [66], il est comparé aux filtres de Kalman ainsi qu'au filtre particulaire.

- Nous pouvons également citer les méthodes ensemblistes pour la localisation en robotique mobile [41] [54] adaptées dans ce cas aux AUVs. Dans [51], l'auteur propose une méthode ensembliste basée sur l'analyse par intervalles pour résoudre le problème de la localisation et du *mapping SLAM*. Le principe de cette approche est de transformer le problème *SLAM* en un problème de satisfaction de contraintes pour lequel les algorithmes de propagation d'intervalles sont particulièrement performants.

Détaillons maintenant les quatre estimateurs les plus répandus pour la navigation des AUVs en décrivant leurs qualités, leurs défauts ainsi que leurs algorithmes.

Filtre de Kalman et Filtre de Kalman Etendu

Le filtre de Kalman est une création de l'auteur du même nom dans le début des années 60. Le filtre de Kalman est un algorithme utilisé pour estimer l'état d'un système dynamique à partir d'observations bruitées. Il est largement utilisé dans divers domaines tels que la robotique, la navigation, le traitement du signal, etc. Le filtre de Kalman classique suppose que toutes les variables d'état du système sont directement observables. Cependant, dans certains cas, certaines variables d'état peuvent ne pas être mesurables directement, mais seulement de manière indirecte à travers d'autres variables mesurables.

Le *KF* et ses dérivés sont récursifs, ce qui signifie qu'ils n'ont besoin que du signal d'entrée actuel et de sa réponse à l'itération précédente pour produire une estimation à l'instant courant. Cela permet d'implémenter les filtres de Kalman pour des applications en temps réel, sans nécessiter la conservation et le retraitement de toutes les données passées. De plus, le temps de traitement/calcul est faible. Le *KF* est un système linéaire, discret dans le temps, de dimension finie, qui évalue l'estimation d'état cherchant à minimiser l'erreur quadratique moyenne.

La dynamique du filtre de Kalman résulte des cycles successifs de prédiction et de filtrage que l'on observe (figure 2.8). Le processus d'innovation (également appelé de mise à jour) associé au filtre, qui représente les nouvelles informations transmises à l'estimation d'état par la dernière mesure du système, est introduit. La qualité de la prédiction du filtre est interprétée par les ellipsoïdes d'erreur associées

à la densité de probabilité Gaussienne au cours du temps.

Les **KFs** reposent sur la notion de matrice de covariance qui ne sera pas rappelée ici.

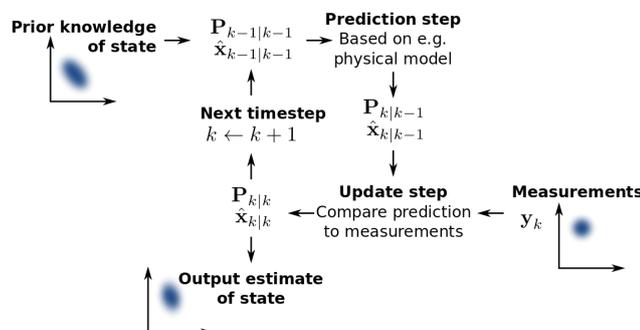


FIGURE 2.8 – Principe de fonctionnement du filtre de Kalman.

L’algorithme du **KF** est détaillé ci-dessous. Les paramètres correspondants sont décrit dans le tableau 2.1.

Algorithme 1 : KF

Input : $\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{P}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{y}_k$

Output : $\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{P}_k$

- 1 $\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k$
 - 2 $\mathbf{P}_k^- = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}$
 - 3 $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$
 - 4 $\mathbf{y} = (\mathbf{y}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-)$
 - 5 $\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{y}\mathbf{K}_k$
 - 6 $\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{H}\mathbf{P}_k^-$
 - 7 **return** $\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{P}_k$
-

Lorsque soit l’évolution de l’état du système, soit la dynamique de l’observation est non linéaire, les fonctions de densité de probabilité conditionnelle fournissant l’estimation du minimum de l’erreur quadratique moyenne ne sont plus gaussiennes. Le filtre non linéaire optimal propage ces fonctions non gaussiennes et évalue leur moyenne, ce qui représente une charge de calcul élevée. Pour résoudre le problème, dans le cadre des filtres linéaires, l’une des propositions est le filtre de Kalman étendu **EKF**. L’**EKF** met en œuvre un filtre de Kalman pour une dynamique du système qui résulte de la linéarisation de la dynamique du filtre non linéaire original autour des estimations d’état précédentes. Plus concrètement, les matrices d’évolution \mathbf{F} d’observation \mathbf{H} sont remplacées par les jacobienes des fonctions d’évolution $f(\mathbf{x}_k)$ et d’observation $h(\mathbf{y}_k)$. L’algorithme est alors le suivant :

Paramètre	Description
\mathbf{x}_k	Vecteur d'état
\mathbf{P}_k	Matrice de covariance de l'estimateur
\mathbf{u}_k	Vecteur de la commande en entrée
\mathbf{y}_k	Vecteur de mesure
\mathbf{K}_k	Gain de Kalman
\mathbf{F}	Matrice d'évolution
\mathbf{H}	Matrice d'observation
\mathbf{Q}	Matrice de covariance du bruit d'évolution
\mathbf{R}	Matrice de covariance du bruit de mesure

TABLE 2.1 – Description des paramètres des filtres de Kalman

Algorithme 2 : EKF	
Input	$\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{P}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{y}_k$
Output	$\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{P}_k$
1	$\mathbf{F} = \nabla_f$
2	$\mathbf{H} = \nabla_h$
3	$\hat{\mathbf{x}}_k^- = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k)$
4	$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}$
5	$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$
6	$\mathbf{y} = (\mathbf{y}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_k^-))$
7	$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{y}\mathbf{K}_k$
8	$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{H}\mathbf{P}_k^-$
9	return $\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{P}_k$

Filtre de Kalman sans parfum

La transformation sans parfum est utilisée pour convertir le modèle de filtre de Kalman classique en un modèle équivalent qui inclut à la fois les variables d'état observables et les variables d'état non observables. Cela permet d'estimer l'état complet du système, y compris les variables d'état non observables.

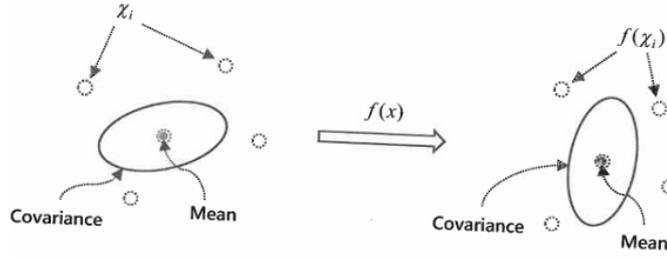


FIGURE 2.9 – Transformation sans parfum

La transformation sans parfum $UT(\cdot)$ consiste essentiellement à introduire de nouvelles variables d'état, appelées variables d'état sans parfum ou variables d'état étendues, qui représentent les variables d'état non observables. Ces nouvelles variables sont ensuite incluses dans le modèle du filtre de Kalman et interviennent dans les équations de prédiction et de mise à jour de l'état. De cette manière, l'estimation de l'état non seulement utilise les observations directes, mais aussi les informations indirectes fournies par les variables d'état sans parfum [88].

Tout d'abord, on sélectionne des points sigma χ_i basés sur la moyenne et la covariance de x grâce à la fonction `SigmaPoints` [88]. Ensuite, on transforme ces points sigma en passant par la fonction $f(x)$. Enfin, on calcule la moyenne pondérée et la covariance des nouveaux points sigma $f(\chi_i)$. Il s'agit alors de la moyenne et de la covariance de $f(x)$. L'algorithme du filtre `UKF` est le suivant :

Algorithme 3 : UKF

Input : $\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{P}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{y}_k$

Output : $\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{P}_k$

- 1 $\kappa = 4 - n$
 - 2 $(\chi_i, \mathbf{W}_i) = \text{SigmaPoints}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{P}, \kappa)$
 - 3 $(\hat{\mathbf{x}}_k^-, \mathbf{P}^-) = UT(f(\chi_i, \mathbf{u}_k), \mathbf{W}_i, \mathbf{Q})$
 - 4 $(\mathbf{y}, \mathbf{P}_y) = UT(g(\chi_i), \mathbf{W}_i, \mathbf{R})$
 - 5 $\mathbf{P}_{xy} = \sum_{i=1}^{2n+1} \mathbf{W}_i (f(\chi_i, \mathbf{u}_k) - \hat{\mathbf{x}}_k^-)(g(\chi_i) - \mathbf{y})^T$
 - 6 $\mathbf{K} = \mathbf{P}_{xy} \mathbf{P}_y^{-1}$
 - 7 $\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}(\mathbf{y}_k - \mathbf{y})$
 - 8 $\mathbf{P}_k = \mathbf{P}^- - \mathbf{K} \mathbf{P}_y \mathbf{K}^T$
 - 9 **return** $\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{P}_k$
-

Filtre Particulaire

Le `PF` est un filtre Bayésien de la même façon que les filtres de Kalman. La différence majeure est que le `PF` est une méthode Monte-Carlo séquentielle basée sur

des représentations de masse ponctuelle (ou "particule") des densités de probabilité. Ces particules peuvent être soumises à n'importe quel modèle d'état. Malgré les avantages des algorithmes cités précédemment, l'EKF, l'UKF ou le MAP ont tous des difficultés à reproduire les fonctions de densité de probabilité multimodales, ce qui est un problème courant dans les méthodes de positionnement à balise unique [75]. Le PF est spécifiquement conçu pour traiter les distributions multimodales et est le plus utilisé pour cet effet. Les avantages d'un tel filtre par rapport au filtre de Kalman sont :

- L'adaptabilité aux non-linéarités. En effet le filtre de Kalman est particulièrement efficace pour les systèmes linéaires ou les approximations linéaires. Le filtre particulaire, en revanche, est plus flexible et peut être utilisé pour estimer des systèmes non linéaires complexes sans nécessiter de linéarisation.
- Gestion des distributions non gaussiennes. Lors de la conception d'un KF, il est courant de partir du principe que les données, les bruits ou les erreurs de mesure suivent une distribution gaussienne. Le PF peut gérer des distributions de probabilité plus complexes et non gaussiennes, ce qui le rend robuste pour des scénarios où les incertitudes ne sont pas nécessairement symétriques ou gaussiennes. Ceci en grande partie grâce à l'approche basée sur l'échantillonnage (particules).
- Traitement des systèmes non stationnaires. Le filtre particulaire est mieux adapté pour suivre des systèmes dynamiques qui peuvent subir des changements abrupts ou des non-stationnarités. Les filtres de Kalman peuvent rencontrer des difficultés dans de tels scénarios, car ils assument souvent la stationnarité des processus.

En revanche, même si le PF peut se montrer plus performant pour certaines caractéristiques spécifiques du problème, son défaut majeur est son coût en ressource de calcul. Contrairement aux variantes des filtres de Kalman, il est composé de boucles. De plus le système d'échantillonnage impose des ressources de calcul proportionnelles au nombre d'échantillons. Ce défaut empêche un potentiel déploiement sur un système embarqué temps réel sans unité de calcul haute performance. Complété par un autre défaut, la sensibilité du PF aux paramètres de réglage : initialisation, méthode de re-sampling et allocation des poids. Ces deux inconvénients expliquent le déploiement largement privilégié des variantes du filtre de Kalman dans le domaine des estimateurs bayésiens au détriment du filtre particulaire, malgré les nombreuses qualités du second. Le schéma de fonctionnement est montré figure 2.10.

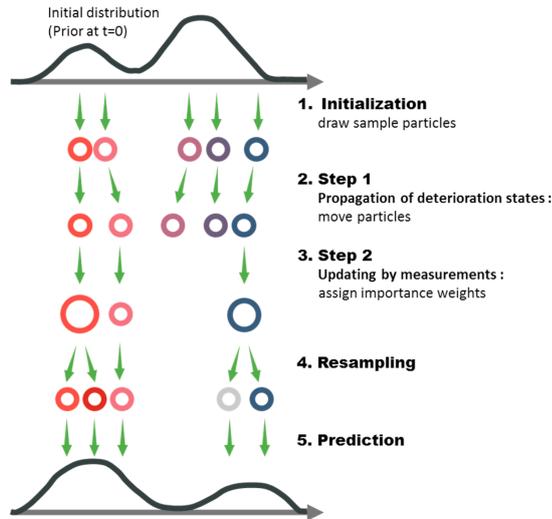


FIGURE 2.10 – Principe de fonctionnement du filtre particulaire.

Il existe plusieurs variantes du PF, présentées dans l'article de référence sur le sujet [3]. L'algorithme du PF pour le suivi d'une cible pour un système à balise unique est exprimé en section 5.2.4 dans [66].

En conclusion, pour les quatre filtres présentés, la connaissance la plus approfondie possible du modèle d'état est cruciale pour la précision de l'estimation de l'état et la convergence de celle-ci.

Navigation des AUVs

La navigation des AUVs consiste à planifier une trajectoire que le drone sous-marin autonome s'efforcera de suivre en fonction de ses paramètres de positionnement et l'environnement dans lequel il progresse.

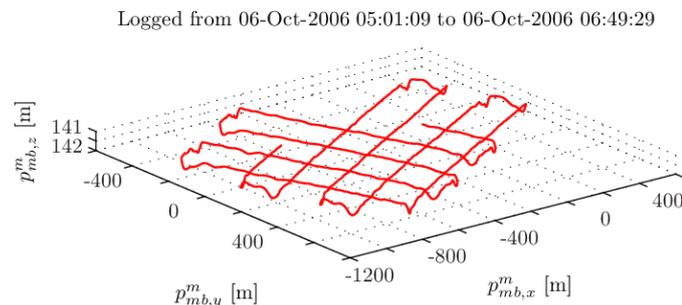


FIGURE 2.11 – Trajectoire caractéristique d'un AUV, en forme de grille appelé boustrophedon [46].

Nous nous intéressons donc plus particulièrement ici à la commande et au pilotage (ou *guidance*) du véhicule sous-marin. Celui-ci est un système non linéaire pour lequel les paramètres sont bien souvent peu connus ou inconnus. Ils sont de plus susceptibles de varier d'une mission à l'autre voire même pendant une mission longue durée. Par exemple, si la salinité de l'eau est très différente d'un endroit à l'autre, la modélisation de l'AUV sera différente. En ajoutant à cela les perturbations inhérentes à l'environnement sous-marin (tourbillon, courant, etc.), la stabilité du système et la vitesse de réponse à une commande sont affectées négativement. Pour ces raisons, la commande d'un AUV est un point crucial pour conserver une autonomie de navigation optimale.

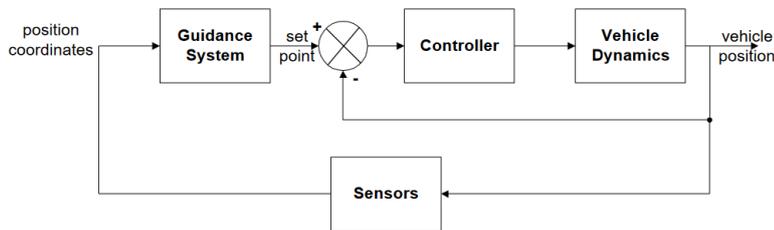


FIGURE 2.12 – Commande et pilotage d'un drone sous-marin.

Les AUVs étant une technologie plutôt bien maîtrisée de nos jours, il existe plusieurs façons robustes de réaliser un guidage automatisé que l'on appellera auto-pilote ou pilote automatique [52]. Les pilotes automatiques classiques pour AUV sont conçus pour contrôler le cap (l'angle de trajectoire), la vitesse et la profondeur dans la boucle de contrôle [39]. En incluant une boucle supplémentaire dans le système de contrôle avec la position estimée, l'objectif pour l'auto-pilote est de suivre des *waypoints* (points de passage) [39] [45]. Ces *waypoints* sont renseignés par l'opérateur du drone avant sa mission. On contrôle alors l'AUV en suivant la loi suivante :

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{y_w(k) - y(t)}{x_w(k) - x(t)} \right) \quad (2.3)$$

Avec ψ l'angle de cap permettant de rejoindre le point de passage $[x_w(k), y_w(k)]$ à partir de la position de l'AUV $[x(t), y(t)]$. L'indice k correspond au numéro du point de passage à suivre et t le temps. Lorsque le véhicule arrive à proximité du point de passage, qui est déterminé en vérifiant si l'AUV se trouve à l'intérieur d'un cercle d'acceptation de rayon ρ autour du point de passage numéro k . Si la position de l'AUV vérifie l'inéquation 2.4 alors le prochain point de passage $k + 1$ est choisi. Le rayon ρ doit être au moins deux fois plus grand que la taille du drone [45].

$$(x_w(k) - x(t))^2 + (y_w(k) - y(t))^2 \leq \rho^2 \quad (2.4)$$

Si ce n'est pas le cas, la commande de l'AUV doit être adaptée pour rejoindre le waypoint.

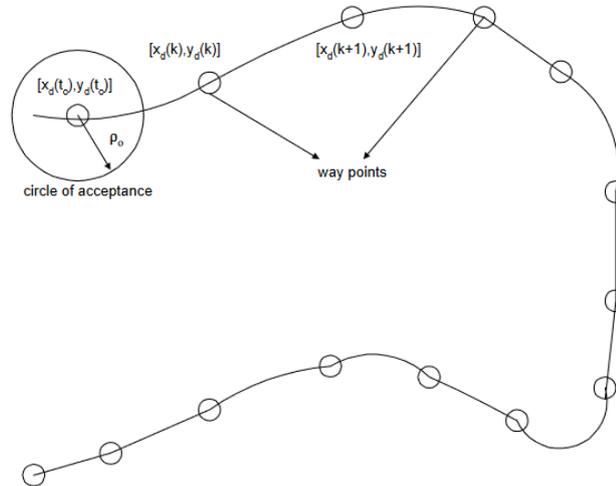


FIGURE 2.13 – Pilotage automatique par suivi de point de passage.

Il existe également d'autres auto-pilotes développés pour des applications spécifiques : le pilotage par vision (similaire à un ROV mais automatisé), utilisé pour du suivi de câble ou le *homing* (ou *docking*) [39]. On peut également citer le pilotage par navigation proportionnelle décrit dans [1]. L'utilisation du pilotage par navigation proportionnelle repose sur le principe selon lequel si l'AUV se positionne le long de la ligne de vue et maintient cette position, un angle de relèvement constant entre l'AUV et la cible est assuré. En d'autres termes, la ligne de vue reste fixe et permettra une interception.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art du positionnement acoustique sous-marin, ainsi que la chaîne de traitement qui fusionne ces données pour estimer la position de manière à réaliser la navigation en toute autonomie.

Nous voyons que même s'il s'agit de technologies robustes et bien implantées sur le marché, des problèmes de coûts, de gestion de l'énergie et d'encombrement apparaissent. Pour des applications telles que les flottes d'AUVs, les micro-AUVs ou encore les AUVs dédiés à la recherche et l'éducation, ces problématiques sont complexes. La fabrication, conception et mise en oeuvre d'un AUV sont conditionnées par ces systèmes.

Chapitre 3

Communication **ASM** et positionnement simultanés pour la navigation

Sommaire

3.1	Introduction	43
3.2	Modem de communication ASM	44
	Communication ASM	44
	Modulation M-Phase shift Keying (PSK)	45
	Forme d'onde et signal pur	45
	Algorithmes de réception	47
	Décodage des données	52
3.3	Définition de la mission d'un AUV	53
3.4	Architecture générale du système	54
	Scénario de déploiement	57
3.5	Modèle dynamique pour le positionnement et communications simultanés en balise unique	58
	Modélisation 3D d'un AUV pour la navigation	58
	Modélisation 2D	61
	Angle d'arrivée de la communication et vitesse relative	63
3.6	Conclusion	64

3.1 Introduction

Le chapitre 1 introductif a décrit les challenges rencontrés par les **AUVs**, notamment les problématiques de communications sans-fil et de positionnement en

milieu sous-marin. Dans le chapitre 2, nous avons détaillé les systèmes de positionnement sous-marin existants dans l'état de l'art. Nous avons alors vu qu'il existe des solutions bien implantées dans l'industrie pour positionner et faire naviguer un AUV avec une précision centimétrique.

En revanche, pour des applications moins contraignantes, il n'existe pas à l'heure actuelle de système à déploiement simple, rapide et peu coûteux. La contribution de la thèse répond à ce verrou. Nous verrons au cours de ce chapitre 3 l'architecture du système proposé. Nous présenterons d'abord le fonctionnement des communications ASM, puis la définition de la mission d'un AUV ainsi que l'architecture système de la contribution de la thèse. Enfin, nous présenterons les modèles dynamiques du système proposé. Nous terminerons par une conclusion.

3.2 Modem de communication ASM

Communication ASM

L'équation de Medwin présentée en (1.2) donne une estimation assez précise de la célérité du son dans l'eau cependant elle reste simpliste et son domaine de validité est limité par ces conditions :

- $0 < T < 35 \text{ }^\circ\text{C}$
- $0 < S < 45 \text{ ‰}$
- $0 < D < 1000 \text{ m}$

A partir d'une profondeur de 600 m, la température devient constante et avec l'augmentation de la pression, la célérité augmente. En pratique, on n'utilise pas cette équation mais des courbes de la vitesse du son dans l'eau en fonction de la profondeur dans la zone prévue par la mission (profil de célérité) en simulation et par des mesures de capteurs (de type SVP) en conditions réelles.

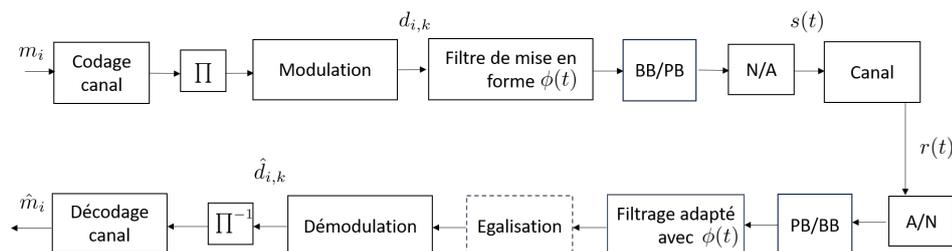


FIGURE 3.1 – Schéma d'une chaîne de communication.

Il existe de nombreuses techniques pour communiquer sous l'eau par acoustique. En considérant uniquement les modulations numériques qui représentent, de nos

jours, la technologie la plus répandue, on peut classer les techniques de transmissions en deux catégories : les modulations cohérentes et incohérentes [81]. Nous nous intéresserons dans ce qui suit aux modulations cohérentes qui ont l'avantage de proposer une meilleure efficacité spectrale que les approches incohérentes au prix d'une moindre robustesse au canal de propagation et d'une complexité à la réception accrue. Plusieurs formes d'ondes peuvent être considérées pour transmettre les données : [Orthogonal Frequency Division Multiplexing \(OFDM\)](#), mono-porteuse ou *chirp*. Cependant les formes d'ondes sous forme de *chirp* hyperbolique sont résistantes à l'effet Doppler. Cela implique des opérations conséquentes pour calculer la valeur du décalage Doppler. Elles sont alors peu adaptées pour du positionnement et communications simultanés. Dans ce qui suit nous ferons l'hypothèse d'une forme onde mono-porteuse avec une modulation de phase [PSK](#) très répandue dans la littérature [10, 81]. Encore une fois le choix de la modulation n'est pas spécifique au principe de positionnement/communication que nous décrivons dans ce chapitre, principe qui pourrait être généralisé à d'autres formes d'ondes de transmission de données. Dans le cadre de nos travaux, nous nous baserons sur une chaîne de communication classique représentée en figure 3.1.

Modulation M-PSK

En communication numérique, la [PSK](#) est une méthode de modulation qui porte une séquence de données binaires par la phase d'un signal porteur. Il existe des [PSK](#) à 2, 4 ou 8 états de phases mais nous nous intéressons ici au mode avec le moins d'états de phase à savoir la [Binary Phase Shift Keying \(BPSK\)](#) (deux phases) et la [Quadrature Phase Shift Keying \(QPSK\)](#) (4 phases). La [BPSK](#) est le mode de modulation le plus simple et robuste ce qui s'intègre parfaitement dans un système de navigation par communication [ASM](#). Il s'agit d'une constellation binaire, comme le montre la figure 3.2. Pour la transmission des données, nous considérerons également la [QPSK](#) dont la constellation est composée non plus de deux points (0 et 1) tel que le [BPSK](#) mais de quatre points correspondant au couplet de bits 00, 01, 10 et 11.

Forme d'onde et signal pur

Avant et après chaque transmission acoustique, nous plaçons N_g symboles appelés symboles de garde. Ils sont placés avant et après le signal utile. Ce sont des pauses pour réduire toute perturbation due à une communication précédente ou à sa réflexion.

Les trames de données sont transmises sur le même modèle que [4] décrit en figure 3.4. Il y a N_p symboles pilotes modulés en [BPSK](#) pour l'estimation du

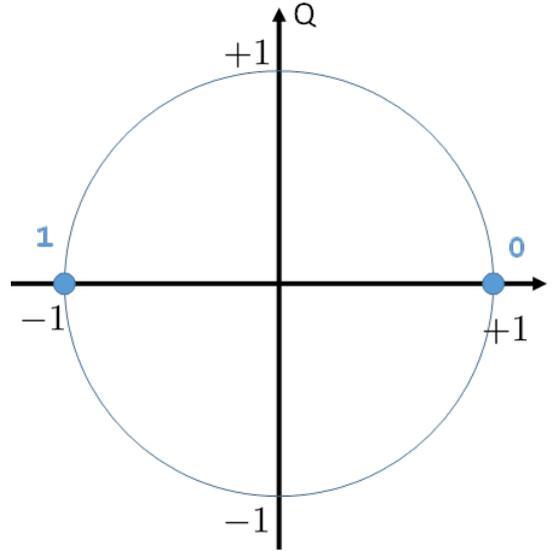


FIGURE 3.2 – Constellation BPSK

canal acoustique sous-marin, ainsi que N_d symboles de données modulés en QPSK contenant des informations utiles. On retrouve alors $N_s = N_p + N_d$ symboles de modulation. Nous définissons ensuite deux fréquences, f_0 et f_{pt} . Respectivement la fréquence centrale du signal utile à transmettre et la fréquence du signal dit *pure tone* qui est un signal de fréquence pure envoyé en dehors du spectre du signal utile, ce signal nous permet d’obtenir une estimation précise du décalage Doppler pour permettre ensuite de le compenser [30, 55, 80, 85].

Le signal transmis sur fréquence porteuse s’écrit de la façon suivante :

$$s(t) = \Re \left[e^{j2\pi f_{pt}t} + \sum_{k=0}^{N_s-1} x[k]\phi(t - kT)e^{j2\pi f_0t} \right] \quad (3.1)$$

où $x[k]$ représente le symbole de modulation PSK à l’index k , T représente la durée d’un symbole de modulation, $\phi(t)$ la réponse impulsionnelle du filtre en racine de cosinus surélevé ou **Square Root Raised Cosine (SRRC)** en anglais de facteur de retombée α . La bande du signal utile B s’exprime ainsi :

$$B = \frac{1 + \alpha}{T} \quad (3.2)$$

La densité spectrale de puissance ou **Power Spectral Density (PSD)** en anglais, du signal ASM émis est donné à titre informatif en figure 3.3.

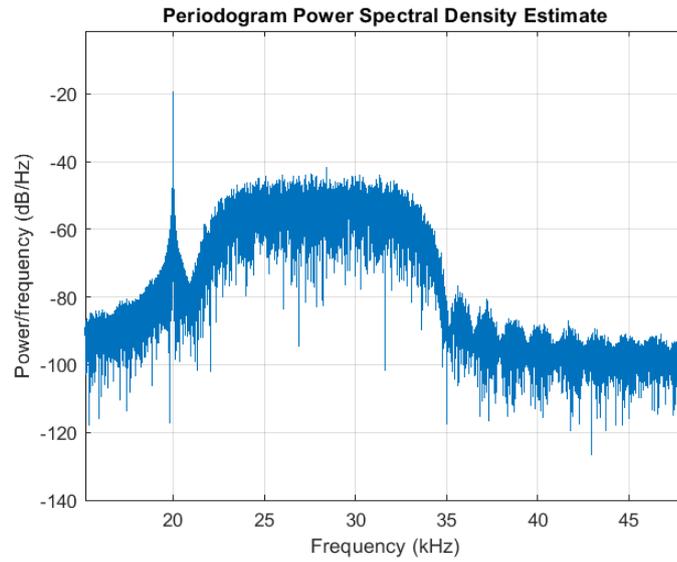


FIGURE 3.3 – PSD du signal transmis sur fréquence porteuse.

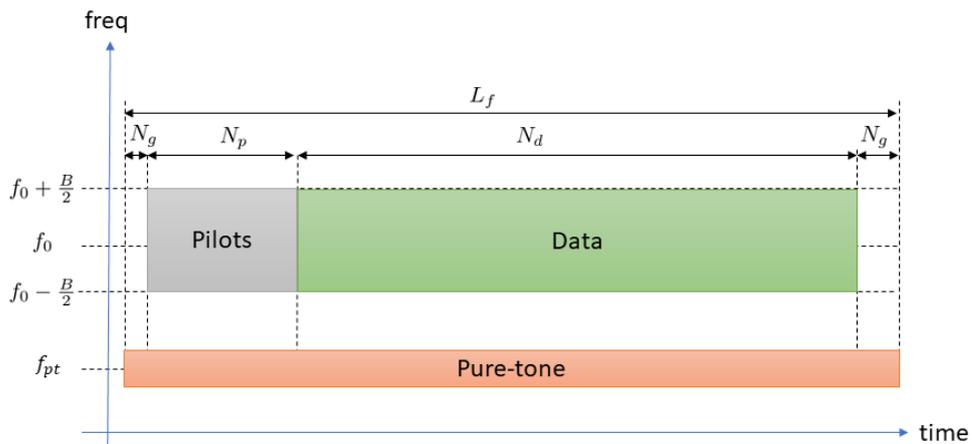


FIGURE 3.4 – Architecture de la trame de communication

Algorithmes de réception

La figure 3.5 décrit l'architecture de réception associée au signal acoustique transmis décrit précédemment. Chaque bloc est crucial et nous allons ici détailler chacun des éléments.

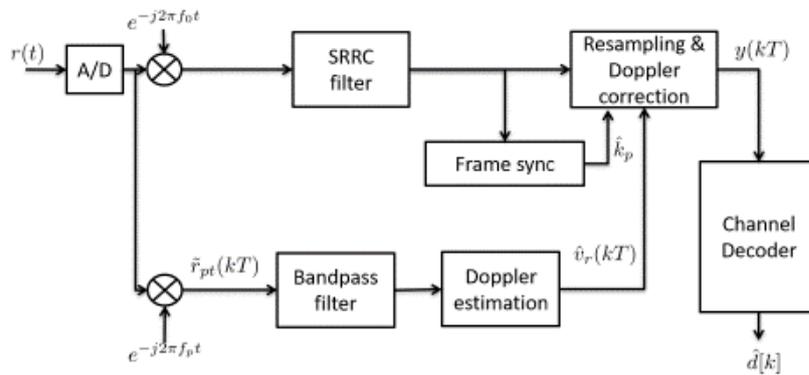


FIGURE 3.5 – Schéma de la partie décodage en réception de la communication ASM

Conversion en bande de base

La première étape consiste à numériser le signal c'est le rôle du bloc A/D pour *analog to digital conversion*. Étant données les valeurs classiques de fréquences en communications acoustiques (1 à 300 kHz), la numérisation peut être effectuée en début de chaîne de réception au moyen de convertisseurs standards. L'étape suivante consiste à convertir le signal en bande de base au moyen de l'opérateur $\exp -j2\pi f_0 t$ puis à effectuer un filtre adapté à la forme d'onde d'émission, c'est le rôle du bloc de filtrage **SRRC**.

Estimation Doppler

Une des premières opérations préalables au décodage consiste à estimer l'effet Doppler provoqué par le mouvement relatif de l'émetteur par rapport au récepteur ou bien par le canal de propagation (vagues, courants, ...).

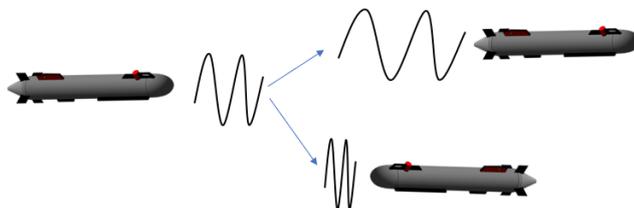


FIGURE 3.6 – Représentation simpliste de l'effet Doppler.

L'effet Doppler se manifeste lorsque l'émetteur et le récepteur sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre. Ceci se traduit par un changement de fréquence

noté f_D . Il se définit comme suit :

$$f_D = \left(1 - \frac{v_r}{c_w}\right)f \quad (3.3)$$

f étant la fréquence centrale d'un signal quelconque en Hz, v_r la vitesse radiale du mouvement relatif entre les deux hydrophones en m/s et c_w la célérité du son dans l'eau en m/s. Une valeur positive de la vitesse v_r indique que l'émetteur se rapproche du récepteur, tandis qu'une valeur négative indique qu'il s'en éloigne. Le paramètre $a = v_r/c_w$, également désigné comme facteur d'échelle Doppler dans l'état de l'art, peut aussi être utilisé. La vitesse relativement faible des ondes acoustiques dans le canal sous-marin par rapport aux ondes radio (1500 m/s comparé à $3 \cdot 10^8$ m/s) dans l'air entraîne un effet Doppler significativement plus prononcé dans le premier cas. Même si dans la théorie ce décalage fréquentiel n'est dû qu'à la vitesse relative entre les deux hydrophones, en pratique on observe des bruits liés à des mouvements parasites ou des erreurs à l'estimation de cette fréquence. L'équation 3.4 ci-dessous montre que l'effet Doppler induit en bande de base un décalage temporel et donc une rotation de phase. Cette affirmation est particulièrement importante car elle va donner deux manières différentes d'estimer le Doppler : par la rotation de phase ou par la compression/dilatation temporelle.

$$r(t) = s \left(\left(1 - \frac{v_r}{c_w}\right)t \right) e^{-j2\pi f_D t} \quad (3.4)$$

Une première approche possible consiste à envoyer un signal comprenant 2 motifs successifs dont on connaît à l'émission l'intervalle temporel (typiquement un *pré-ambule* et un *postambule* en début et fin de trame) et de mesurer à la réception l'intervalle temporel résultant entre les 2 motifs. Si cet intervalle temporel a évolué, cela est dû à l'effet Doppler ou plus précisément à l'effet de compression/dilatation temporel donné dans (3.4). Dans [80], les auteurs décrivent cette méthode en considérant comme motif un signal *chirp* qui a pour avantage de posséder de bonnes propriétés d'auto-corrélation en présence d'effet Doppler. Si cette approche est relativement simple, elle ne s'avère suffisamment pas assez précise pour une application de positionnement.

Une seconde approche consiste à utiliser un banc de filtres **SRRC** dopplérisés au moyen de (3.4), et de chercher le filtre qui donne le maximum de corrélation sur le signal reçu en bande base [87]. Une fois la meilleure estimation grossière effectuée, une autre estimation plus fine autour de ce décalage temporel est réalisée. A la fin, la corrélation la plus forte est gardée, ce qui donne une estimation finale du Doppler. Si cette méthode s'avère robuste et précise, elle requiert une complexité algorithmique importante. Dans le chapitre 4, cette méthode d'estimation sera

néanmoins simulée.

Dans ce qui suit, nous considérons une autre approche initialement décrite dans [56] qui a l'avantage d'être précise et d'une faible complexité algorithmique. Cette méthode est aussi utilisée dans le domaine du radar automobile. Cette approche est basée sur l'utilisation d'un signal *pure tone* envoyé sur une fréquence f_{pt} en dehors du spectre utile $[f_0 - B/2, f_0 + B/2]$ et ce, sur toute la durée de la trame. Le signal de réception se divise donc en deux parties : Le *pure-tone* reçu centré en f_{pt} et le signal utile reçu de fréquence centrale f_0 . Après remise en bande de base du signal *pure tone*, un filtrage passe bande est effectué sur une largeur de bande $2f_{D,max}$ où $f_{D,max}$ désigne le décalage Doppler maximum supposé dans le cas d'un AUV. La méthode d'estimation Doppler consiste à extraire la valeur du décalage Doppler grâce à la dérivation de phase du signal *pure-tone* $\tilde{r}_{pt}(t)$ en bande de base. En calculant la variation de phase entre 2 échantillons successifs, on peut montrer qu'on obtient une estimation de la vitesse relative \hat{v}_r à l'instant kT , image du décalage Doppler :

$$\hat{v}_r(kT) = \frac{c_w}{2\pi T f_{pt}} \arg(\tilde{r}_{pt}(kT)\tilde{r}_{pt}^*((k-1)T)) \quad (3.5)$$

Il existe d'autres approches d'estimation Doppler dans un contexte de communication sous-marine décrites dans [30] et [85]. Elles sont néanmoins moins enclin à s'appliquer au positionnement acoustique sous-marin.

Synchronisation trame et calcul du temps de vol

Le bloc synchronisation trame noté *frame sync* consiste à estimer le début de la trame de communication réalisée grâce à une intercorrélacion entre le signal sortant du bloc de filtrage adapté et la séquence de données pilotes. Cette information est essentielle à la fois pour décoder le signal de communication mais également pour calculer le temps de vol ou TOF du signal acoustique qui permet de déduire la distance entre l'AUV et la ou les balises avec lesquelles il échange. Dans le domaine de la communication acoustique sous-marine hors AUV, bien que le temps de vol puisse être bénéfique pour optimiser la performance d'une communication acoustique sous-marine, il existe des approches alternatives qui peuvent permettre de gérer les défis de synchronisation et de décalage Doppler sans une connaissance directe du temps de vol pour décoder la donnée transmise. La nécessité de cette information dépendra des caractéristiques spécifiques du canal, du système de communication et des exigences de performance. Dans le cas d'un canal stable (un bon niveau de Signal-to-Noise Ratio (SNR) et peu de multi-trajets entre autres), il est donc possible de se passer d'estimation du temps de vol. En pratique comme le milieu sous-marin est sujet à plusieurs contraintes déjà évoquées, il est d'usage

de mettre en place une estimation du **TOF**. Dans le domaine du positionnement sous-marin cette mesure de distance **AUV-Balise** est cruciale. Comme énoncé dans le chapitre 2, il existe plusieurs systèmes dans la littérature pour se passer de l'estimation du **TOF** et estimer la distance balise(s)-**AUV** (**TDOA** et **AOA** entre autre [93]) mais nous nous intéressons dans ce manuscrit à un système à balise unique contenant un unique hydrophone.

Pour calculer le **TOF**, trois paramètres sont à déterminer. L'horodatage de l'émission, l'horodatage de la réception et la célérité du son dans l'eau dans le canal pendant le trajet. Comme l'algorithme de réception de la communication acoustique est exécuté sur l'**AUV** directement pour la navigation, l'horodatage de la réception du signal de la balise est connu. La célérité du son dans l'eau est obtenue soit par un capteur type **SVS** ou **SVP**, soit estimée par l'équation (1.2). Cependant, en fonction de la distance entre la balise et le véhicule autonome, une erreur sur cette valeur de célérité peut avoir un grand impact sur la précision de l'estimation de la distance. La dernière valeur, l'horodatage de l'émission depuis la balise, est inconnue de l'**AUV**. Dans ce système à balise unique, deux solutions sont envisageables : des communications balise-**AUV** **OWTT** ou des communications balise-**AUV** **TWTT**.

La figure 2.2 montre la méthode la plus simple pour implémenter un système à base de **TWTT**, qui ne nécessite pas d'horloges synchronisées mais seulement un mode transpondeur avec un délai d'attente fixe côté balise avant de répondre. De cette manière, l'échange de données peut se faire dans les deux sens et il n'y a pas de risque de dérive d'horloge dans le temps. L'équation suivante résume l'opération :

$$t_{TOF} = \frac{t_{arrive} - \Delta_{pause} - t_{depart}}{2} \quad (3.6)$$

Avec t_{TOF} le temps de vol de la communication en seconde, t_{arrive} l'horodatage d'arrivée de la communication sur l'**AUV**, t_{depart} l'horodatage de départ de l'échange par l'**AUV** et enfin Δ_{pause} le temps de pause fixe et établi à l'avance côté balise en seconde.

Pour implémenter un système avec un trajet unilatéral, il est fondamental d'utiliser deux horloges atomiques avec le moins de dérive possible dans le temps à basse température (fonds marins) et de planifier des communications de la balise vers l'**AUV** à fréquence fixe. Il est possible de recalibrer l'horloge côté **AUV** grâce au **GNSS** en planifiant des remontées à la surface pendant la mission.

Si les contraintes liées aux communications unilatérales semblent plus importantes, il faut noter que pour de longues distances, diviser le temps de trajet par

deux est non négligeable. Par exemple, si une mission se déroule avec une distance moyenne AUV-balise de l'ordre de 1500 mètres, un trajet dure typiquement une seconde. En laissant un temps de traitement important, on peut imaginer réaliser une communication de la balise toutes les trois secondes. Dans le cas de communications bilatérales, un trajet aller-retour durera deux secondes auquel il faudra ajouter un temps de pause et un temps de traitement à la réception ce qui envisagerait une communication toutes les six secondes avec une télémétrie de l'AUV côté balise. De plus, l'AUV étant par définition en mouvement avec une vitesse v , la distance entre la première communication et la réponse varie de $v\Delta_{pause}$. C'est donc la moyenne des deux trajets qui est retenue, ce qui provoque une erreur d'estimation. C'est cette seconde option qui est retenue dans le développement de l'architecture de navigation du manuscrit. En revanche, pour des raisons de simplification, ce sera la méthode OWTT qui sera employée lors des simulations et des expérimentations qui seront menées, avec des horloges synchronisées.

Compensation Doppler

Une fois le Doppler estimé, il faut compenser le phénomène dilatation/compression temporelle et compenser la rotation de phase. Cette opération est effectuée en ré-échantillonnant le signal en bande base reçu $\tilde{r}(t)$ et en appliquant une correction de phase [28] :

$$y[k] = \tilde{r}(\hat{t}_k) \cdot e^{-j\hat{\phi}_k} \quad (3.7)$$

où \hat{t}_k et $\hat{\phi}_k$ sont mis à jour dynamiquement par groupe de symboles grâce à l'estimation instantanée de v_r :

$$\begin{cases} \hat{t}_k = \hat{t}_{k-1} + T(1 - \frac{\hat{v}_r(kT)}{c_w}) \\ \hat{\phi}_k = \hat{\phi}_{k-1} + 2\pi f_0 T \frac{\hat{v}_r(kT)}{c_w} \end{cases} \quad (3.8)$$

En pratique, nous observons les courbes de la figure 3.7. Cet exemple est tiré de l'expérimentation réalisée en conditions réelles en juillet 2022 dont les résultats sont chapitre 5. La phase de l'angle entre deux échantillons sur tout le signal filtré $\tilde{r}_{pt}(t) = \tilde{r}(t)e^{-2j\pi(f_{pt}-f_0)t}$ est à gauche. La zone du pure-tone est située dans cet exemple entre les échantillons 3×10^4 et 6×10^4 . Le reste est du bruit car il n'y a pas de signal. Lorsque l'on fixe une fenêtre précise et que l'on fait une régression linéaire classique, on observe le résultat de droite. Il reste alors à convertir cette valeur en \hat{v}_r grâce à l'équation 3.5.

Décodage des données

Une fois le Doppler compensé, il reste à estimer les données utiles d_k en compensant les effets de trajets multiples occasionnés par le canal de propagation ainsi que

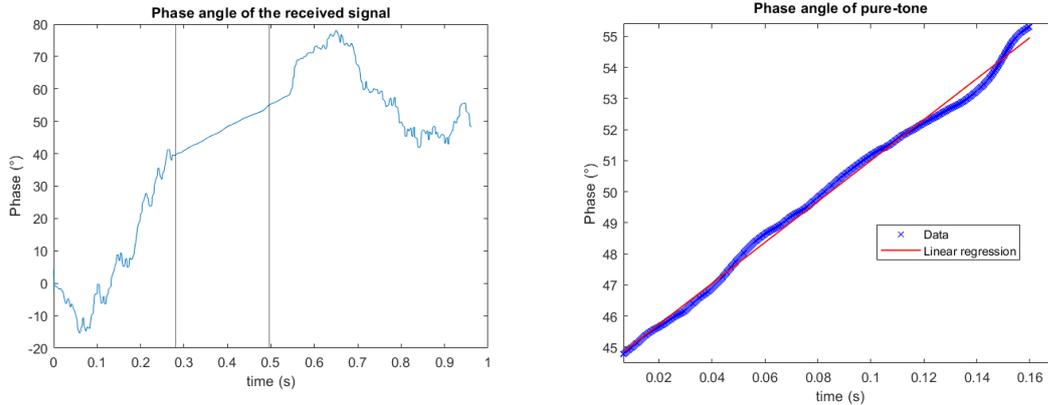


FIGURE 3.7 – Évolution de $\arg(\tilde{r}_{pt}(t))$ à gauche, zoom sur la phase de l’angle du signal *pure-tone* et régression linéaire à droite.

le Doppler résiduel. Pour ce faire nous utilisons un récepteur basé sur le principe de turbo-égalisation décrit dans [10]. Une fois la réponse du canal estimée grâce aux N_p données pilotes, les interférences inter symboles sont progressivement annulées au moyen d’une boucle itérative entre le bloc de décodage de canal et le filtre d’égénéralisation optimisé au sens du minimum d’erreur quadratique.

3.3 Définition de la mission d’un AUV

Comme précisé dans le chapitre 2, un AUV peut être employé pour des missions très diverses et des domaines très différents (militaire, recherche publique ou privée et civil). Pour rappel, les différents paramètres représentatifs d’une mission sont :

- La durée de la mission.
- L’aire de la mission ainsi que sa profondeur (la zone de la mission).
- La bathymétrie de la zone de mission.
- La trajectoire à suivre.
- Dans une moindre mesure, en cas de navigation en petits fonds marin ($<100\text{m}$), le comportement des courants.

La figure 2.11 montre la trajectoire la plus courante d’un AUV pour des missions d’exploration. Elle provient de la vérité terrain d’une mission de navigation par centrale inertielle dans [46]. Nous avons vu qu’elle s’appelait *boustrophedon* mais il est également possible de rencontrer les définitions *Lawn-mower* (trajectoire type tondeuse à gazon) ou encore *grid-pattern* (quadrillage). Il est courant (indépendamment de la méthode de positionnement employée) de planifier une remontée à la

surface après le quadrillage d'une première zone avant de quadriller une seconde zone. De cette manière, un recalage **GNSS** intervient.

Dans le cadre des travaux qui ont été effectués pendant la thèse, il a été choisi de travailler avec deux trajectoires type : la lemniscate (en forme de 8) et le boustrophedon. De cette manière, il est facile d'observer la convergence d'un algorithme, sa précision et sa stabilité dans le temps.

3.4 Architecture générale du système

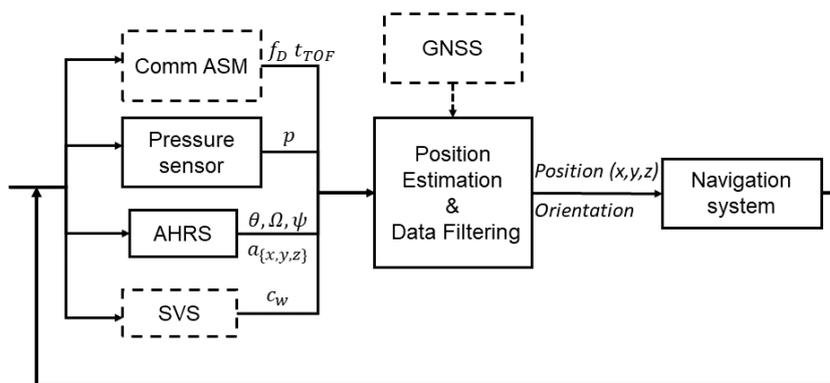


FIGURE 3.8 – Schéma bloc de l'architecture générale du système.

Le système de navigation développé dans le cadre de cette thèse se décompose en trois parties : mesures (ou estimations d'une mesure), filtrage et navigation. La figure 3.8 résume le fonctionnement global du système proposé. En pointillés sont représentés les capteurs donnant des mesures à des fréquences différentes (moins élevées) que la fréquence de rafraîchissement de l'algorithme. Le bloc central, *Position Estimation & Data Filtering* représente le coeur du travail de la thèse.

Description du système

Les capteurs que l'on utilisera pour le développement du système sont les suivants :

Système de positionnement par satellite **GNSS :** Embarquer un système de positionnement satellite est nécessaire pour passer de l'estimation de la position relative à l'estimation de la position absolue. Malgré une disponibilité très limitée, le **GNSS** a une double utilité. Premièrement, au moment du lancement de la mission à la surface, il sert d'une part naturellement à initialiser la position absolue de

manière précise (que l'on admet de l'ordre de 2 mètres pour une antenne GPS seule et 50 centimètres pour un système DGPS à deux antennes [59] dans le commerce) et d'autre part, le GNSS permet de vérifier et corriger d'éventuels biais sur la centrale inertielle et le modem de communication ASM puisqu'il sert de vérité terrain. Par exemple, si une disparité trop grande est observée entre l'estimation Balise-AUV par acoustique et celle par satellite, une des raisons pourrait être le profil de célérité (vitesse du son dans la colonne d'eau) de la zone qui serait erroné. La deuxième utilisation intervient au moment d'une remontée de l'AUV par exemple en cas de baisse de la confiance dans l'estimation de la position par l'algorithme ou tout simplement dans le cadre d'une remontée planifiée entre deux quadrillages. Après détection du signal de positionnement satellite, une comparaison entre cette position et l'estimation par l'algorithme est réalisée. Un éventuel recalage peut s'effectuer avant de poursuivre. En dehors de ces deux usages possibles, le GNSS n'est pas utilisable. Il s'agit donc d'un capteur qui ne nourrit que rarement l'algorithme de positionnement. On le représente donc en pointillé dans la figure 3.8.

Capteur de pression : Un capteur de pression est un composant essentiel dans un système de positionnement sous-marin pour les AUVs. Son rôle principal est de mesurer la pression hydrostatique de l'eau environnante. Cette mesure permet de déterminer la profondeur à laquelle se trouve le véhicule sous-marin et, par extension, de calculer sa position verticale relative par rapport à la surface de l'eau. Comme la pression augmente avec la profondeur, la valeur de pression mesurée permet de calculer la profondeur à laquelle se trouve l'AUV. Cette information est cruciale pour la navigation sous-marine et le contrôle en temps réel de l'AUV. C'est celle-ci qui permet d'envisager une navigation tri-dimensionnelle en combinaison avec l'orientation mesurée par la centrale inertielle. De plus, il est courant de planifier un suivi de trajectoire à profondeur AUV-Surface constante, pour des relevés bathymétriques ou de la recherche d'épave par exemple. C'est la précision et l'exactitude de la valeur du capteur de pression et par la suite la gestion de la propulsion du véhicule qui permettra de garder cette profondeur constante. Dans notre système, ce capteur transmet une valeur à chaque itération de l'algorithme.

Centrale inertielle : Les définitions des différentes centrales inertielles ont été réalisées dans le chapitre 2. Nous utilisons dans notre système une centrale AHRS MEMS. Le rôle de la centrale inertielle est crucial. Le système proposé dans ce manuscrit est, avant toute chose, basé sur la navigation à l'estime avec l'apport ponctuel d'informations par les communications. En outre, les mesures de la centrale inertielle déterminent la fréquence de fonctionnement du système. Ces mesures sont les accélérations linéaires $A_L = (a_x, a_y, a_z)^T$, les orientations $e = (\psi, \theta, \varphi)^T$, les vitesses angulaires $\omega = (u, v, w)^T$, le cap par rapport au nord et les magnétismes

linéaires $m_T = (m_x, m_x, m_z)^T$. Certains modèles peuvent compléter leurs gammes de mesures par la température ou la pression mais nous n'aborderons pas cela dans ce manuscrit.

Capteur de la célérité du son : Pour rappel, les trois possibilités sont l'utilisation d'un **SVP** (profileur de célérité du son dans la colonne d'eau), un **SVS** (capteur de célérité du son dans l'eau classique) ou une sonde **CTD** qui estimera la célérité en fonction de la température, la salinité et la pression. Ils sont respectivement classés par qualité de la mesure du plus précis au moins précis. Le choix dépend principalement de la précision de positionnement souhaitée et du budget alloué. Cependant l'impact de privilégier une centrale **AHRS** haute performance plutôt qu'un **SVP** haute performance est bien plus élevé que l'inverse. La mesure de la célérité du son arrive en entrée de l'estimation/filtrage avec une fréquence plus faible que les capteurs de navigation à l'estime. Elle est utilisée également pour nourrir le modem de communication acoustique de l'**AUV**. Pour la suite de ce manuscrit, nous choisissons un **SVS** (fig. 3.9), moins complexe qu'un **SVP**, pour remplir ce rôle.

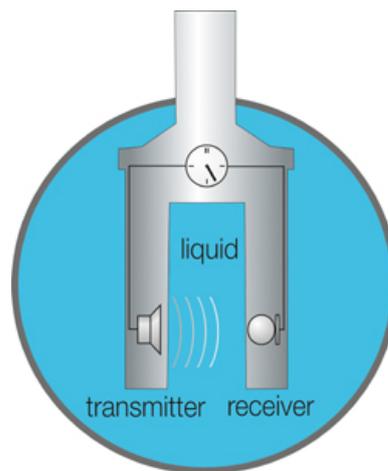


FIGURE 3.9 – Principe de fonctionnement d'un capteur **SVS**. *Source Sensotech*

Modem de communication ASM : Son aspect technique est détaillé en section 3.2. La période entre 2 communications entre la balise et l'**AUV** est dénommée T_{com} . Le lien entre cette période et la précision du positionnement sera étudié. Les caractéristiques du bloc modem **ASM** sont nombreuses mais dans le cadre de ces travaux nous nous limiterons aux plus simplistes (portée, débit, puissance ...).

Le bloc central, composé du noyau essentiel de l'architecture développée dans le cadre de cette thèse, comporte tous les éléments de filtrage, prédiction de l'état (position, orientation, vitesses...) et correction. Ce bloc prend en entrée tous les capteurs, les données des itérations précédentes de l'estimateur et un retour d'information du système de navigation. Le but est de fournir une estimation de l'état du drone ainsi que la confiance de son estimation. Ces sorties sont alors transmises au bloc de navigation. Le détail technique de ce bloc d'estimation et de filtrage est développé à la prochaine section.

En dernier lieu se trouve donc le système de navigation. A partir de l'état estimé, le système représenté par la figure 2.12 se sert du plan de trajectoire établi par les points de passage pour contrôler et corriger la dynamique de l'AUV. De la même manière que l'état de l'art, on souhaite guider le drone par des actions sur le cap, la vitesse et la profondeur [39].

Scénario de déploiement

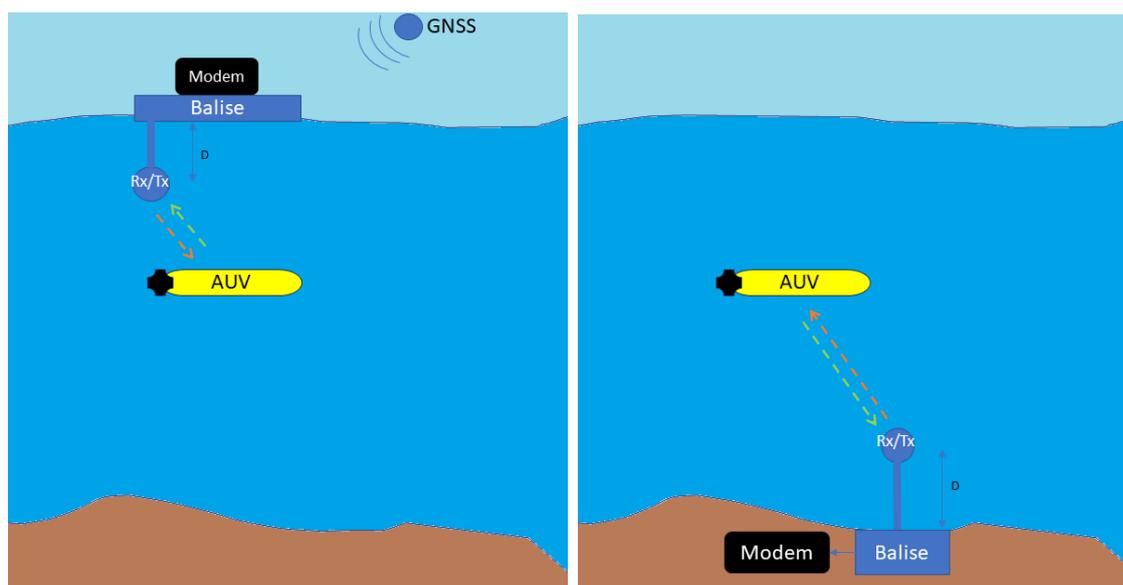


FIGURE 3.10 – Deux systèmes de balise unique fixe possibles.

Dans ce manuscrit nous considérons le cas d'une architecture comprenant une balise unique fixe ou *Fixed single beacon* en anglais. Selon la profondeur de la mission envisagée, il est tout à fait possible de déployer le système de navigation et communication simultanés proposé avec une bouée en surface (comme le montre la figure 3.10 gauche, analogue au système LBL) ou avec une balise en fond marin

(comme le montre la figure 3.10 droite, analogue au système GIB ou USBL).

Dans le premier cas, un lien radio entre les opérateurs et la balise sur bouée est facile à faire. Le GNSS alimente la bouée, ce qui permet de corriger son éventuelle dérive sur l'eau malgré son ancrage. Le GNSS sert également à corriger la dérive temporelle de l'horloge du modem pour garantir un temps de pause précis. Un hydrophone, connecté au modem de communication acoustique, est plongé à une profondeur D . Cette profondeur peut varier selon les capacités d'attache rigide, de câble et de la portée de la mission.

Dans le deuxième cas, la balise en fond marin ne peut ni accéder au signal satellite du GNSS ni à un lien radio avec les opérateurs. Il est possible en revanche de lier par câble la station contenant la balise avec la terre ferme selon l'éloignement de la côte. L'AUV peut alors envisager une zone de mission proche du fond avec des trajets acoustiques réduits. L'hydrophone est cette fois-ci rigidement placé vers la surface à une élévation D . Une étude préalable de la bathymétrie de la zone est nécessaire. En effet, l'hydrophone doit être placé de manière à surplomber toute la zone de mission. Si un masquage par un relief intervient, l'AUV pourrait devenir "aveugle" et ne plus recevoir aucune communication ASM sur une partie de la zone. Utiliser un système ou l'autre ne change pas la performance générale de la navigation. Néanmoins, selon les portées de profondeur de l'AUV planifiées en amont de la mission, choisir la balise la plus proche permettra de rapprocher la balise de l'AUV ce qui laisse envisager un débit de communication supérieur.

3.5 Modèle dynamique pour le positionnement et communications simultanés en balise unique

Modélisation 3D d'un AUV pour la navigation

De manière à décrire convenablement le modèle de l'AUV, deux repères fixes sont utilisés. Le premier repère est le repère terrestre $\{O_E, X_E, Y_E, Z_E\}$. Son origine est sur la surface de l'eau et ses axes pointent le repère classique de référence North, East and Down (NED). L'autre repère utilisé a son point d'origine fixé sur le centre de gravité de l'AUV, $\{O_B, X_B, Y_B, Z_B\}$. La centrale inertielle est située au centre de gravité du drone. Pour décrire la dynamique de l'AUV, on utilise la notation SNAME [32] qui exprime les mouvements par les vecteurs suivants :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\eta} = (\boldsymbol{\eta}_1^T, \boldsymbol{\eta}_2^T)^T \\ \boldsymbol{\nu} = (\boldsymbol{\nu}_1^T, \boldsymbol{\nu}_2^T)^T \end{cases} \quad (3.9)$$

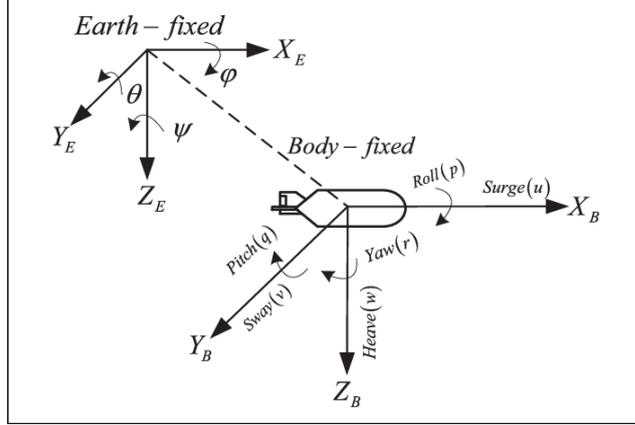


FIGURE 3.11 – Dynamique de l’AUV sur le plan 3D

Avec :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta}_1 &= (x, y, z)^T & \boldsymbol{\eta}_2 &= (\varphi, \theta, \psi)^T \\ \boldsymbol{\nu}_1 &= (u, v, w)^T & \boldsymbol{\nu}_2 &= (p, q, r)^T \end{aligned} \quad (3.10)$$

Respectivement : la position $\boldsymbol{\eta}_1$ et l’orientation $\boldsymbol{\eta}_2$ dans le repère fixe terrestre puis les vitesses linéaires $\boldsymbol{\nu}_1$ et rotatives $\boldsymbol{\nu}_2$ dans le repère dynamique du véhicule. Ces variables sont représentées en figure 3.11. On note également les accélérations linéaires :

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_1 = (\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})^T = (a_x, a_y, a_z)^T$$

L’équation 3.9 est liée par la relation suivante :

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = J(\boldsymbol{\eta}_2)\boldsymbol{\nu} \quad (3.11)$$

J est la fonction de transformation définie par :

$$J(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_B^E(\boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_B^E(\boldsymbol{\eta}_2) \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

où $\mathbf{R}_B^E(\boldsymbol{\eta}_2) \in \mathbb{C}^{3 \times 3}$ est la matrice de rotation [52] entre le repère terrestre (E) et celui du drone (B) tandis que $\mathbf{T}_B^E(\boldsymbol{\eta}_2)$ la matrice de transformation entre la vitesse angulaire et les dérivées temporelles des angles d’Euler choisis. Pour compléter la modélisation dynamique de l’AUV on rappelle que les mouvements d’un robot sous-marin sont gouvernés par l’équation suivante [32] :

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + g(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\nu}, \mathbf{u}) \quad (3.13)$$

où $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ est la matrice de masse et d’inertie du véhicule. Pour son calcul il est nécessaire de connaître la masse en kg de l’AUV dans l’air, la position du centre de

gravité de l'AUV dans le repère B et enfin les produits d'inertie dans le repère B [21]. $\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ est la matrice centripète de Coriolis et $D(\boldsymbol{\nu})$ est la matrice 6x6 d'amortissement (\mathbf{D} pour *Damping effect*). Cette dernière est souvent approximée comme étant diagonale par simplification car les termes dominants sont sur celle-ci. $g(\boldsymbol{\eta})$ est le vecteur 1×6 des effets de la gravitation et de la flottabilité et $\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\nu}, \mathbf{u})$ est le vecteur 1×6 des forces et couples appliqués au véhicule par les actionneurs où \mathbf{u} est le vecteur de commande, c'est-à-dire la vitesse de rotation des moteurs liée aux poussées délivrées). Dans notre cas, les moteurs sont des *thrusters* dont la modélisation ne sera pas abordée ici.

L'utilisation d'un filtre numérique récursif d'estimation du mouvement type Kalman nécessite une représentation discrète de l'espace d'état du modèle du véhicule. Pour la modélisation de notre problème, on définit les équations d'état suivantes :

$$\begin{cases} \mathbf{z}_{k+1} = f(\mathbf{z}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = g(\mathbf{z}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (3.14)$$

Où \mathbf{z}_k est le vecteur d'état à l'instant k , \mathbf{u}_k est l'entrée du système et \mathbf{y}_k est le vecteur de mesure. \mathbf{w}_k et \mathbf{v}_k sont respectivement les bruits d'état et d'observation. La première équation est celle de l'évolution du système tandis que la deuxième est l'équation de mesure. On prend le vecteur d'état $\mathbf{z} = (\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\nu})^T$ de dimension 12. Il décrit en intégralité le mouvement de l'AUV. Grâce aux équations 3.12 et 3.13 l'évolution dans le temps du système est défini par :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} = \begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{\nu}} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} \end{pmatrix} &= f(\mathbf{z}, \mathbf{u}) + \mathbf{w} \\ &= \begin{pmatrix} J(\boldsymbol{\eta}_2) \\ M^{-1}(\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\nu}, \mathbf{u}) - \dot{\boldsymbol{\nu}} - C(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} - D(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} - g(\boldsymbol{\eta})) \end{pmatrix} + \mathbf{w} \end{aligned} \quad (3.15)$$

On peut discrétiser l'équation 3.14 grâce à la méthode d'Euler de premier ordre :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = f(\mathbf{z}, \mathbf{u}), 0 \leq t \leq T \\ z(0) = z_0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \mathbf{z}_{k+} = \mathbf{z}_k + \Delta_t f(\mathbf{z}_k, \mathbf{u}_k) \\ z_0 = z(0) \end{cases} \quad (3.17)$$

où Δ_t étant la période de rafraîchissement de l'algorithme, basée sur la fréquence de l'AHRs. Le résultat est donc le suivant :

$$\mathbf{z}_{k+1} = f(\mathbf{z}_k, \mathbf{u}_k)\Delta_t + \mathbf{w}_k \quad (3.18)$$

La simplification de la fonction d'évolution $f(\cdot)$ intervient lors du passage au modèle à deux dimensions. La fonction d'observation est définie par l'équation 3.19 qui

sera également simplifiée. Cependant un phénomène important est à considérer pour celle-ci : les fréquences d'actualisation des mesures diffèrent. Par exemple, la mesure du système GNSS n'intervient qu'à l'initialisation ou en cas de remontée et les estimations de distance et de vitesse relative par acoustique n'arrivent que rarement (de l'ordre de 0.2 Hz) par rapport à l'AHRS ou le capteur de pression (de l'ordre de 100 Hz). Le vecteur d'observation \mathbf{y}_k et donc la fonction d'observation $g(\mathbf{z}_k)$ seront tronqués.

$$\mathbf{y}_k = \begin{pmatrix} \hat{d} \\ \hat{v}_r \\ \hat{\boldsymbol{\eta}}_2 \\ \hat{\mathbf{a}} \\ \hat{p} \\ \boldsymbol{\eta}_{1GNSS} \end{pmatrix} = g(\mathbf{z}_k) + \mathbf{v}_k \quad (3.19)$$

Avec les mesures suivantes : \hat{d} la distance, \hat{v}_r la vitesse relative dans l'axe AUV-Balise, $\hat{\mathbf{a}}$ (ou $\hat{\boldsymbol{\eta}}_1$) les accélérations, \hat{p} la profondeur et enfin $\boldsymbol{\eta}_{1GNSS}$ la position du GNSS à l'initialisation ou au recalage.

Modélisation 2D

Pour la suite du manuscrit nous allons nous concentrer sur la réalisation de la solution en deux dimensions. Le passage du plan 2D au plan 3D est conditionné ici par le capteur de pression et la centrale inertielle. Le fait de démontrer expérimentalement la faisabilité d'un tel système ainsi que sa performance sur le plan 2D permettra à terme d'envisager le système final sur le plan 3D. De cette manière, les simplifications suivantes peuvent être établies :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta}_1 &= (x, y, 0)^T & \boldsymbol{\eta}_2 &= (0, 0, \psi)^T \\ \boldsymbol{\nu}_1 &= (u, v, 0)^T & \boldsymbol{\nu}_2 &= (0, 0, r)^T \end{aligned} \quad (3.20)$$

On redéfinit alors le vecteur d'état sur le plan 2D.

$$\mathbf{z} = (x \ y \ \psi \ v \ \Omega \ a)^T \quad (3.21)$$

avec pour rappel (x, y) les coordonnées 2D, ψ le cap et v la vitesse du véhicule.

Nous supposons que la commande du véhicule est réalisée par le bloc de navigation via le vecteur \mathbf{u} :

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} \Omega \\ a \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

Où Ω est la vitesse de rotation du cap de l'AUV et a est la valeur de son accélération. Ces deux valeurs sont entièrement décidées par le système de navigation par point

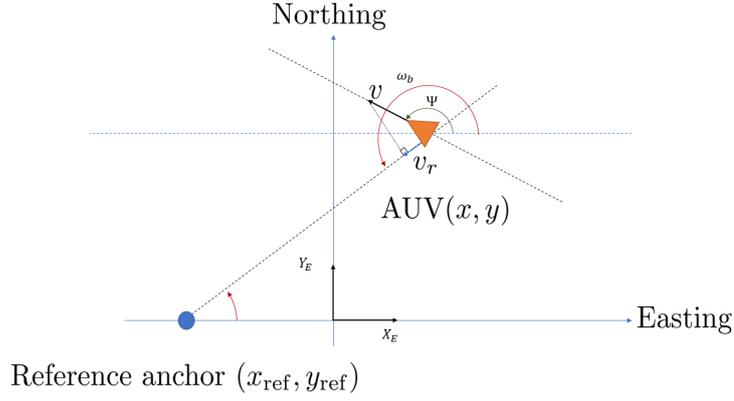


FIGURE 3.12 – Dynamique de l’AUV sur le plan 2D

de passage. L’équation d’état ne change pas et reste identique à (3.18). Grâce à ces simplifications, on peut obtenir la fonction d’évolution par la méthode d’Euler :

$$\mathbf{f}(\mathbf{z}, \mathbf{u}) = \begin{pmatrix} x + v \Delta_t \cos \psi \\ y + v \Delta_t \sin \psi \\ \psi + \Delta_t \Omega \\ v + \Delta_t a \\ \Omega \\ a \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Sur la figure 3.12 on note la position connue de la balise de référence $\mathbf{pos}_{\text{ref}}$.

$$\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (x_{\text{ref}} \quad y_{\text{ref}})^T \quad (3.24)$$

L’équation d’observation est définie comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{y}_k = g(\mathbf{z}_k) + \mathbf{v}_k & \text{si pas de communication ASM} \\ \mathbf{y}_k^{\text{com}} = g^{\text{com}}(\mathbf{z}_k) + \mathbf{v}_k^{\text{com}} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.25)$$

Avec $\mathbf{y}_k^{\text{com}}$ le vecteur d’observation et $g^{\text{com}}(\cdot)$ la fonction d’observation lorsque la communication a été reçue et décodée et respectivement \mathbf{y}_k et $g(\cdot)$ lorsque l’algorithme se met à jour sans démodulation de communication. Pour des raisons de simplification, nous ne traiterons pas ici de la mesure du GNSS hors initialisation et seulement de la norme de l’accélération (noté \hat{a}) et de la vitesse radiale (noté $\hat{\Omega}$)

fournis par l'[AHRS](#).

$$\mathbf{y}_k^{\text{com}} = \begin{pmatrix} \hat{d} \\ \hat{v}_r \\ \hat{\psi} \\ \hat{\Omega} \\ \hat{a} \end{pmatrix} \quad \mathbf{y}_k = \begin{pmatrix} \hat{\psi} \\ \hat{\Omega} \\ \hat{a} \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

Angle d'arrivée de la communication et vitesse relative

Obtenir la vitesse projetée à partir de \hat{v}_r nécessite deux angles, ω_b et ψ , comme illustré dans la figure 3.12. La variable ω_b représente l'angle d'arrivée de la communication vers l'AUV sur le plan 2D (*Bearing Angle* en anglais) tandis que ψ représente le cap de l'AUV. L'angle d'arrivée ω_b se définit à partir de l'équation suivante :

$$\omega_b = \arctan\left(\frac{y - y_{ref}}{x - x_{ref}}\right) + \pi \quad (3.27)$$

Cette valeur est en pratique calculée à partir du vecteur d'état prédit \mathbf{z}_p par le filtre d'estimation :

$$\begin{aligned} v_r &= v \cdot \cos(\omega_b - \psi) \\ \Rightarrow v &= \frac{v_r}{\cos(\arctan(y - y_{ref}, x - x_{ref}) - \psi + \pi)} \end{aligned} \quad (3.28)$$

De plus, en faisant le lien entre coordonnées d'un point par rapport à un point de référence et la distance qui les sépare, on rappelle :

$$D = \sqrt{(x - x_{ref})^2 + (y - y_{ref})^2 + (z - z_{ref})^2} \quad (3.29)$$

En particulierisant à l'espace en 2 dimensions, on obtient les fonctions d'observation suivantes :

$$\begin{aligned} g^{\text{com}}(\mathbf{z}) &= \left(\sqrt{(x - x_{ref})^2 + (y - y_{ref})^2} \quad -v \cos(\arctan(y - y_{ref}, x - x_{ref}) - \psi) \quad \hat{\psi} \quad \hat{\Omega} \quad \hat{a} \right)^T \\ g(\mathbf{z}) &= (\hat{\psi} \quad \hat{\Omega} \quad \hat{a})^T \end{aligned} \quad (3.30)$$

Le modèle dynamique est ensuite utilisé pour le fonctionnement des estimateurs présentés en section 2.4. Les chapitres 4 et 5 présenteront une simulation utilisant ce modèle et plusieurs expérimentations.

3.6 Conclusion

Ce chapitre détaille le système proposé dans le cadre de cette thèse. La partie liée au modem acoustique permet la gestion simultanée de la transmission à la seule balise de référence et le décodage des données. La forme d'onde comprenant l'ajout d'un signal pure-tone permet un calcul instantané et précis à la fois de l'effet Doppler, devant être estimé pour être compensé, mais également le temps de vol et la donnée utile. Le temps de vol et le décalage Doppler viendront également nourrir le système de positionnement et navigation en plus du système de communication interne au modem acoustique. Le système de positionnement et navigation est composé de trois parties : capteurs, estimateur, navigation. Quatre capteurs sont utilisés en plus du modem acoustique : GNSS, AHRS, SVS et capteur de pression. Le modèle dynamique général d'un AUV sur le plan 3D a été donné. Après simplification et passage sur le plan 2D, le modèle utilisé dans ce manuscrit est exprimé. Le passage du plan 2D à celui en trois dimension est implicite grâce à l'utilisation du capteur de pression qui donne une information fiable sur la valeur de profondeur du drone. Une démonstration de la performance de l'algorithme en deux dimensions permet alors d'envisager un fonctionnement en trois dimensions. Selon la mission, en petits fonds ou en grands fonds marin la balise fixe peut être installée en profondeur ou ancrée en surface. Pour la suite du manuscrit, nous considérerons le premier cas. Enfin, nous avons fait le lien qui permet d'exploiter l'effet Doppler estimé par le modem acoustique. D'abord transformé en vitesse relative v_r , il est lié à la vitesse de l'AUV grâce au cap ψ et à l'angle d'arrivée de la communication acoustique ω_b estimé par le filtre.

Chapitre 4

Simulation d'une mission et analyse de la performance

Sommaire

4.1	Introduction	65
4.2	Scénarios de test et définition de la simulation	66
	Algorithme de simulation : collecte de la donnée et synthèse des résultats	68
	Algorithme de positionnement	71
4.3	Résultats des simulations	76
4.4	Discussion et limitation de la simulation	92
	Analyse et discussion des résultats	93
	Limitations de la simulation	97

4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons introduit l'état de l'art des systèmes de positionnement et navigation et les challenges liés à de tels systèmes. Ensuite, nous avons développé dans le chapitre 3 une méthode de navigation qui lie des capteurs peu gourmands en énergie, en place et en coût avec un modem de communication [ASM](#) qui fournit avec précision (nous le verrons) deux informations cruciales à savoir la distance avec l'émetteur et le décalage Doppler, image du mouvement relatif entre émetteur et récepteur. Grâce à une forme d'onde et une modulation adaptée aux communications de données, ces informations de distance et de Doppler sont transmises aux éléments de filtrage, estimation et navigation. Nous allons dans ce chapitre présenter le développement et les résultats de cette architecture

de positionnement par le biais de simulations. Ce prototype va permettre de tester les limites des filtres estimateurs en fonctions des bruits de mesure, de la portée communication et bien d'autres paramètres avant de tester le système en conditions réelles dans le chapitre 5.

Premièrement, on définit les analyses que l'on souhaite faire pour évaluer la performance de l'algorithme. On chiffre ensuite les paramètres de la mission souhaitée et les variables permettant d'évaluer les résultats. Les simulations ont été développées avec le logiciel `Matlab`. Pour chaque scénario, les résultats de performance sont systématiquement comparés avec l'état de l'art (méthode `ROSB`, voir chapitre 2) et les valeurs de performances issues de la littérature. L'indice de performance utilisé est le *%etd* pour *percentage of error on travelled distance* en anglais, le pourcentage de l'erreur de positionnement sur la distance parcourue.

4.2 Scénarios de test et définition de la simulation

Nous avons choisi le logiciel `Matlab` pour la conception de la simulation du fait de la présence de nombreux modules mathématiques et matriciels adaptés aux simulations numériques facilitant le développement. A noter qu'une réalisation au moyen du langage Python aurait pu être également envisagée, mais les *drivers* des cartes d'acquisition National Instrument (voir chapitre 5) étant disponibles uniquement en Matlab, le langage Python a été écarté.

L'architecture globale de l'algorithme est décrite en figure 4.1, elle comporte deux parties distinctes qui échangent des données de façon itérative : l'algorithme d'estimation et de positionnement en lui même (qu'il sera possible d'alimenter avec des données réelles ou simulées) et l'algorithme générant la simulation (Trajectoire, bruits, et récolte des résultats). Le deuxième algorithme, que l'on appellera *Simulation algorithm* est basé sur la méthode de Monte-Carlo. Toutes les données de bruits sont randomisées et on réalise plusieurs fois la simulation pour moyenniser les résultats. De cette manière, la fiabilité de l'algorithme développé est testée au moyen d'un grand nombre de rejeu de la simulation (jusqu'à 10000 fois). Les paramètres de la simulation sont les suivants :

- La durée de la mission simulée (t_{\max}).
- Le nombre de réalisations de la simulation.
- Les bruits engagés pour chaque mesure (y compris la position initiale estimée par le `GPS`). Ils sont des bruits additifs blancs Gaussiens, générés de manière aléatoire. Ils sont différents lors de chaque mission.
- Le temps de rafraîchissement de l'algorithme (Δ_t).

- Le temps entre chaque communication *ASM* (T_{com}).
- La position de la balise.
- Le choix de la trajectoire (boustrophedon ou lemniscate) et sa taille.

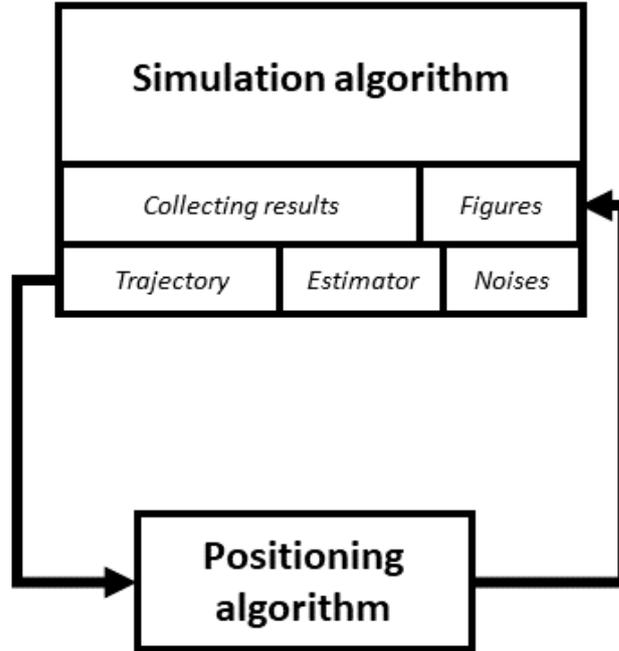


FIGURE 4.1 – Architecture globale de l'algorithme Matlab

La mission simulée se déroule en deux dimensions. On ne simule pas les effets de l'environnement (tels que les effets de courant, températures, obstacles...). L'AUV est contrôlé par le vecteur commande décrit en (3.22) donc en accélération et vitesse angulaire. Ces valeurs sont calculées grâce à un bouclage linéarisant [52]. La boucle calcule la commande de contrôle pour chaque étape. Cela signifie que nous nous concentrons uniquement sur un système de positionnement et non sur un système de navigation qui nécessiterait de fermer la boucle. Cette méthode est présentée dans [53]. Nous définissons l'équation d'état de la trajectoire pour le bouclage linéarisant avec le vecteur d'état $\dot{\mathbf{X}}$ tel que :

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cdot \cos(\psi) \\ v \cdot \sin(\psi) \\ u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

On a

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_2 \cdot \cos(\psi) - u_1 \cdot v \cdot \sin(\psi) \\ u_2 \cdot \sin(\psi) + u_1 \cdot v \cdot \cos(\psi) \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Ce qui nous donne

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -v \cdot \sin(\psi) & \cos(\psi) \\ v \cdot \cos(\psi) & \sin(\psi) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

En faisant les poles en -1 au second degré, on obtient

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x_d - x) + 2(\dot{x}_d - \dot{x}) + \ddot{x}_d \\ (y_d - y) + 2(\dot{y}_d - \dot{y}) + \ddot{y}_d \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Ce qui implique

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x_d - x) + 2(\dot{x}_d - v \cdot \cos(\psi)) + \ddot{x}_d \\ (y_d - y) + 2(\dot{y}_d - v \cdot \sin(\psi)) + \ddot{y}_d \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

où (x_d, y_d) désignent les coordonnées 2D de la trajectoire.

En conclusion, le bouclage linéarisant est construit de la façon suivante :

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -v \sin(\psi) & \cos(\psi) \\ v \cos(\psi) & \sin(\psi) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (x_d - x) + 2(\dot{x}_d - v \cdot \cos(\psi)) + \ddot{x}_d \\ (y_d - y) + 2(\dot{y}_d - v \cdot \sin(\psi)) + \ddot{y}_d \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Le modèle est mis à jour à chaque instant Δ_t par l'équation suivante :

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}(t - \Delta_t) + f_t(\mathbf{X}, \mathbf{u}) \cdot \Delta_t \quad (4.7)$$

avec $f_t(\mathbf{X}, \mathbf{u})$ défini par

$$f_t(\mathbf{X}, \mathbf{u}) = \begin{pmatrix} v \cdot \cos(\psi) \\ v \cdot \sin(\psi) \\ u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \dot{\mathbf{X}} \quad (4.8)$$

car :

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}(t - \Delta_t) + f_t(\mathbf{X}, \mathbf{u}) \cdot \Delta_t \iff \frac{\mathbf{X}(t) - \mathbf{X}(t - \Delta_t)}{\Delta_t} = \dot{\mathbf{X}} \quad (4.9)$$

Pour la trajectoire choisie, $\dot{\mathbf{X}}$ est calculé une seule fois à l'avance par l'algorithme de simulation.

Algorithme de simulation : collecte de la donnée et synthèse des résultats

Cette section est centrée sur l'algorithme de simulation du scénario. Comme le montre la figure 4.1, il est chargé de simuler la trajectoire, l'environnement et

de collecter les résultats. Pour cela, il envoie les paramètres précédemment cités pour que l’algorithme de positionnement réalise l’entièreté d’une mission simulée le nombre de fois demandé. Les bruits de mesure et d’estimation sont simulés en fonction des bruits classiques pour des capteurs peu onéreux. Ces valeurs seront présentées en détail dans la partie résultat, avec le capteur qui a servi de référence.

La collecte des résultats des missions simulées se fait à chaque nouvelle mission. On récupère :

- Tous les bruits randomisés pour faire une moyenne, une médiane et les premiers et troisièmes quartiles.
- Les vecteurs d’état réels de l’AUV simulé. Comme vu au chapitre précédent, ils comprennent la position, la vitesse, le cap, l’angle d’arrivée de la communication, la vitesse angulaire et l’accélération.
- Les vecteurs d’état estimés par l’algorithme.
- Les matrices de covariance, sorties du filtre estimateur. Elles serviront à afficher graphiquement des ellipses de confiance autour de la valeur de position estimée.
- Les valeurs de moyenne et de variance de l’erreur de position.

Lorsque le nombre de missions simulées a été atteint, les données collectées ci-dessus sont synthétisées. La figure 4.2 montre la différence entre précision (*precision*) et exactitude (*accuracy*). Un algorithme de positionnement précis mais pas exact signifie que la variance de l’erreur de positionnement est proche de 0 mais la moyenne de l’erreur est élevée. A l’inverse, un algorithme exact mais peu précis signifie que la moyenne de l’erreur est proche de 0 mais la variance est élevée.

La synthèse des résultats regroupe toutes les valeurs, les statistiques d’ordre 1 et 2, les divergences ou les éventuelles valeurs aberrantes et enfin donne un résultat final graphique et statistique. Une fois que les moyennes, variances et erreurs quadratiques moyennes sont obtenues, un tri est effectué pour éliminer les valeurs aberrantes et les comptabiliser comme telles. On choisit les résultats d’une mission simulée comme étant valeurs aberrantes si la moyenne de l’erreur de positionnement M_e valide l’une des deux équations suivantes :

$$\begin{aligned} M_e &> Q_3 + w \cdot (Q_3 - Q_1) \\ M_e &< Q_1 + w \cdot (Q_3 - Q_1) \end{aligned} \tag{4.10}$$

où w est le multiplicateur *Whisker* (que l’on choisira à 1.5), et Q_1 et Q_3 sont les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles respectivement (méthode *Turkey’s fences* également appelé méthode des interquartiles [86]).

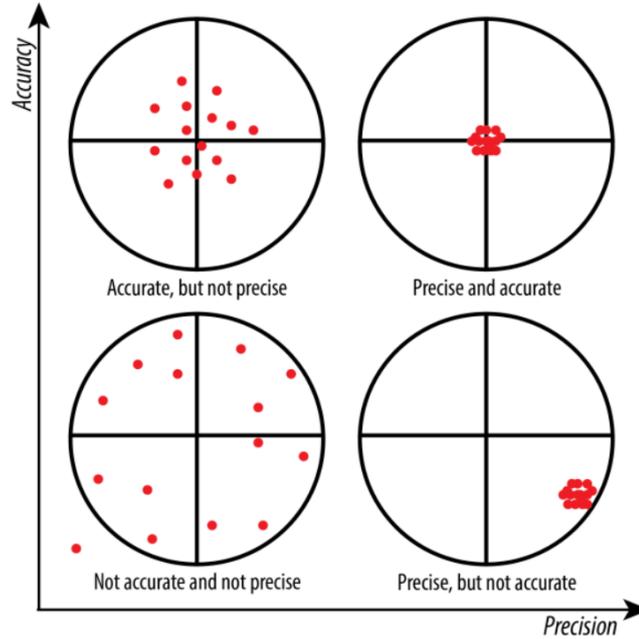


FIGURE 4.2 – Différences entre précision et exactitude [82]

La synthèse des résultats se fait donc à la fois graphiquement et statistiquement. Graphiquement, on affiche la meilleure mission simulée, la moins bonne et la moyenne. Il est possible d’y ajouter les ellipses de confiances correspondantes calculées par l’estimateur. On montre l’erreur moyenne de positionnement absolue et relative puis enfin l’erreur quadratique moyenne. Pour les variables d’états (réelles et estimées) et de mesures (réelles et mesurées), on représente la boîte à moustache de l’erreur pour chaque valeur, ainsi que les courbes réelles et mesurées/estimées qui correspondent. Cela fait en tout 17 figures pour une simulation complète. Statistiquement, on affiche la moyenne de l’erreur de positionnement M_e au global puis M_e en excluant les missions ayant divergées (valeurs aberrantes) ainsi que le nombre de divergences. On obtient également la variance de l’erreur de positionnement en excluant les divergences. Le reste des statistiques et des valeurs ne sont pas affichées mais il est possible grâce à `Matlab` d’accéder à toutes les variables et de rejouer une mission spécifique.

Une simulation de canal `ASM` basée sur le modèle statistique de [81] et développée par l’équipe `SEACOM` a été utilisée. En effet, au lieu de simuler les valeurs de distance (normalement estimées par les temps de vol) et les valeurs de vitesse relative (estimées par l’effet Doppler) par des bruits aléatoires blancs Gaussiens, il est possible de faire un intermédiaire. L’algorithme de positionnement appelle à réception d’une trame de communication `ASM` non pas une fonction qui renvoie

des valeurs de bruits cohérents du point de vue capteur mais des résultats de simulation de canal [ASM](#). Cette intégration dans la boucle des algorithmes a été utile en particulier pour les expérimentations qui ont suivies. Il suffisait de remplacer les sorties de la simulation acoustique sous-marine par la sortie de l'hydrophone. Cependant ces résultats ne seront pas abordés dans ce manuscrit car il a été préféré d'avoir une gestion précise des bruits engagés. Par exemple, il est possible d'ajouter des valeurs aberrantes ou non présentes pour simuler ce qui pourrait arriver dans la réalité.

Algorithme de positionnement

L'algorithme de positionnement est le coeur du travail présenté dans ce manuscrit. C'est lui qui sera utilisé dans les simulations et dans les expérimentations. Les noms des vecteurs, des matrices et des fonctions sont repris du chapitre [3](#). La structure de l'algorithme est représentée par la figure [4.3](#).

L'initialisation des paramètres correspond à tout ce qui définit la mission. Il s'agit de l'ensemble des éléments vus en section [4.2](#) en dehors du bruit en y rajoutant les paramètres en entrée du filtre estimateur vus au chapitre [3](#) : les matrices de covariance \mathbf{Q} et \mathbf{R} et les fonctions d'observation $g(\cdot)$ et $g^{\text{com}}(\cdot)$ ainsi que la fonction d'évolution $f(\cdot)$. Les valeurs des matrices de covariance du bruit d'état \mathbf{Q} et de mesure \mathbf{R} sont des constantes définies à l'avance. Elles jouent un rôle capital dans la précision de l'estimateur comme nous le verrons dans la partie résultat. Ce sont des matrices diagonales dont la taille est identique à celle des vecteurs d'état et de mesure. On définit les vecteurs \mathbf{var}_Q et \mathbf{var}_R tels que :

$$\begin{aligned}\mathbf{Q} &= \text{diag}(\mathbf{var}_Q) \\ \mathbf{R} &= \text{diag}(\mathbf{var}_R)\end{aligned}\tag{4.11}$$

où $\text{diag}(\mathbf{x})$ désigne une matrice diagonale dont les termes diagonaux sont égaux au vecteur \mathbf{x} . L'initialisation des bruits de mesure est en lien avec le vecteur $\mathbf{y}_k^{\text{com}}$ que l'on rappelle ci-dessous :

$$\mathbf{y}_k^{\text{com}} = (\hat{d} \ \hat{v}_r \ \hat{\psi} \ \hat{\Omega} \ \hat{a})^T\tag{4.12}$$

A chaque mesure on y ajoute un bruit aléatoire blanc gaussien, défini à l'avance dans un tableau de taille t_{max}/Δ_t . Le niveau du bruit est contrôlable librement et on choisit un niveau similaire à une gamme de capteurs spécifiques. Il est possible d'ajouter des valeurs aberrantes ou de simuler une coupure de mesure.

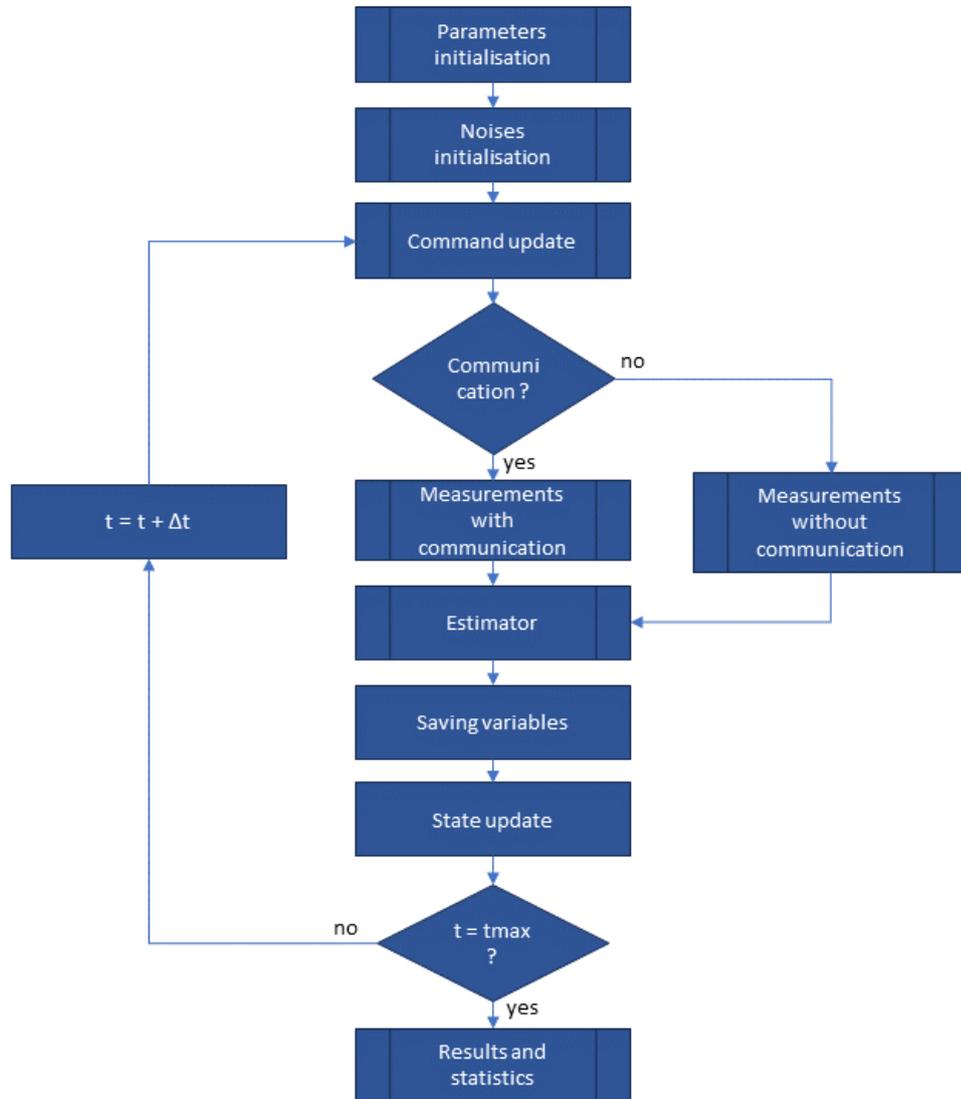


FIGURE 4.3 – Logigramme de l’algorithme de positionnement

La mise à jour de la commande fait référence à la partie bouclage linéarisant développée en section 4.2. C’est la première fonction appelée à chaque itération à partir du début de la mission. On obtient le vecteur commande \mathbf{u} (que l’on rappelle composé de la commande en accélération et en vitesse angulaire) à partir du vecteur d’état \mathbf{X} . Le vecteur commande sert de deux manières dans la simulation : premièrement à simuler à chaque instant la commande du drone donc à mettre à jour l’état à chaque itération et deuxièmement à nourrir la mesure de l’IMU simulée.

Pour la simulation, on choisit deux trajectoires différentes comme précisé plus

tôt dans le manuscrit : la lemniscate de Bernoulli et le boustrophedon. Ces trajectoires sont souvent utilisées en robotique. Elles sont représentées en figure 4.4. Dans le cadre du positionnement de drone, l'avantage d'utiliser ces deux trajectoires est que dans le cas de la lemniscate on retrouve un croisement, une linéarité (pas de changement brusque de vitesse ou d'angle) et une boucle et dans l'autre cas de longues lignes droites à angle de cap constant mais des virages à 180°.

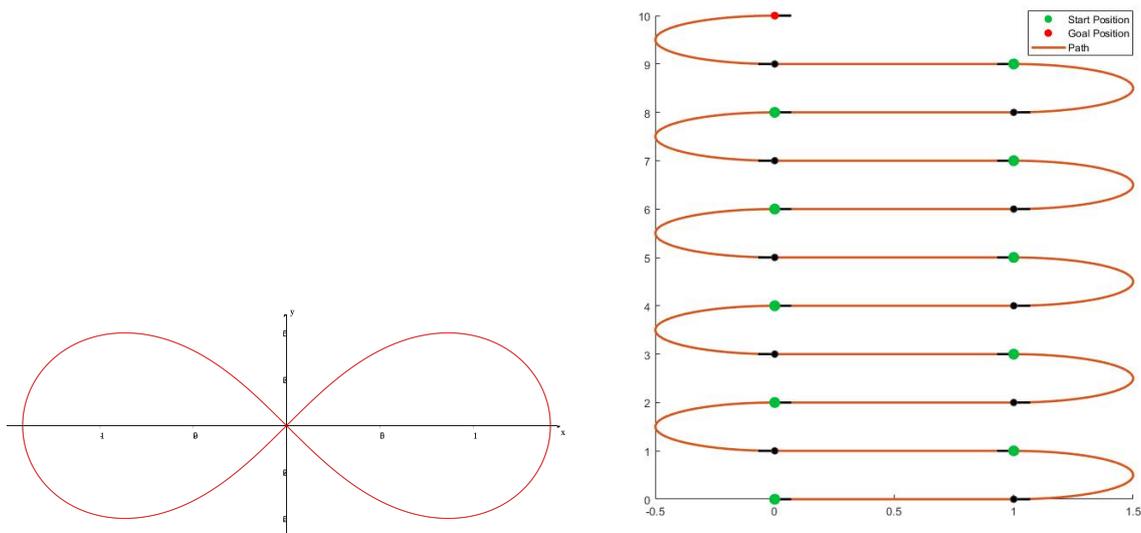


FIGURE 4.4 – Lemniscate de Bernoulli à gauche, boustrophedon à droite.

La lemniscate se définit par l'équation suivante :

$$\begin{cases} x_d(t) = a \cdot \sin(f_1 t) / (1 + \cos(f_1 t)^2) \\ y_d(t) = a \cdot \sin(f_1 t) \cdot \cos(f_1 t) / (1 + \cos(f_1 t)^2) \end{cases} \quad (4.13)$$

Cette équation est ensuite dérivée pour obtenir (\dot{x}_d, \dot{y}_d) et (\ddot{x}_d, \ddot{y}_d) . On choisit l'amplitude $a = 500$ m et la fréquence $f_1 = 0.0045$ Hz de façon à régler respectivement l'envergure et la fréquence de la boucle qui impacteront la commande.

Dans le cas de la trajectoire boustrophedon, il n'existe pas à notre connaissance une équation similaire pour former une trajectoire. Pour arriver à extraire une paire (x_d, y_d) , nous allons utiliser la fonction `dubinsConnection` de la boîte à outil Matlab appelé Navigation Toolbox/Motion Planning. Cette fonction est conçue

initialement pour la modélisation du chariot de Dubins, modélisé par :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cdot \cos(\psi) \\ \dot{y} = v \cdot \sin(\psi) \\ \dot{\psi} = u \end{cases} \quad (4.14)$$

La commande u du robot est assurée par la vitesse angulaire uniquement. Cette modélisation est proche de celle que l'on utilise dans le cadre de notre simulation, excluant uniquement l'accélération du drone. Nous allons l'utiliser pour construire une trajectoire de type boustrophedon grâce à un enchaînement relié de chemin de Dubins. Le chemin emprunté est dit "SLSR" pour *Straight-Left-Straight-Right* donc ligne droite puis virage à gauche puis ligne droite puis virage à droite. Un exemple

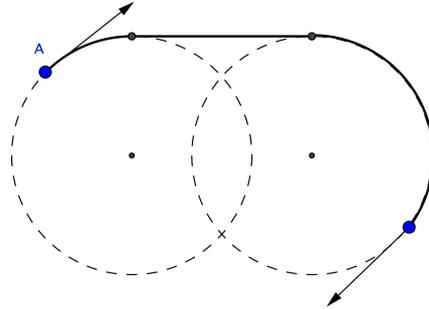


FIGURE 4.5 – Chemin de Dubins "RSR".

de chemin "RSR" est montré figure 4.5 et le résultat final de la construction est montré en figure 4.4 à droite. Le résultat final comporte ici 5 itérations SLSR. Nous choisissons les paramètres suivants :

- Rayon de braquage minimum : 20 m
- Distance des lignes droites : 180 m
- Largeur entre deux lignes droites : 40 m

Pour obtenir finalement des valeurs (x_d, y_d) , (\dot{x}_d, \dot{y}_d) et (\ddot{x}_d, \ddot{y}_d) , on interpole le chemin créé à la période Δ_t jusqu'au dernier point $k_{\max} = t_{\max}/\Delta_t$. Ensuite, on réalise le bouclage linéarisant de la même manière que pour la trajectoire lemniscate. On obtient alors un vecteur de taille k_{\max} correspondant aux commandes \mathbf{u} .

La partie mesure est divisée en deux parties : les mesures comprenant l'arrivée d'une communication ASM ($\mathbf{y}_k^{\text{com}}$) et les mesures se basant uniquement sur la

navigation à l'estime (\mathbf{y}_k). La période T_{com} entre deux communications [ASM](#) est définie lors de l'initialisation des paramètres. La condition est vérifiée si

$$\text{mod}(t, T_{\text{com}}) = 0 \quad (4.15)$$

On rappelle que t est l'instant en seconde de la mission simulée (et non la k -ième itération $k = t/\Delta_t$).

L'algorithme d'estimation qui suit dépend du type d'estimateur choisi. Les estimateurs choisis ainsi que leurs algorithmes sont détaillés dans le chapitre 2. Nous choisissons de sélectionner les filtres [UKF](#) et [EKF](#). Pour le filtre [EKF](#), avec les fonctions $f(z)$ et $g_{\text{com}}(z)$ déterminées en chapitre 3, on calcule les jacobiennes suivantes :

$$\mathbf{A} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{z}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -v \cdot \Delta_t \cdot \sin(\psi) & \Delta_t \cdot \cos(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & v \cdot \Delta_t \cdot \cos(\psi) & \Delta_t \cdot \sin(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\partial g_{\text{com}}}{\partial \mathbf{z}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ A \cdot (x - x_{\text{ref}}) & A \cdot (y - y_{\text{ref}}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -B \cdot (y - y_{\text{ref}}) & B \cdot (x - x_{\text{ref}}) & -v \cdot \sin(C) & -\cos(C) & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

Avec :

$$A = \frac{1}{\sqrt{(x - x_{\text{ref}})^2 + (y - y_{\text{ref}})^2}}$$

$$B = \frac{v \cdot \sin(\arctan(y - y_{\text{ref}}, x - x_{\text{ref}}) - \psi)}{(x - x_{\text{ref}})^2 + (y - y_{\text{ref}})^2}$$

$$C = \arctan(y - y_{\text{ref}}, x - x_{\text{ref}}) - \psi$$

Et enfin :

$$\mathbf{H} = \frac{\partial g}{\partial \mathbf{z}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Le filtre [UKF](#) quant à lui ne dépend pas de jacobienne puisqu'il utilise les transformées sans parfum. Dans les deux cas, les estimateurs fonctionnent avec le vecteur de mesure complet ($\mathbf{y}_k^{\text{com}}$) ou raccourcis (\mathbf{y}_k). L'estimation $\hat{\mathbf{z}}$ est moins précise en

navigation à l'estime mais reste fonctionnelle grâce à la fonction d'évolution $f(\cdot)$.

Le bloc de sauvegarde des variables correspond à l'enregistrement à chaque itération des valeurs d'état et de mesures réelles, des valeurs d'état estimées ($\hat{\mathbf{z}}$) et de mesures bruitées et enfin des statistiques d'erreur : la racine de l'erreur quadratique moyenne ou **Root Mean Square Error (RMSE)** et l'erreur de positionnement. A la fin de la mission simulée, ce sont ces variables qui permettent d'en extraire les résultats et d'en faire l'analyse. La **RMSE** est calculée par la norme de la diagonale des deux premières lignes de la matrice de covariance \mathbf{P}_k . Ces lignes correspondent à la position estimée en abscisse et la position estimée en ordonnée. L'erreur de positionnement est la norme de la différence entre le vecteur $(x_k, y_k)^T$ correspondant à la position réelle et le vecteur $(\hat{x}_k, \hat{y}_k)^T$ correspondant à la position estimée en sortie du filtre estimateur.

La dernière étape avant re-bouclage est la mise à jour de l'état. On met à jour l'état grâce à l'équation (4.7) précédemment mentionnée. En pratique, avec la même fonction $f_t(\cdot)$ elle s'écrit :

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} + f_t(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) \cdot \Delta_t \quad (4.19)$$

Enfin, la fin de la mission simulée est déterminée par t_{\max} , le temps maximal en seconde défini au préalable dans l'algorithme de simulation. Si la durée de la mission est atteinte, alors une compilation des résultats, des statistiques et des bruits associés à cette mission spécifique est réalisée et envoyée à l'algorithme de simulation pour relancer des missions supplémentaires jusqu'à atteindre le nombre requis par l'utilisateur.

4.3 Résultats des simulations

Pour décrire du mieux possible la performance de l'algorithme de positionnement, nous allons effectuer plusieurs scénarios de test. La vitesse linéaire de l'**AUV** varie entre 1.94 et 5.83 noeuds ce qui correspond à 1 m/s et 3 m/s. Nous choisissons de fixer Δ_t à 250 ms pour toutes les simulations. Cela correspond à une fréquence de navigation à l'estime de 4 Hz. Bien que toutes les centrales inertielles fonctionnent à des fréquences plus élevées, allant de 10 Hz pour les plus low-cost jusqu'à 200 à 500 Hz pour les plus performantes, nous n'avons pas observé une différence significative au delà de 4 Hz. Par ailleurs, comme les expérimentations proposées au chapitre 5 fonctionnent à faible fréquence de rafraîchissement de l'algorithme de positionnement, ce choix de 4 Hz a été pris. Si un **AUV** se déplace à une vitesse de 3 m/s avec un rafraîchissement de l'algorithme toutes les 0.25 s, le déplacement non visible est de 75 cm ce qui est acceptable. Les scénarios sont les suivants :

1. Pour une trajectoire lemniscate de durée $t_{\max} = 1550$ s (soit un peu moins de 26 minutes), nous allons effectuer 6 simulations pour T_{com} valant 3, 6, 9, 12, 15 et 20 secondes. La balise sera placée dans la boucle de gauche. Cette simulation sera reproduite pour les deux filtres de Kalman : l'étendu et le sans parfum.
2. Pour une trajectoire lemniscate de durée $t_{\max} = 1550$ s, nous allons effectuer 2 simulations supplémentaires pour T_{com} valant 6 secondes mais avec la balise dans la boucle de droite puis sous les boucles, au centre. Nous reproduirons ces simulations avec l'état de l'art [ROSB](#) [66], pour comparaison.
3. Pour une trajectoire lemniscate de durée $t_{\max} = 1550$ s, T_{com} valant 6 secondes et la balise à gauche, nous allons effectuer 2 simulations supplémentaires à faible bruit et grand bruit de mesure. Le niveau de bruit intermédiaire étant réalisé par le premier scénario. On comparera ces valeurs à l'état de l'art ([ROSB](#)).
4. Pour une trajectoire boustrophedon de durée $t_{\max} = 1550$ s, 6 simulations sont réalisées pour T_{com} valant 3, 6, 9, 12, 15 et 20 secondes. On placera la balise au milieu de la mission. On comparera ces valeurs à l'état de l'art ([ROSB](#)).
5. Pour une trajectoire boustrophedon de durée $t_{\max} = 4800$ s soit environ 80 minutes, 6 simulations sont réalisées pour T_{com} valant 3, 6, 9, 12, 15 et 20 secondes. On placera la balise de nouveau au milieu.
6. Pour une trajectoire boustrophedon de durée $t_{\max} = 1550$ s et T_{com} fixée à 9 secondes, nous allons faire 5 simulations avec des placements de la balise différents. Pour comparer les performances de l'[UKF](#) et de l'[EKF](#), nous appliquerons les mêmes niveaux de bruits et les mêmes paramètres aux deux filtres.
7. Pour terminer, avec une trajectoire boustrophedon de durée $t_{\max} = 1550$ s, T_{com} fixée à 9 secondes et la balise au milieu, 2 nouvelles simulations seront effectuées avec des niveaux de bruits de mesure faibles et forts.

Le tableau [4.1](#) résume l'ensemble des paramètres des 7 scénarios.

Les résultats sont synthétisés au moyen de tableaux et lorsque cela est pertinent et lisible, ces résultats sont illustrés par une figure. L'analyse (discussion et limitation) sera faite section suivante. En dehors de la simulation numéro 4 qui moyenne sur 300 missions simulées, les résultats des simulations sont obtenus avec 200 missions simulées. On observe une infime variation dans les résultats, de l'ordre de 0,1 m pour l'erreur moyenne, à partir de 150 missions simulées si bien que le choix de 200 itérations nous a semblé judicieux.

Scenarios	t_{\max} (s)	T_{com} (s)	Trajectoire	Pos. balise	Niv. Bruit
1	1550	3 – 20	Lemniscate	Fixe	Intermédiaire
2	1550	6	Lemniscate	Variable	Intermédiaire
3	1550	6	Lemniscate	Fixe	Faible à fort
4	1550	3 – 20	Boustrophedon	Fixe	Intermédiaire
5	4800	3 – 20	Boustrophedon	Fixe	Intermédiaire
6	1550	9	Boustrophedon	Variable	Intermédiaire
7	1550	9	Boustrophedon	Fixe	Faible à fort

TABLE 4.1 – Paramètres des scénarios de simulation

Pour des besoins de clarté sur les tableaux qui seront présentés, on abrège "erreur de positionnement" en **E-P**. On abrège également "pourcentage de l'erreur sur la distance parcourue" en %etd. Enfin, on écrit "valeur aberrante" par son terme anglais plus court, "outliers". La première colonne des tableaux de résultat représentera toujours la variable étudiée dans le scénario : niveau de bruit sur la mesure, période des communications $ASM T_{\text{com}}$, placement de la balise de référence ou encore le filtre de Kalman utilisé. Le pourcentage de l'erreur sur la distance parcourue sera affiché de deux façons pour être comparable à l'ensemble de l'état de l'art industriel. En effet, certains fabricants de système de positionnement affichent cette valeur en se basant sur l'erreur maximale rencontrée après essais. D'autres se basent plutôt sur l'erreur moyenne observée après essais.

La variance de l'erreur de positionnement est la variance de l'erreur de positionnement moyen, sur le nombre de missions simulées, au cours du temps. Les niveaux de bruit engagés sont décrits en figures 4.6, 4.7 et 4.8. Pour simplification, on désigne les erreurs de mesure comprenant les erreurs aléatoires (bruits) et les erreurs systématiques (biais) comme étant des bruits car nous n'avons pas rajouter d'erreur systématique.

Les bruits Gaussiens blancs centrés sur 0 provenant de l'**IMU** (accélération et vitesse angulaire) sont également ajoutés, avec des valeurs comprises entre $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$ et $\pm 0.1 \text{ s}^{-1}$. On ne décide cependant pas de les faire varier, car le résultat est sensiblement identique et on souhaite mettre en valeur les variations de cap, distance et vitesse relative. Les bruits de l'angle de cap, de l'accélération et de la vitesse angulaire de l'**IMU** sont repris pour la gamme de capteur similaire à celui d'un **Xsens MTI-630**. En août 2023, son prix hors taxe s'élève à 1220 euros. Dans la réalité le bruit est inférieur (cf chapitre 5) mais il a été choisi d'augmenter le bruit, qui reste centré sur 0 tout le long de la mission, pour compenser l'effet de biais classique à l'utilisation d'une centrale inertielle **MEMS**. Ce biais n'est donc pas simulé ici, mais le bruit de mesure est augmenté. Les mesures liées aux

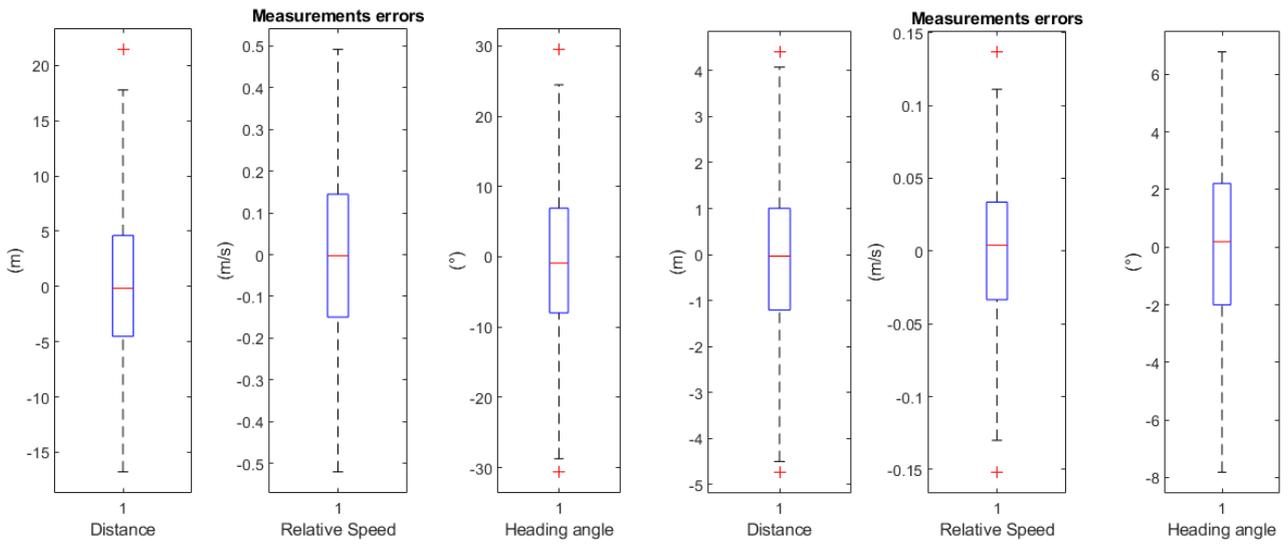


FIGURE 4.6 – Niveau de bruit fort

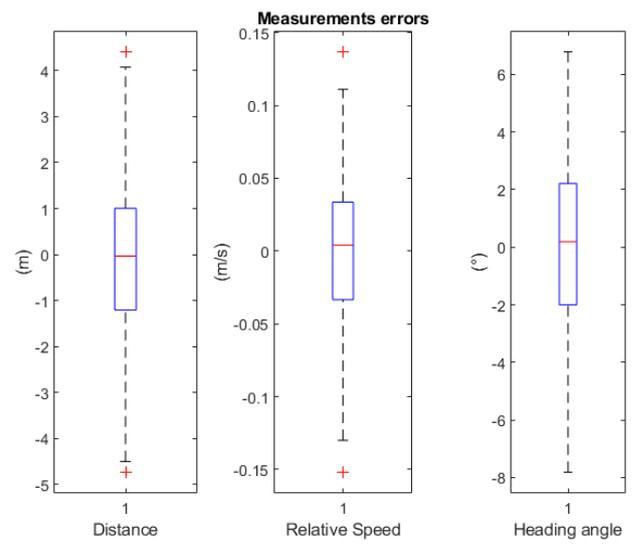


FIGURE 4.7 – Niveau de bruit faible

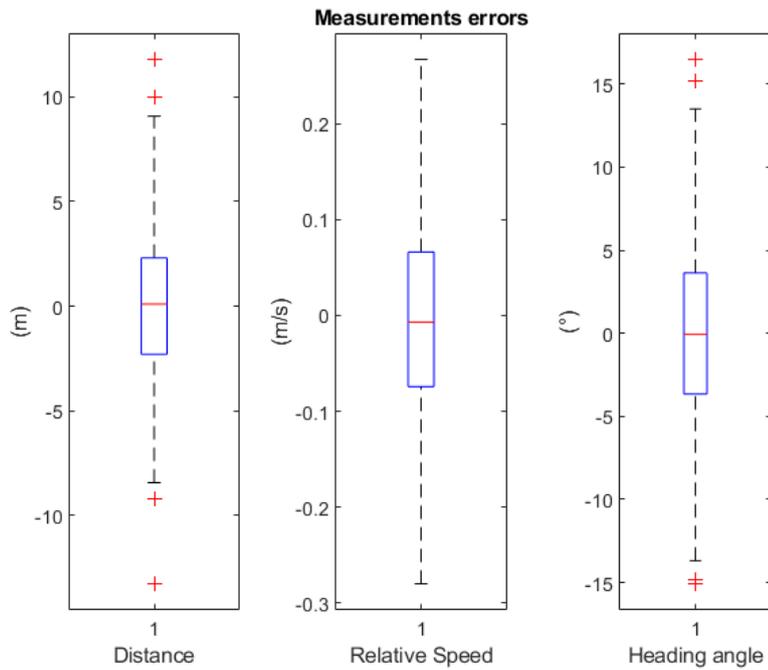


FIGURE 4.8 – Niveau de bruit intermédiaire

communications [ASM](#) ne comportent, quant à elles, pas de biais au cours du temps.

Le bruit du [GPS](#) à l'initialisation est fixé à ± 20 cm. Un plus grand bruit a été

testé mais tant qu'il est inférieur à ± 5 m, il n'impacte pas le reste de la mission au delà des premiers mètres. Pour les deux trajectoires, le début de la mission est à la coordonnée $X_0 = (0, 0)$. La lemniscate de Bernoulli fait une boucle complète à $t_{\max} = 1550$ s. Pour les filtres de Kalman utilisés, les valeurs des matrices \mathbf{R} et \mathbf{Q} sont définies de la façon suivante :

$$\begin{aligned}\mathbf{Q} &= \text{diag}(\mathbf{var}_Q) = \text{diag}(\Delta_t^8, \dots, \Delta_t^8) = \text{diag}(0.25^8, \dots, 0.25^8) \\ \mathbf{R} &= \text{diag}(\mathbf{var}_R) = \text{diag}(1 \ 0.005 \ 0.005 \ 12 \ 0.2)\end{aligned}\tag{4.20}$$

Avec $\mathbf{var}_Q \in \mathbb{R}^{1 \times 6}$ et $\mathbf{var}_R \in \mathbb{R}^{1 \times 5}$.

Ces matrices de covariance seront fixes pour toutes les simulations effectuées. Ces matrices sont extrêmement importantes pour garder une meilleure précision de positionnement possible. Ici, on a choisi ces valeurs pour être efficace à un niveau de bruit moyen. Lorsque le niveau de bruit est plus faible ou plus fort, ces valeurs impactent négativement la précision de l'estimation par le filtre de Kalman.

Scénario 1 : Lemniscate, position balise fixe, T_{com} variable, bruit moyen

La distance parcourue pour ce scénario est de 2876 mètres, en un peu moins de 26 minutes. Cela représente une vitesse moyenne de 1.85 m/s environ. Nous réalisons ce scénario 2 fois, une fois avec le filtre de Kalman sans parfum, **UKF** dont les résultats sont donnés en tableau 4.2 et illustrés en figure 4.9, et une autre fois avec le filtre de Kalman étendu, **EKF** dont les résultats sont donnés en tableau 4.3. On place la balise à la coordonnée $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (-250, 0)$.

T_{com}	E-P moyen (outliers) en m	Variance de l'E-P	%etd max	%etd moyen
3 secondes	7.3156 (10)	13.0630	0.5594	0.2544
6 secondes	9.9829 (5)	21.5162	0.7249	0.3471
9 secondes	12.9365 (8)	37.9994	0.9721	0.4498
12 secondes	14.6553 (8)	54.2013	1.1956	0.5095
15 secondes	17.2209 (8)	79.0160	1.4083	0.5988
20 secondes	21.6703 (10)	143.1005	1.9550	0.7535

TABLE 4.2 – Résultat du scénario 1 pour 200 missions simulées avec le filtre **UKF**.

On ne note aucune divergence de l'estimation dans les résultats, et on constate peu de différences graphiques entre l'**UKF** et **EKF** mais une différence dans les valeurs de performances. En effet, dans les chiffres d'erreur de positionnement, donc en précision, l'estimateur **UKF** est toujours meilleur. Cependant, à l'exception

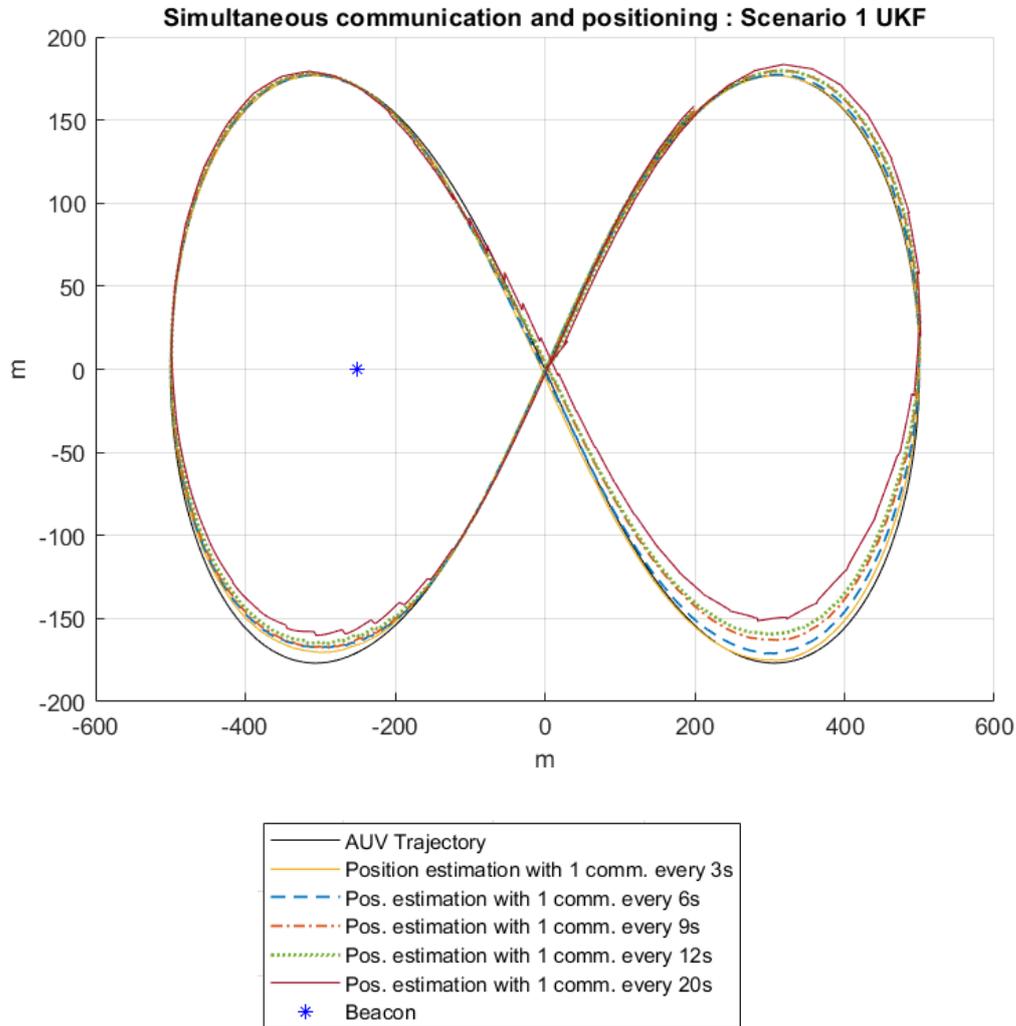


FIGURE 4.9 – Scénario 1, Vue de dessus à deux dimensions de l’estimation de position moyenne par rapport à la position réelle de l’AUV en noir.

de $T_{\text{com}} = 3$ s, les erreurs de positionnement varient moins ce qui signifie que l’estimateur **EKF** est légèrement plus exact que l’**UKF**.

Scénario 2 : Lemniscate, position balise variable, $T_{\text{com}} = 6$ s, bruit moyen

La distance parcourue et le temps d’une mission simulée sont identiques au scénario précédent. Nous réalisons ce scénario 2 fois, une fois avec l’algorithme de positionnement proposé et une autre fois avec l’état de l’art **ROSB** pour comparaison. On place les balises aux coordonnées :

T_{com}	E-P moyen (outliers) en m	Variance de l'E-P	%etd max	%etd moyen
3 secondes	8.5484 (17)	16.6711	0.5978	0.2972
6 secondes	10.9143 (26)	21.8607	0.6975	0.3795
9 secondes	13.5046 (16)	33.1089	0.9462	0.4695
12 secondes	15.8217 (19)	49.4878	1.2288	0.5501
15 secondes	18.1863 (17)	75.6246	1.4951	0.6323
20 secondes	22.4880 (19)	142.9808	2.0930	0.7819

TABLE 4.3 – Résultat du scénario 1 pour 200 missions simulées avec le filtre [EKF](#).

- Gauche : $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (-250, 0)$
- Droite : $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (250, 0)$
- Centre sud : $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (0, -200)$

Algo / Position balise	E-P moyen (outliers) en m	Variance de l'E-P	%etd max	%etd moyen
Algo proposé / gauche	9.9829 (5)	37.9994	0.9721	0.4498
Algo proposé / droite	10.4152 (8)	18.6930	0.7077	0.3621
Algo proposé / Centré sud	9.6454 (1)	20.9180	0.6284	0.3354
ROSB / gauche	10.8909 (9)	26.2174	0.8414	0.3787
ROSB / droite	11.7529 (8)	23.1190	0.8355	0.4086
ROSB / Centré sud	10.0143 (3)	19.8646	0.6522	0.3482

TABLE 4.4 – Résultat du scénario 2 pour 200 missions simulées avec le filtre [UKF](#). Comparaison entre l'algorithme proposé et la méthode [ROSB](#).

On ne note aucune divergence de l'estimation dans les résultats, et on constate

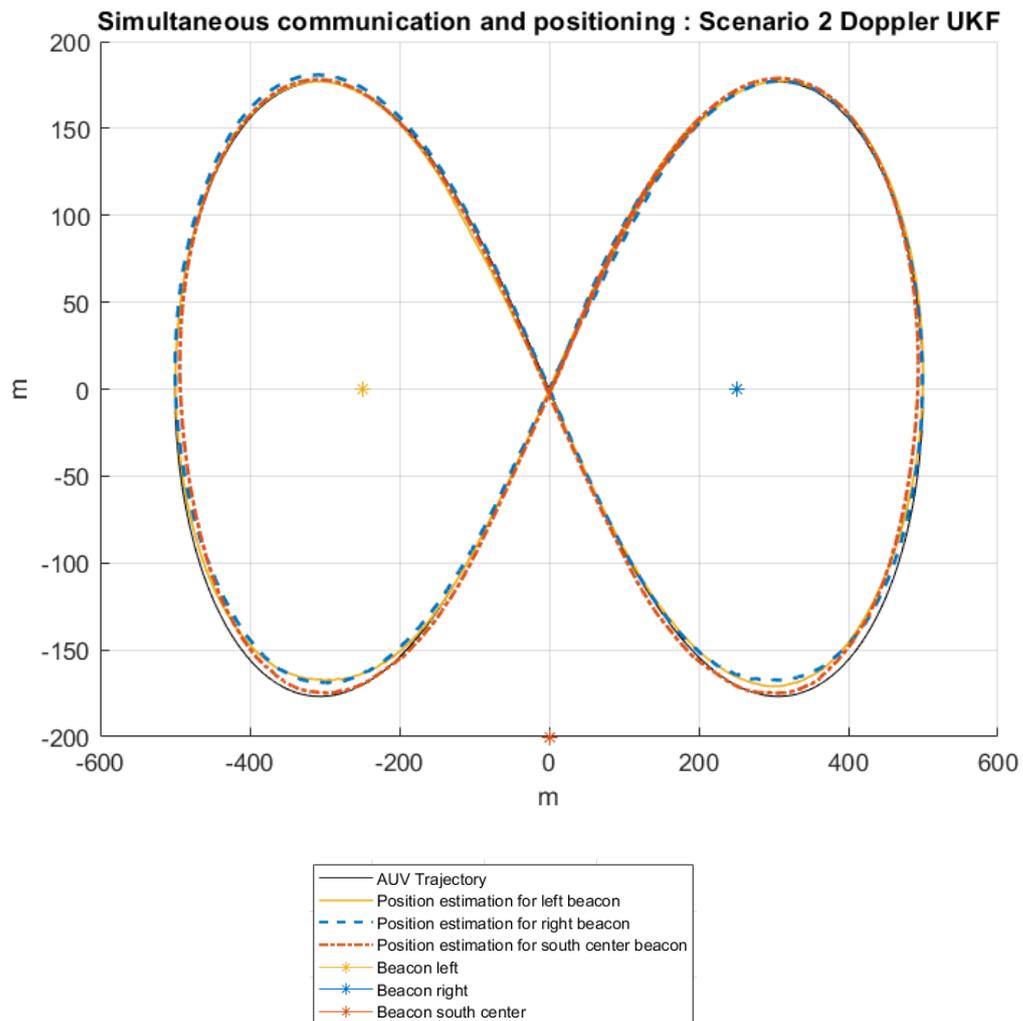


FIGURE 4.10 – Vue de dessus à deux dimensions de l’estimation de position moyenne par rapport à la position réelle de l’AUV en noir, en utilisant l’algorithme du manuscrit.

que l’état de l’art [ROSB](#) est moins exact et précis. De plus, le positionnement de la balise en centre sud améliore l’estimation de positionnement dans les deux cas. Cela s’observe surtout en terme de variance (exactitude) et d’erreur maximale (% etd max).

Scénario 3 : Lemniscate, position balise fixe, $T_{\text{com}} = 6$ s, bruit faible puis fort

La distance parcourue et le temps d’une mission simulée sont identiques aux scénarios précédents. Nous réalisons ce scénario une fois avec l’algorithme proposé associé avec l’UKF et une fois avec l’état de l’art ROSB pour comparaison. On rajoute également des essais avec l’EKF pour les bruits les plus forts. On place la balise aux coordonnées $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (-250, 0)$.

Algo / Bruit	E-P moyen (outliers) en m	Variance de l’E-P	%etd max	%etd moyen
Algo proposé / moyen	9.9829 (5)	37.9994	0.9721	0.4498
Algo proposé / faible	6.7229 (6)	12.8959	0.5050	0.2337
Algo proposé / fort	74.0283 (0)	6.47e+3	12.797	2.5739
Algo proposé & EKF / fort	94.6033 (0)	1.043e+4	16.000	3.2892
ROSB / moyen	10.5824 (6)	21.3263	0.7537	0.3679
ROSB / faible	7.2016 (6)	14.4537	0.5396	0.2504
ROSB / fort	92.0681 (0)	1.03e+4	15.976	3.2011
ROSB & EKF / fort	110.62 (0)	1.54e+4	19.260	3.8465

TABLE 4.5 – Scenario 3 : comparaison du comportement de l’estimateur selon le niveau de bruit entre l’algorithme proposé et l’état de l’art ROSB en utilisant l’UKF sauf lorsque l’EKF est indiqué.

On note plusieurs divergences de l’estimation dans les résultats. Ils sont soulignés par un fond gris. Il est à noter que pour ces cas, les *outliers* sont nuls. Cela s’explique par le fait que les estimations de positionnement sont très disparates. On constate que l’état de l’art ROSB est moins exact et précis, surtout pour les forts bruits. De

nouveau pour les forts bruits, le filtre **EKF** est beaucoup moins performant que le filtre **UKF**. Les résultats de l'algorithme proposé dans ce manuscrit associé avec l'**UKF** et pour un bruit fort sont illustrés en figure 4.11. Cette figure permet de mieux comprendre ces phénomènes de divergence. Du fait de trop grands bruits de mesure (figure 4.6), la moyenne des 200 missions simulées fait tendre vers une erreur qui ne sera pas rattrapée avec le temps.

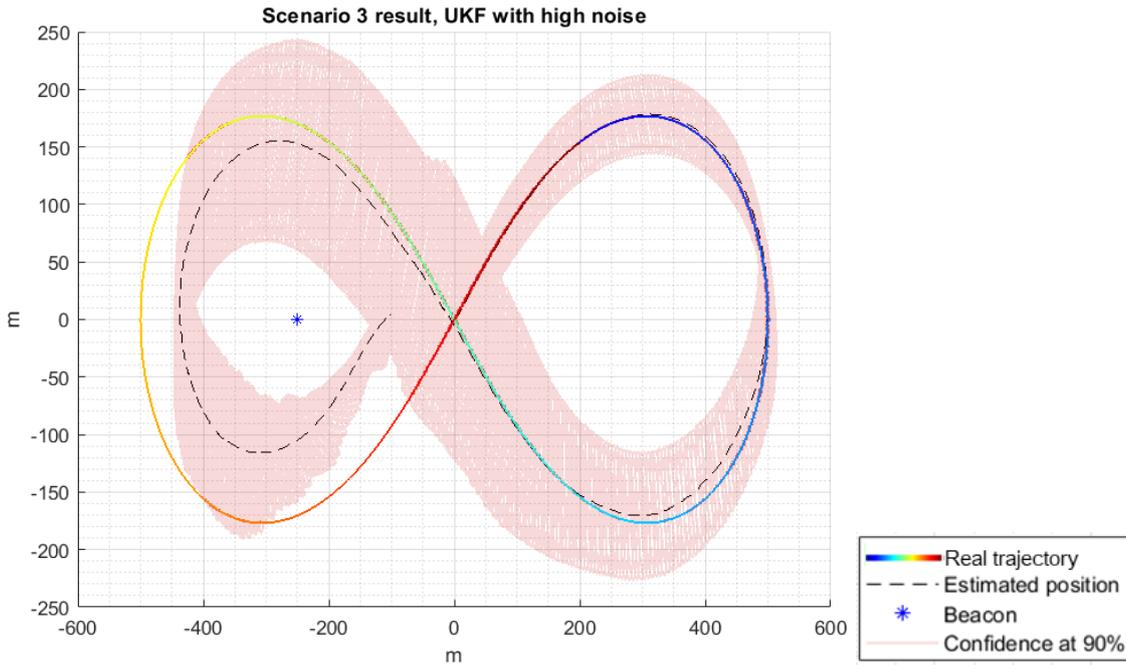


FIGURE 4.11 – Résultat ligne 3 du tableau du scénario 3, avec ellipse de confiance à 90%.

On affiche également la figure 4.12 qui montre le meilleur résultat, le moins bon résultat ainsi que le résultat moyen (déjà vu sur la figure 4.11) sur les 200 missions simulées. Même sur le meilleur résultat, la confiance en l'estimation de la position de l'**AUV** semble faible et varie beaucoup. L'interprétation de ces phénomènes, tout comme le reste des scénarios, sera faite en section suivante.

Scénario 4 : Boustrophedon, position balise fixe, T_{com} variable, bruit moyen

La distance parcourue pour ce scénario est de 1567 mètres, en un peu moins de 26 minutes. Cela représente une vitesse moyenne de 1 m/s soit 1.94 noeuds. Contrairement aux scénarios suivants, on décide d'effectuer de nombreux laçets

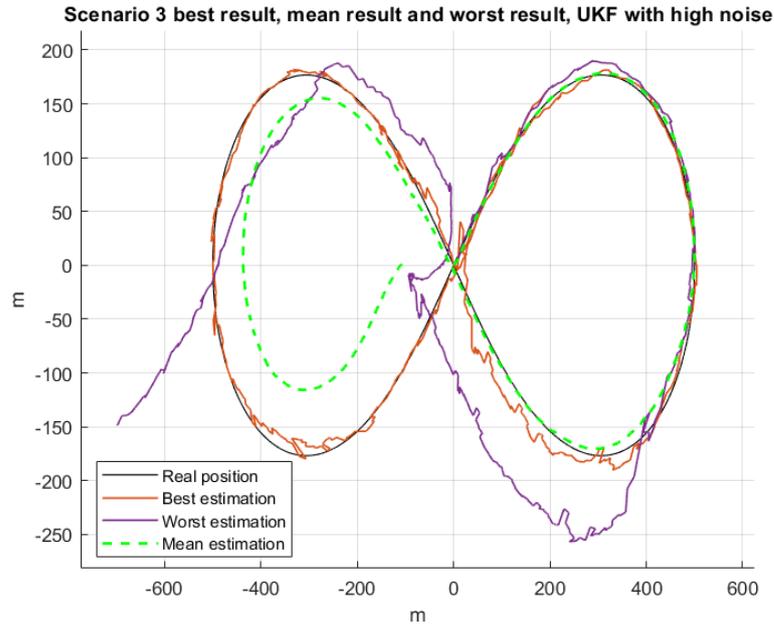


FIGURE 4.12 – Meilleur résultat, moins bon résultat et résultat moyen pour le scénario 3, **UKF** avec bruit importants.

serrés. On place la balise aux coordonnées $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (50, 100)$. Nous réalisons ce scénario 2 fois, une fois avec l’algorithme proposé dont les résultats sont donnés dans le tableau 4.6 et illustrés en figure 4.13 et une autre fois avec l’état de l’art **ROSB** pour comparaison où les résultats comparatifs sont donnés dans le tableau 4.7. Pour cette simulation, on réalise 300 missions simulées.

On ne note aucune divergence dans l’estimation de positionnement. On constate que l’état de l’art **ROSB** est moins exact et précis grâce au tableau 4.7. Les deux algorithmes utilisant le filtre **EKF** avec les mêmes paramètres et les mêmes bruits, on observe que malgré l’écart se réduisant au niveau des erreurs de positionnement, plus T_{com} augmente plus les divergences sur le système **ROSB** deviennent de plus en plus récurrentes.

Scénario 5 : Boustrophedon mission longue, position balise fixe, T_{com} variable, bruit moyen

La distance parcourue pour ce scénario est de 4793 mètres, en 80 minutes soit 1 heure et 20 minutes. Cela représente une vitesse moyenne de 1 m/s soit 1.94 noeuds. On place $\mathbf{pos}_{\text{ref}}$ à (100, 420). Nous réalisons ce scénario avec l’algorithme proposé et le filtre **UKF**. Les résultats sont donnés dans le tableau 4.8 et illustrés en figure 4.15.

T_{com}	E-P moyen (outliers) en m	Variance de l'E-P	%etd max	%etd moyen
3 secondes	3.6054 (1)	1.7549	0.5268	0.2281
6 secondes	5.0440 (5)	3.2143	0.5850	0.3152
9 secondes	6.4518 (1)	6.2173	0.7662	0.4032
12 secondes	8.0853 (6)	12.7455	1.0938	0.5053
15 secondes	9.5457 (6)	18.3823	1.3950	0.5966
20 secondes	12.1322 (6)	33.9161	1.7825	0.7583

TABLE 4.6 – Résultat du scénario 4 pour 300 missions simulées avec l’algorithme proposé et le filtre [EKF](#).

T_{com}	E-P moyen (outliers) en m	E-P moyen (outliers) en m pour ROSB
3 secondes	3.6054 (1)	4.5870 (4)
6 secondes	5.0440 (5)	6.2255 (6)
9 secondes	6.4518 (1)	7.7197 (5)
12 secondes	8.0853 (6)	9.2462 (15)
15 secondes	9.5457 (6)	10.6684 (10)
20 secondes	12.1322 (6)	12.9695 (29)

TABLE 4.7 – Scénario 4 : comparaison entre l’état de l’art [ROSB](#) et l’algorithme proposé en utilisant l’[EKF](#).

On note 2 périodes de communication T_{com} pour lesquelles on observe une divergence. Elles sont quasi-systématiques pour $T_{\text{com}} = 15$ s et systématiques pour $T_{\text{com}} = 20$ s. On peut également constater que pour $T_{\text{com}} = 12$ s, un peu moins du quart des missions simulées a été retiré pour cause de divergence des résultats.

Le phénomène de divergence est très bien identifiable en figure [4.15](#). On rappelle que la mission simulée débute à la coordonnée $(0, 0)$.

Scénario 6 : Boustrophedon, position balise variable, $T_{\text{com}} = 9$ s, bruit moyen

La distance parcourue pour ce scénario est de 1567 mètres, en un peu plus de 26 minutes. Cela représente une vitesse moyenne de 1 m/s soit 1.94 noeuds. Nous

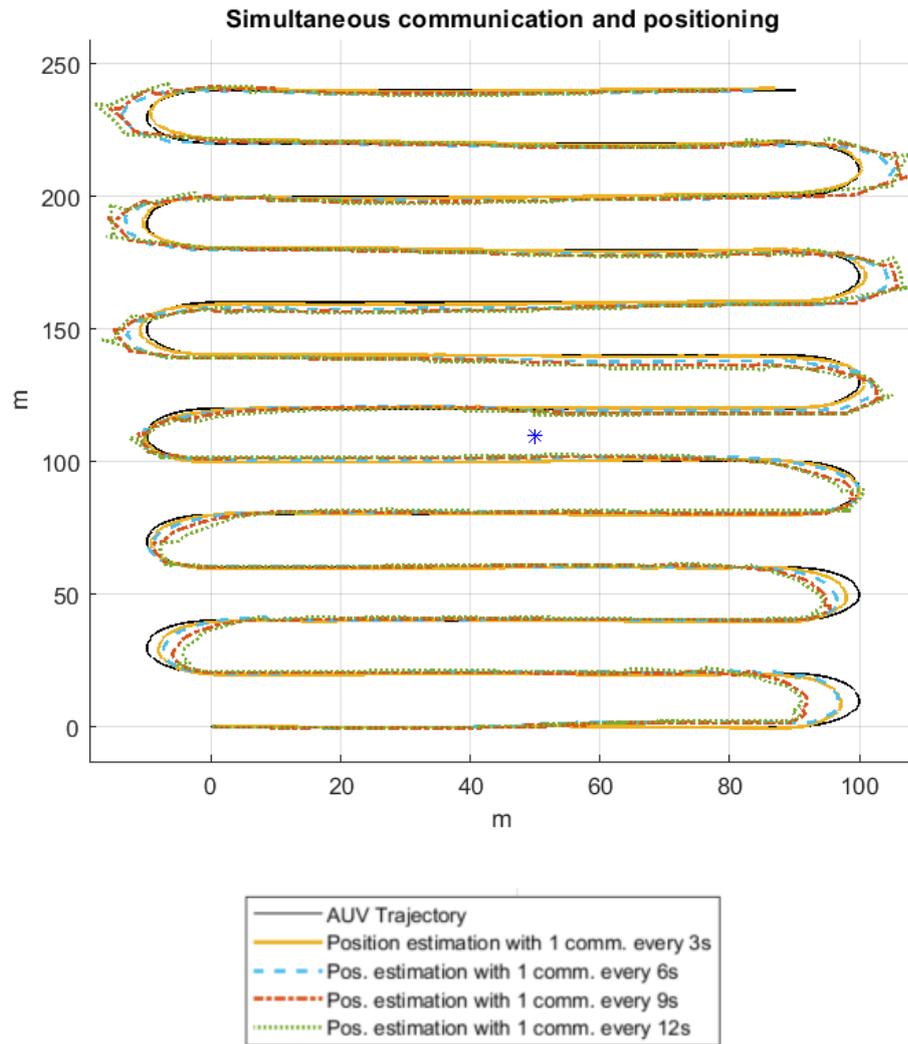


FIGURE 4.13 – Scenario 4 : vue de dessus à deux dimensions de l’estimation de position moyenne par rapport à la position réelle de l’AUV en noir. On utilise le filtre [EKF](#) et l’algorithme de positionnement proposé.

réalisons ce scénario avec l’algorithme innovant et les deux estimateurs. On place la balise aux endroits suivants :

- Centre, $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (100, 100)$
- Nord, $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (100, 300)$
- Sud, $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (100, -100)$
- Est, $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (250, 100)$
- Ouest, $\mathbf{pos}_{\text{ref}} = (-50, 100)$

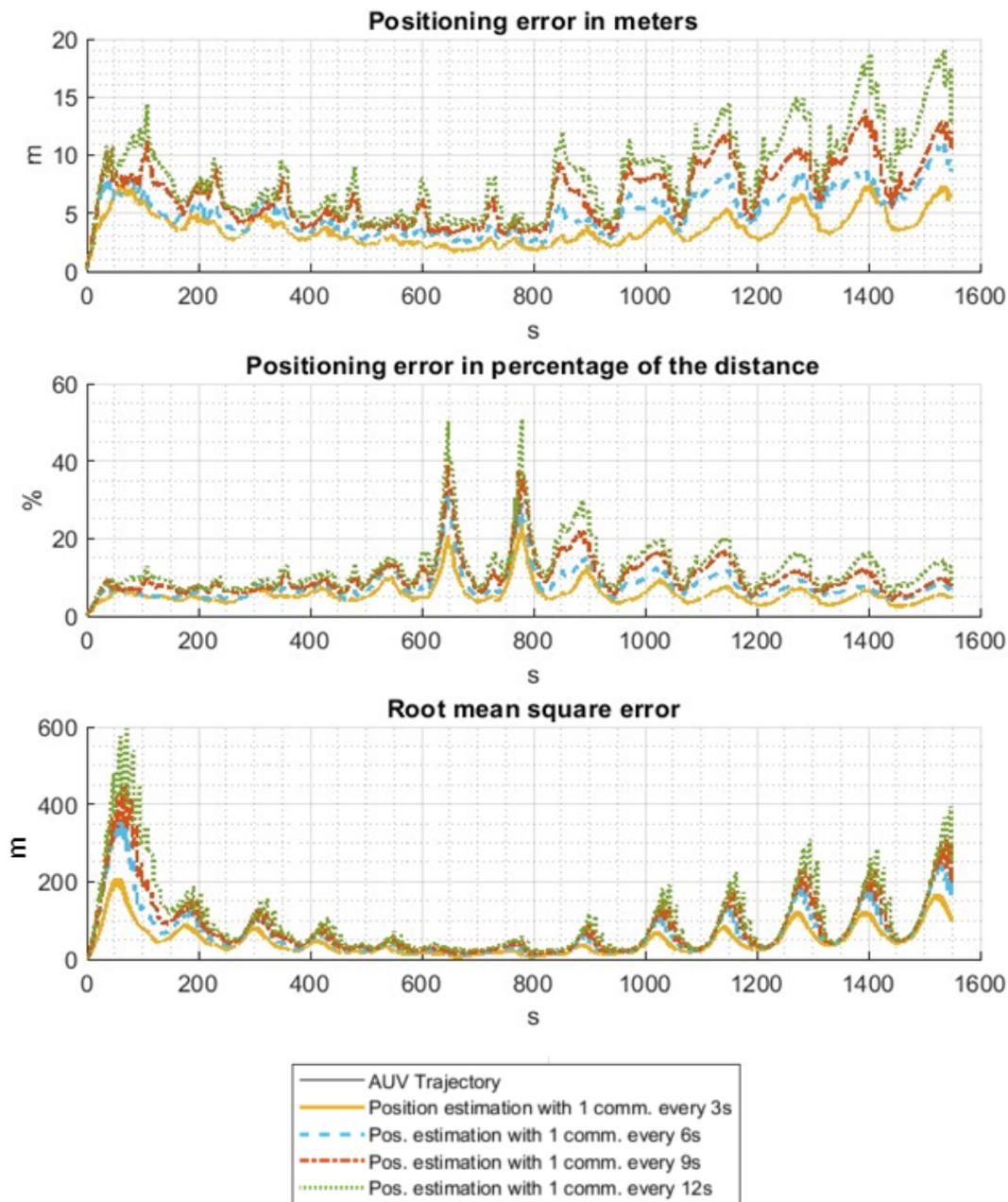


FIGURE 4.14 – Courbes de statistiques pour le scénario 4

Les résultats sont donnés en figure 4.16. En faisant varier la position de la balise aux 4 coins de la trajectoire et au centre, on observe que le meilleur placement est celui du centre avec un écart conséquent. Le moins bon placement est logiquement celui qui est le plus éloigné de la fin de la mission c'est à dire le sud dans ce cas. La différence entre EKF et UKF n'est pas significative. On note tout de même que

T_{com}	E-P moyen (outliers) en m	Variance de l'E-P	%etd max	%etd moyen
3 secondes	6.5032 (5)	10.5456	0.3676	0.1357
6 secondes	8.5244 (7)	15.0099	0.4094	0.1778
9 secondes	10.6402 (23)	24.9985	0.5129	0.2220
12 secondes	12.7019 (44)	39.6972	0.7342	0.2650
15 secondes	22.6272 (22)	505.26	2.0486	0.4721
20 secondes	47.5131 (0)	3.377e+3	4.7274	0.9913

TABLE 4.8 – Résultat du scénario 5 pour 200 missions simulées avec le filtre **UKF**.

contrairement à la trajectoire lemniscate, c'est l'estimateur **EKF** qui se révèle être le plus précis et le plus exact avec une courte marge.

Position balise	E-P moyen (outliers) en m	Variance de l'E-P	%etd max	%etd moyen
UKF centré	6.5863 (3)	8.1180	0.9658	0.4258
UKF nord	8.4578 (2)	8.8220	1.0679	0.5468
UKF sud	12.9828 (14)	21.5282	1.4964	0.8394
UKF est	8.7162 (0)	12.3779	1.2698	0.5636
UKF ouest	8.1509 (3)	11.3833	1.2970	0.5270
EKF centré	6.1790 (7)	6.2007	0.8639	0.3995
EKF nord	8.9457 (9)	9.8317	1.2180	0.5784
EKF sud	12.1201 (25)	21.5358	1.5036	0.7836
EKF est	8.0007 (2)	9.6905	1.1596	0.5173
EKF ouest	7.5413 (3)	11.0872	1.2437	0.4876

TABLE 4.9 – Résultat du scénario 6 pour 200 missions simulées avec le filtre **UKF**.

Scénario 7 : Boustrophedon, position balise fixe, $T_{\text{com}} = 9$ s, bruit faible puis fort

On reprend la même trajectoire que le scénario précédent, avec la même durée de mission et les mêmes vitesses. La balise est placée au centre (100, 100). Pour ce scénario, le bruit va varier entre faible, moyen et fort pour les deux filtres de Kalman. Les résultats sont donnés en tableau 4.10.

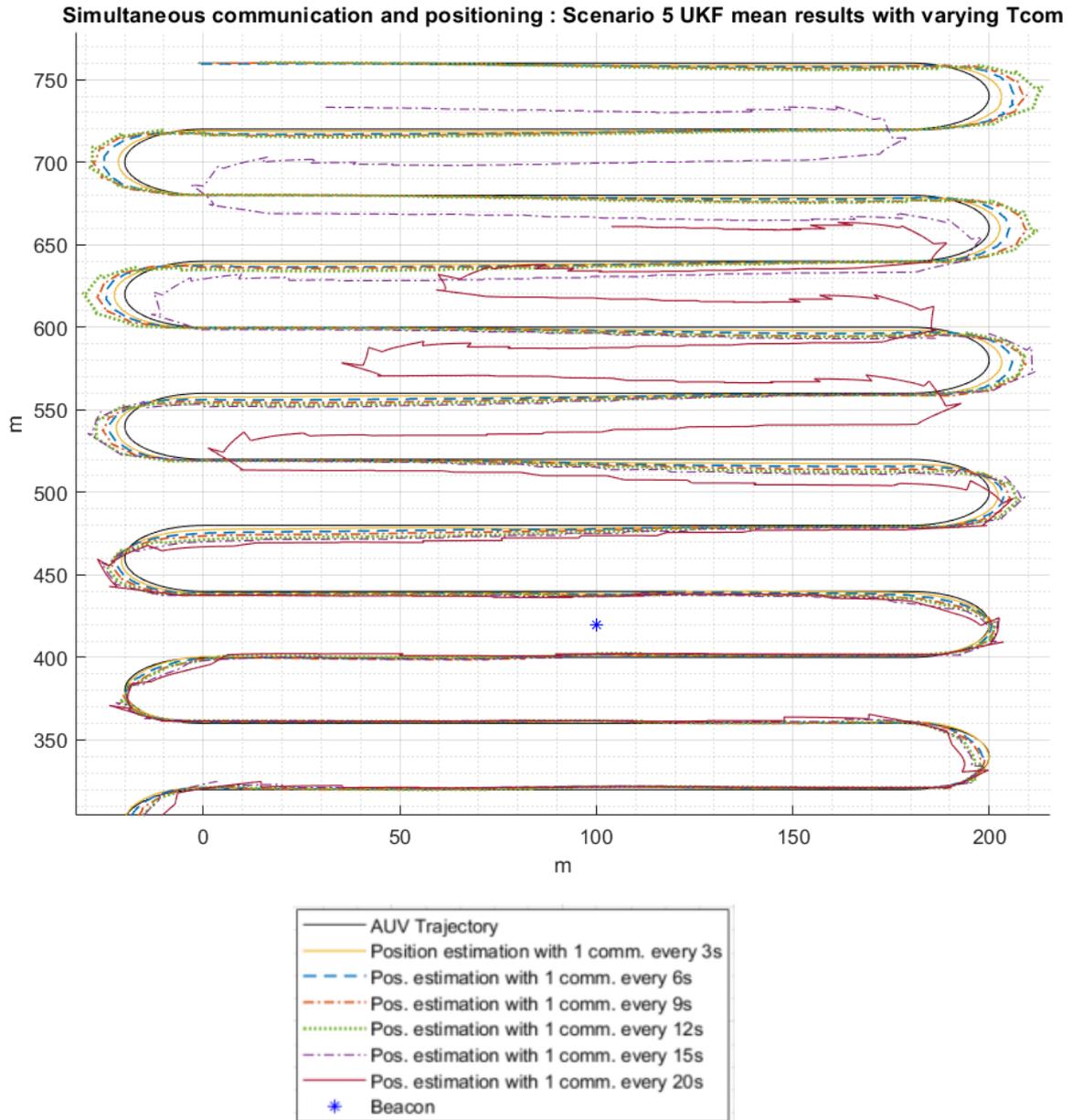


FIGURE 4.15 – Scénario 5 : vue de dessus à deux dimensions de la fin de l’estimation de position moyenne par rapport à la position réelle de l’AUV en noir. On utilise le filtre UKF et le système innovant dans une mission longue.

Tous les paramètres sont encore une fois identiques entre les deux filtres. Les missions comportant un fort bruit divergent dans les deux cas. De la même façon que le scénario 6, le filtre EKF fonctionne légèrement mieux pour la trajectoire

boustrophedon.

Bruit	E-P moyen (outliers) en m	Variance de l'E-P	%etd max	%etd moyen
UKF bruit moyen	6.5863 (3)	8.1180	0.9658	0.4258
UKF bruit faible	5.2122 (0)	11.0463	0.8716	0.3370
UKF bruit fort	10.4877 (25)	6.47e+3	12.797	2.5739
EKF bruit moyen	6.1790 (7)	6.2007	0.8639	0.3995
EKF bruit faible	4.7827 (0)	9.0111	0.8115	0.3092
EKF bruit fort	18.2412 (11)	202.2468	3.6283	1.1794

TABLE 4.10 – Résultat du dernier scénario de simulation.

4.4 Discussion et limitation de la simulation

Bien que de nombreuses possibilités restent à explorer, nous avons décidé dans le cadre de ce manuscrit de se limiter aux scénarios décrits dans la section précédente. Les expérimentations qui seront présentées dans le chapitre suivant sont proches de ces scénarios. De cette façon, le lien entre les deux peut s'effectuer facilement. Plusieurs autres scénarios de simulation ont été testés pendant les travaux de thèse, que l'on n'a pas jugé pertinent de présenter dans le manuscrit. On peut citer par exemple le recalage par **GPS** au milieu de la mission mais les missions simulées étant courte (moins de 2 heures), cette technique a ici peu d'intérêt. En revanche, pour des missions longues de plusieurs heures et une centrale inertielle qui dérive beaucoup, cette technique est très intéressante. Il aurait aussi été possible de tester l'apparition de coupures dans les mesures ou des valeurs aberrantes mais ce cas est abordé lors des expérimentations. Dans le cas des simulations **Matlab**, on se concentre plutôt sur les performances en précision et exactitude en fonction du niveau de bruits, de l'intervalle entre 2 trames de communication, du type de filtre d'estimation, et des positions des balises. Enfin, nous avons effectué différentes comparaisons avec l'état de l'art théorique (**ROSB**) et industriel (par le biais du pourcentage d'erreur sur la distance parcourue).

Analyse et discussion des résultats

Les 7 scénarios présentés ont tous donné des résultats cohérents, permettant une analyse détaillée de chaque phénomène pour 2 trajectoires différentes. Les 6 points suivants ont pu être testés :

Variation de la période de communication ASM (T_{com})

Ce point a été testé sur les scénarios 1, 4 et 5. La diminution T_{com} peut entraîner l'algorithme à diverger. Même s'il s'agit d'une ressource peu coûteuse en moyen et en énergie entre la plus haute fréquence possible et la plus faible, dans la réalité ce facteur n'est souvent pas un choix libre comme nous l'avons vu dans le chapitre 2. L'une des limitations de ces simulations est que les informations sur la communication ASM sont disponibles immédiatement après l'émission de celle-ci. Dans la réalité, il faut prendre en compte le temps de trajet ce qui implique un retard sur la mesure, mais surtout une disponibilité limitée à cause de la vitesse du son dans l'eau. Si on prend l'exemple de la mission longue, le scénario 5, la distance maximale entre la balise et l'AUV est d'environ 450 mètres. En OWTT, cela représente une période de communication minimale d'un tiers de seconde ce qui est très bon. En TWTT, cela représente deux tiers de seconde ce qui, en ajoutant les temps de calculs, peut réalistement permettre d'envisager $T_{\text{com}} = 2\text{s}$. Cependant, pour une mission avec une portée entre la balise et l'AUV de 3 kilomètres (ce qui n'est pas grand en 3 dimensions), cela représente en TWTT une période de communication minimale à 2 secondes. En ajoutant les temps de calculs et une marge de sécurité, cela peut permettre d'envisager $T_{\text{com}} = 5\text{s}$. Cela permet, comme nous l'avons vu en simulation et comme nous le verrons dans la partie expérimentale, une bonne précision et exactitude de positionnement. D'après les résultats de simulation, garder T_{com} à 12 secondes maximum permet de garder une estimation de positionnement efficace malgré le bruit variant. Le type de trajectoire suivie ne semble pas avoir d'impact, et on retrouve les mêmes défauts de positionnement entre la Lemniscate de Bernoulli, le boustrophedon et le boustrophedon en mission longue. Une augmentation de T_{com} implique des virages imprécis, du fait du manque de connaissance de la vitesse notamment.

Variation de la position de la balise dans l'espace

La variation de la position de la balise dans l'espace a été testée dans les scénarios 2 et 6. On a pu voir dans les deux cas que le meilleur placement de la balise est définitivement au centre de la mission. En revanche, il est intéressant de voir qu'un placement de la balise à l'est ou à l'ouest du boustrophedon change le sens de l'erreur comme le montre la figure 4.16. Cela s'explique par

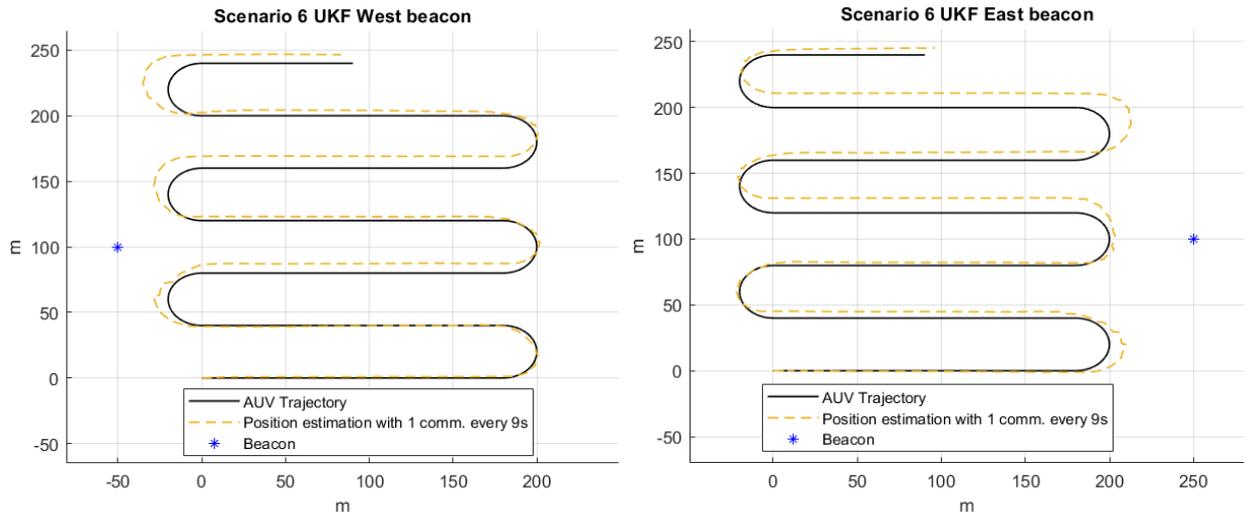


FIGURE 4.16 – Résultats du scénario 6, balise à l’Ouest à gauche et balise à l’Est à droite.

l’un des défauts de l’algorithme de positionnement proposé. L’information de Doppler, extrait par la communication [ASM](#) permet de calculer la vitesse relative de l’AUV mais en aucun cas la vitesse tangentielle à l’axe Balise-AUV. L’algorithme ne dispose alors que de la vitesse radiale, qu’il projette grâce au cap de l’AUV et son estimation de l’angle d’arrivée de la communication. Cela pose quelques défis.

Si on imagine l’AUV décrire un cercle parfait (de rayon constant) autour de la balise, le modem acoustique observe une distance constante (égale au rayon du cercle) et une vitesse relative nulle (on se n’approche ou ne s’éloigne pas de la balise). Le cap du drone varie mais si l’on imagine l’accéléromètre constant et la vitesse angulaire constante, l’algorithme ne sait pas si l’AUV tourne sur lui même ou s’il décrit ce cercle. Dans l’état de l’art [\[91\]](#), la seule solution pour éliminer ce problème est de mesurer l’angle d’arrivée de la communication qui ici n’est qu’estimé par linéarité. Même si on exclut ce cas, qui est admissible comme étant impossible en conditions réelles, on en revient au problème décrit par les figures [4.16](#). Le problème n’est pas uniquement lié à la période des communications qui est assez élevée avec 9 secondes. Dans les mêmes conditions, la balise au centre et celle au nord n’ont pas ce décalage. L’estimateur est trop optimiste sur la vitesse, qui est principalement radiale puis ensuite se trompe sur la somme des deux vitesses lors du virage, avec l’ajout de la vitesse tangentielle.

Variation du bruit sur la mesure (acoustique et angle de cap)

Le bruit sur la mesure est le facteur crucial pour l'estimation par le filtre de Kalman. Même s'il est important, il est tout à fait possible de le compenser si son ordre de grandeur est étudié au préalable. La matrice de covariance du bruit sur la mesure \mathbf{R} joue le rôle d'estimateur statistique du bruit. Sa valeur doit être la plus proche de la variance du bruit puisque dans le cadre de filtre de Kalman on considère le bruit comme étant une distribution normale. Autrement que par une étude statistique sur le bruit attendu dans l'environnement de la mission, il existe une autre manière de déterminer le plus précisément possible cette matrice (méthode également valable pour le bruit sur l'état \mathbf{Q}). Il s'agit de la méthode de post-traitement "essais et erreurs" (*trial and errors*). Par l'expérience terrain, on affine progressivement ces valeurs.

Pour ces simulations, nous avons adapté \mathbf{Q} et \mathbf{R} pour correspondre, avec une marge, aux bruits moyens créés. En conséquence, on observe que lorsque qu'on obtient des bruits plus faibles qu'attendu, il y a une amélioration dans l'estimation mais moins significative que si \mathbf{R} avait été adaptée. En revanche, une matrice de covariance \mathbf{R} n'étant pas adaptée à des bruits forts tels que dans les scénarios 3 et 7, l'estimation s'en retrouve grandement impactée. Pour T_{com} à 6 s et 9 s, les simulations ont systématiquement divergé. On observera également ce phénomène dans la partie expérimentale. Enfin, il est intéressant de considérer l'utilisation d'un filtre de Kalman Adaptatif [22] (AEKF ou AKF dans la littérature) lorsque le bruit varie de manière significative pendant les missions ou si l'étude préalable du bruit est impossible. Il s'agit d'un KF ou d'un EKF classique mais avec l'ajout de la variation de \mathbf{R} au cours du temps, en fonction de la mesure et de l'estimation de position. Un prototype a été développé dans le cadre de cette thèse mais les résultats n'ont pas été concluants.

Variation de la trajectoire et de la durée de la mission

Les scénarios 1, 4 et 5 ont permis de faire des essais à bruit moyen identique, T_{com} variant de la même façon et avec les filtres paramétrés de la même manière. Seules les trajectoires et durées de la mission ont varié. Nous n'avons pas observé de différences significatives en dehors de la performance des filtres EKF et UKF qui s'est inversé en fonction de la trajectoire type lemniscate ou boustrophédon. La mission longue a logiquement baissé considérablement l'erreur sur la distance parcourue, notamment maximale, malgré l'utilisation du filtre UKF moins performant que l'EKF pour le Boustrophédon. Ces résultats seront validés lors de la partie expérimentale au chapitre 5.

Comparaison entre l'estimateur **EKF** et l'estimateur **UKF**

Du fait de leur conception très différents (voir chapitre 2), il était intéressant de comparer ces deux filtres pour deux raisons :

- Valider la cohérence des résultats du point de vue de l'estimateur.
- Analyser si l'un des deux estimateurs a des performances systématiquement meilleures que l'autre en simulation.

Si le premier point a pu être confirmé, le deuxième n'a pas été possible. En effet, aucun point récurrent n'a pu être identifié en dehors des trajectoires. On en conclut donc que les simulations n'ont pas permis de sélectionner un estimateur. La même étude sera refaite lors des parties expérimentales pour vérifier cette analyse.

Comparaison entre l'algorithme de positionnement avec Doppler et état de l'art **ROSB**

En revanche, même si aucun des deux estimateurs s'est révélé plus performant que l'autre, le système proposé dans ce manuscrit s'est révélé toujours plus performant que l'état de l'art, **ROSB**. Ces tests ont été réalisés dans les scénarios 2, 3 et 4. On rappelle que la différence majeure réside dans l'utilisation d'une communication acoustique sous-marine et non un ping. De cette manière, on se positionne en même temps que l'on décode la communication pour extraire une information de Doppler, convertie en vitesse relative puis projetée grâce à l'information de cap de l'**IMU** et à l'estimation de l'angle d'arrivée de la communication. La performance d'un tel algorithme avait besoin d'être démontrée car bien que l'on pourrait se dire qu'une mesure supplémentaire apporte forcément de la précision en plus, l'estimation sans mesure de l'angle d'arrivée est un risque. La figure 4.17 montre une estimation réussie, ce qui permet une conversion assez fidèle de la vitesse relative en vitesse projetée. Dans le cas du scénario 3, nous avons présenté un cas de divergence du fait du bruit fort sur la mesure figure 4.11. Cela donne l'estimation du *bearing angle* montré figure 4.18. Si on se met du point de vue de l'estimation de l'angle d'arrivée de la communication **ASM**, on voit que le décalage devient irrattrapable une fois l'écart trop grand. Le problème principal vient du bruit sur la mesure trop important, qui cause cet écart mais on voit que l'absence de cette mesure entraîne cette dérive. Il est difficile de savoir avec exactitude si avec l'ajout de cette mesure cette même simulation empêcherait cette dérive. Dans tous les cas, si la matrice de covariance du bruit de mesure est bien définie, on réduit le risque. Pour terminer, cette simulation ne modélisant pas de courants marins, il est impossible d'observer l'**AUV** en dérive (familièrement "en crabe").

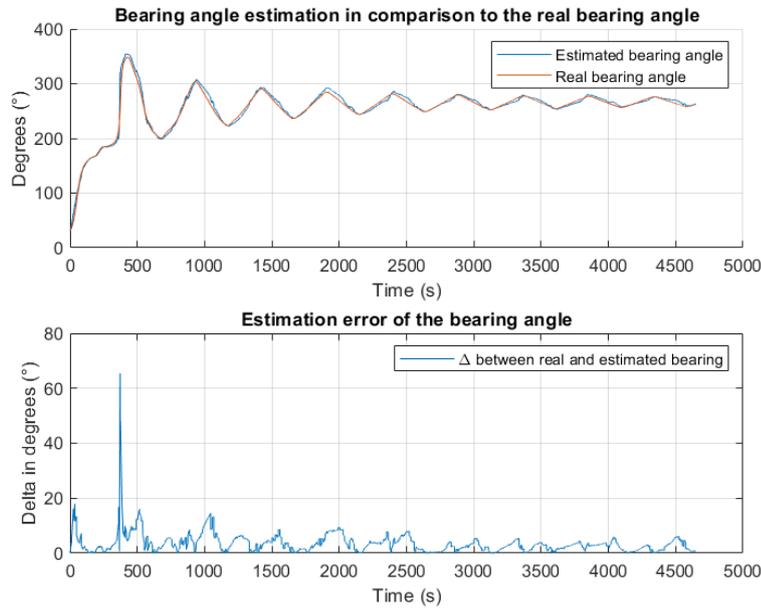


FIGURE 4.17 – Résultat de l’estimation de l’angle d’arrivée de la communication

Ce problème est un risque également à prendre en compte, et sera étudié en partie expérimentale. Cependant la conception même d’un AUV, tout en long et avec des ailerons, permet d’annuler quasi-entièrement un tel phénomène et on l’observera bien plus avec un véhicule de surface.

En comparaison avec l’état de l’art dans la littérature et dans l’industrie, le système proposé dans le cadre de ce manuscrit est donc performant. La comparaison avec les systèmes industriels sera plus déterminante dans la partie expérimentale. Cependant comme les bruits ont été repris sur des constatations de l’environnement réel et des capteurs peu énergivore, peu encombrant et peu onéreux choisis, les performances des simulations sont très satisfaisantes.

Limitations de la simulation

Les résultats obtenus sont cohérents, redondants et suffisamment nombreux pour pouvoir fidèlement analyser les performances de l’algorithme proposé. Cependant plusieurs simplifications ont été admises :

- Les missions simulées se déroulent en deux dimensions, sans la mesure du capteur de pression permettant l’ajout de la 3e dimension. De fait, le calcul de l’angle d’arrivée de la communication est simplifié tout comme le modèle, les angles de roulis et de tangage etc...

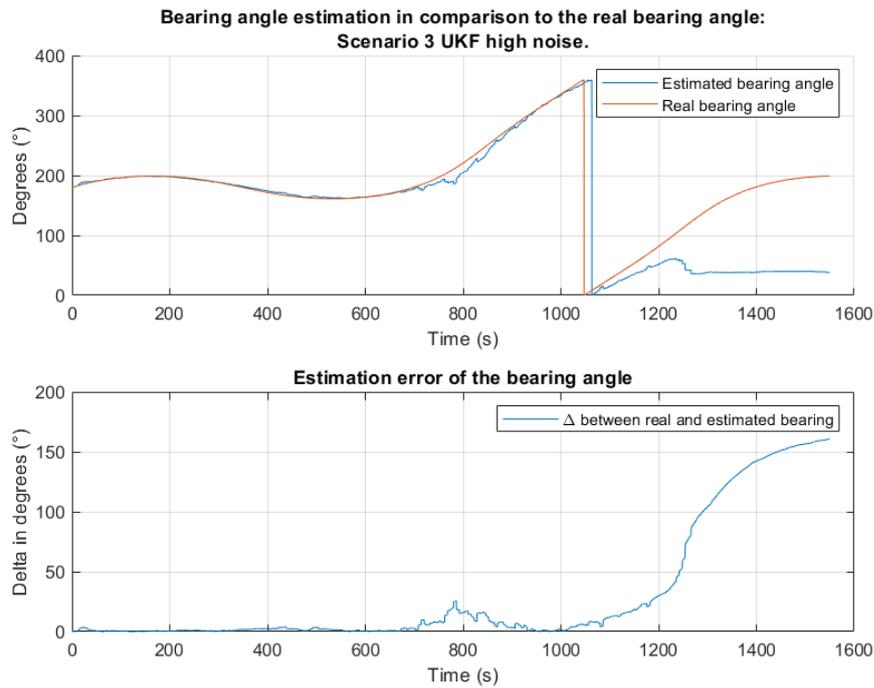


FIGURE 4.18 – Divergence scénario 3, angle d’arrivée de la communication (bearing angle).

- Les scénarios choisis comportent des missions assez courtes et de faibles portées contrairement à ce que l’on pourrait s’attendre d’une mission d’un AUV. En revanche, ce choix a été fait dans l’optique de l’appliquer à des courtes missions expérimentales de μ -AUV.
- N’ont pas été intégrés certains effets de l’environnement tel que le courant ou la résistance au mouvement de l’eau par exemple.
- Comme nous l’avons exprimé plus tôt dans l’analyse, on ne prends pas en compte les retards dus à la transmission des signaux ASM.

Chapitre 5

Résultats expérimentaux

Sommaire

5.1	Introduction	99
5.2	Essais préliminaires en bassin de taille réduite	100
	Protocole expérimental	102
	Résultats	104
5.3	Expérimentation au lac de Ty Colo, Saint-Renan, France	106
5.4	Expérimentation mobile en rade de Brest	110
	Protocole de l'expérimentation en mer	111
	Problème de centrale inertielle	114
	Résultats	116
	Discussion	121
5.5	Essais mobiles en condition de plus grande profondeur à Vila- nova i la Geltrú, Espagne	122
	Protocole expérimental	123
	Résultats	125
5.6	Conclusion	126

5.1 Introduction

Au chapitre 4, nous avons détaillé la partie simulation de la thèse. Les 7 scénarios de simulation avec le modèle développé au chapitre 3 ont permis de faire des premiers essais en simulation, cruciaux pour les expérimentations qui ont suivi. Grâce à des conclusions satisfaisantes sur l'intérêt d'un tel système par rapport à l'état de l'art, il a été choisi de le tester en condition réelle. Pour ce chapitre, nous abordons les différentes expérimentations pour valider et confirmer

les performances de l'algorithme de positionnement développé. Le chapitre est développé en sections correspondantes à toutes les expérimentations réalisées par ordre chronologique. Chaque section présente l'expérimentation, le protocole expérimental avec le matériel correspondant, ensuite les résultats puis enfin une discussion sur les conclusions à émettre, une comparaison avec la simulation et l'état de l'art et les limitations d'une telle expérimentation.

5.2 Essais préliminaires en bassin de taille réduite

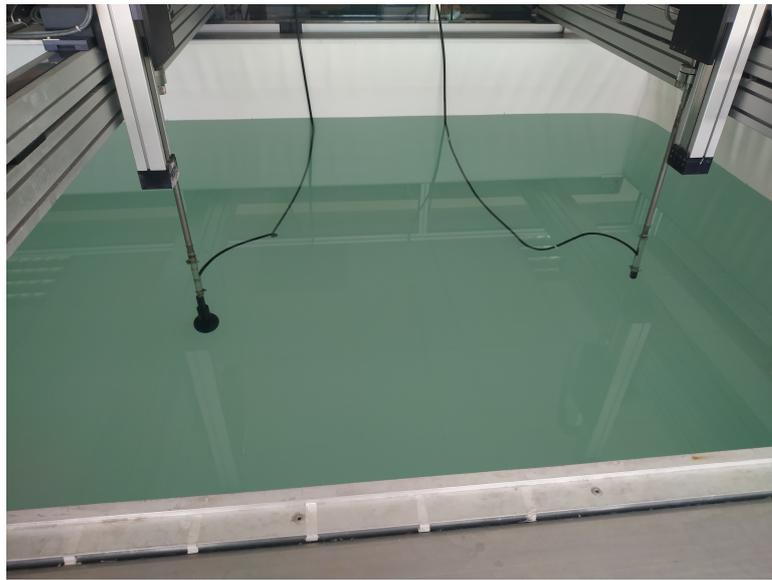


FIGURE 5.1 – Bassin d'expérimentation avec émetteur Neptune Sonar D/26 (à gauche) et récepteur B&K 8104 (à droite).

Cette expérience étend le travail de simulation décrit dans [4] avec un algorithme simplifié par rapport à celui décrit dans les chapitres 3 et 4. Les objectifs de cette expérience sont multiples. Premièrement, il s'agit de mettre en oeuvre des mesures d'acoustique sous-marine en environnement contrôlé (en l'occurrence le bassin d'essais de l'ISEN Brest), pour étudier les performances de l'algorithme de localisation dans le cas d'une trajectoire de type lemniscate en utilisant les estimations de temps de vol et de vitesse relative par effet Doppler. De cette manière, cela permet de faire une première validation du système en conditions réelles avant de réaliser des expérimentations en environnement non contrôlé. Un second objectif consiste à comparer dans le bassin les différences de performance entre l'état de l'art [ROSB](#), le système proposé en utilisant simplement l'estimation du Doppler et enfin le système complet utilisant à la fois le temps de vol et l'estimation Doppler.

Un troisième objectif consiste à évaluer les performances de la communication [ASM](#), notamment la modulation [BPSK](#) et l'ajout du signal *pure-tone* pour l'estimation Doppler afin de monter en compétences avant les expérimentations en mer.

Toutefois le bassin représenté figure 5.1 est un espace restreint de 6 m^3 ($3 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) qui implique un certain nombre de contraintes spécifiques. Les parois du bassin réfléchissent les ondes acoustiques, si bien qu'à la réception, on observe des trajets multiples qui ont parfois autant d'énergie que le trajet principal de la communication [ASM](#). La taille de la zone de la mission est également une contrainte. La position des bras gauche et droit est modifiable grâce à une commande, et le déplacement se fait à la façon d'une imprimante 3D. Leur zone respective est la moitié gauche et la moitié droite. De cette façon, si l'on envisage une balise fixe à droite, le bras de gauche ne dispose que de 3 m^2 pour se déplacer librement. Les bruits de mesure sont alors bien plus important par rapport à la zone de la trajectoire qui sera de dimension très réduite. Enfin, la dernière limitation est que les bras ne sont pas programmables pour suivre une trajectoire de manière fluide et à vitesse prédéfinie et stabilisée.

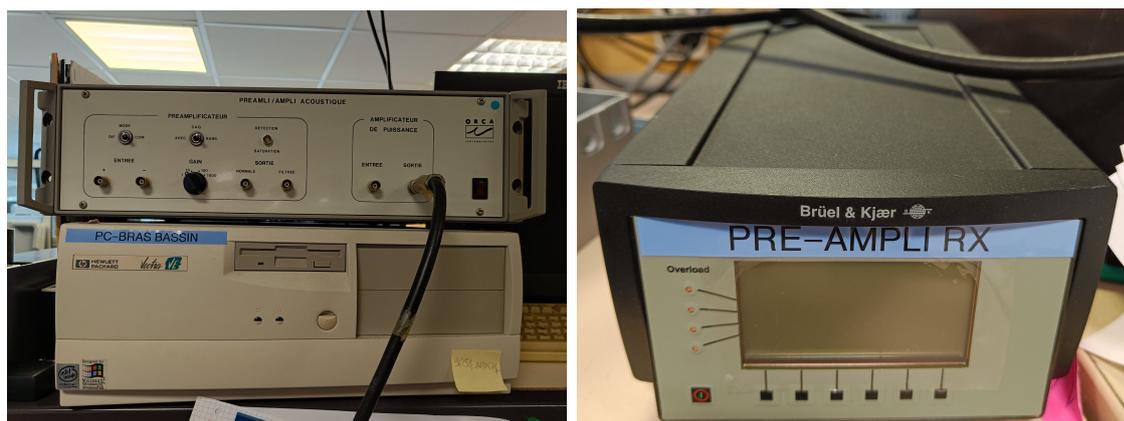


FIGURE 5.2 – Matériel expérimental pour l'expérience en bassin. A gauche en haut le pré-ampli d'émission et à gauche en bas le PC de commande des bras. A droite, le pré-ampli de réception.

Le scénario choisi consiste en un [AUV](#) suivant une trajectoire en forme de lemniscate autour d'une bouée de surface géoréférencée et équipée d'un émetteur acoustique sous-marin envoyant périodiquement des données [ASM](#) à l'[AUV](#). Les deux bras mécaniques, équipés de deux émetteurs-récepteurs (figure 5.1), représentent la bouée et l'[AUV](#). Comme les bras ne peuvent pas être contrôlés en vitesse, le décalage Doppler induit par le mouvement, mesuré à la réception (côté [AUV](#)), est ajouté numériquement pour chaque transmission acoustique effectuée dans la

piscine d'eau. L'objectif principal est d'estimer précisément la position de l'AUV par rapport à la position connue de l'émetteur.

Le banc expérimental est représenté en figure 5.1. Les bras sont contrôlés dans les directions (x, y) . On fixe la profondeur à 0,5 mètre pour chaque bras. La figure 5.2 en bas à gauche montre le PC qui commande les bras. Les essais ont eu lieu au laboratoire SEACOM pendant les mois d'avril et de mai 2021.

Protocole expérimental

Les données sont transmises en utilisant le même signal de communication ASM que celui présenté dans le chapitre 3. Chaque trame est formée de $N_p = 150$ symboles pilotes utilisés pour l'estimation du canal ASM et de $N_d = 2518$ symboles de données QPSK transportant l'information. Ils sont mis en forme par une impulsion avec un filtre en cosinus surélevé à racine carrée (SRRC) puis transposés autour de $f_0 = 23$ kHz dans la bande entre 16.5 kHz et 29.5 kHz. Un signal *pure-tone* hors bande utile autour de $f_{pt} = 11$ kHz est ajouté au signal utile afin d'estimer très précisément le décalage Doppler induit par le mouvement [55]. La PSD du signal transmis est présentée dans la figure 5.3. La célérité du son c_w est calculée à 1480 m/s à une profondeur de 0.5 mètre. On utilise les pré-amplis d'émission et de réception montrés figure 5.2.

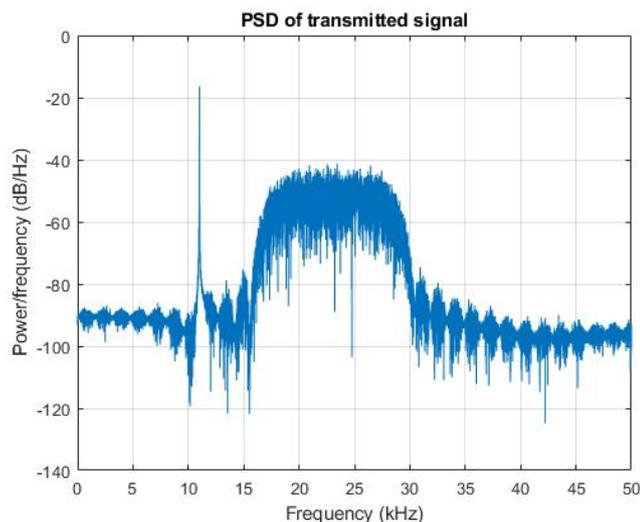


FIGURE 5.3 – Densité spectrale de puissance type du signal de communication ASM utilisé dans le bassin.

On suppose que l'AUV a une position (x, y) , une vitesse v et un angle de cap ψ . Cet angle de cap est, par exemple, estimé par une boussole. Le véhicule est contrôlé par l'accélération et l'angle de cap calculés par la même méthode de linéarisation

en boucle fermée que celle des chapitres précédents. En réutilisant les équations de lemniscate 4.13, on choisit $a = 0.6$ m et $f_1 = 1$ Hz. La durée de la mission est de 12 secondes avec une période de rafraîchissement de l'algorithme de $\Delta_t = 0.2$ s. On discrétise alors la trajectoire réelle de l'AUV en 60 points. La vitesse projetée de l'AUV varie alors autour de $v = 0.5$ m/s. On suppose que l'ancre de référence reste fixe avec les valeurs ($x_{\text{ref}} = 0.7$; $y_{\text{ref}} = 0$).

On définit le vecteur d'état par $\mathbf{z} = (x \ y \ v)^T$, et le vecteur d'observation par $\mathbf{y} = (\hat{d} \ \hat{v})^T$ avec \hat{d} la distance estimée et \hat{v} la vitesse estimée.

L'angle d'arrivée de la communication ASM est choisi comme étant connu par l'AUV pour simplification. Ce choix a été fait au regard de la taille et de la durée de la mission. Il en sera de même pour le cap ψ . On le considère connu et directement intégré comme valeur réelle dans la fonction d'évolution :

$$f(\mathbf{z}_k) = (x_k + v_k \cos(\psi) \cdot \Delta_t \quad y_k + v_k \sin(\psi) \cdot \Delta_t \quad v_k)^T \quad (5.1)$$

De cette manière, on se concentre uniquement sur des résultats liés à la communication ASM, ce qui n'a pas pu être fait en simulation.

Pour obtenir des résultats pertinents malgré la courte durée et taille de la mission contraints par le bassin il a été choisi, pour chaque itération de l'algorithme, de réaliser une communication ASM. On comptabilise alors 60 trames de communication. On utilise les mêmes communications dans le scénario complet que dans les scénarios où l'on n'estime que le Doppler ou que le temps de vol. La figure 5.4 montre le ratio d'erreur de mesure par rapport à la vitesse réelle et à la portée réelle (émulées et contrôlées par le bras mécanique, respectivement). Le calcul de la distance à partir de la corrélation est légèrement imprécis en raison de plusieurs réflexions des ondes acoustiques et des distances engagées. On initialise l'estimateur du filtre de Kalman EKF, $\hat{\mathbf{z}}_0$, à la coordonnée initiale réelle $(-0.7; 0)$ puisque l'AUV peut accéder à sa position GPS avant de commencer à plonger pour démarrer la mission sous-marine.

On définit la fonction d'observation par :

$$g(\mathbf{z}_k) = (\sqrt{(x_k - x_{\text{ref}})^2 + (y_k - y_{\text{ref}})^2} \quad v_k)^T \quad (5.2)$$

A la différence de la simulation et des expérimentations suivantes, comme le cap et l'angle d'arrivée sont considérés connus, la vitesse relative estimée grâce au décalage Doppler de la communication ASM est directement convertie en vitesse projetée. Les matrices de covariance des erreurs \mathbf{Q} et \mathbf{R} ainsi que \mathbf{P}_0 sont les suivantes :

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(10 \ 10 \ 10), \quad \mathbf{R} = \text{diag}(15 \ 15), \quad \mathbf{P}_0 = \mathbf{I}_3. \quad (5.3)$$

\mathbf{P}_0 est la matrice de covariance initiale de l'état de l'EKF.

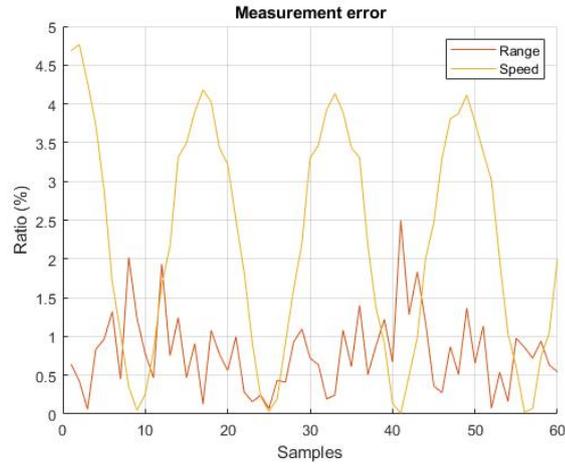


FIGURE 5.4 – Ratio de l’erreur de l’estimation par rapport à la valeur réelle.

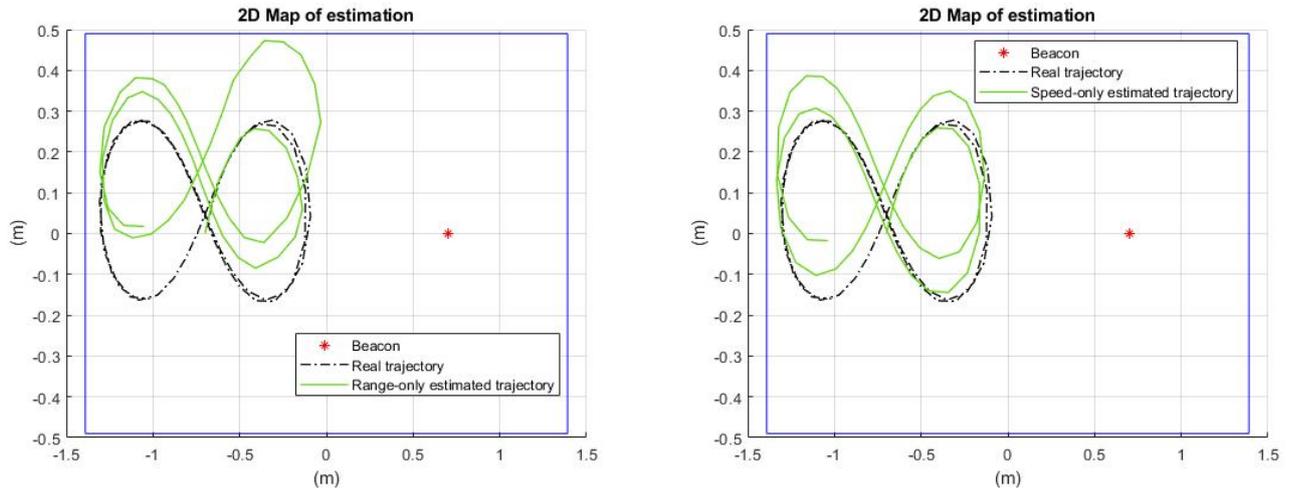


FIGURE 5.5 – Résultat expérimentation bassin, ROSB à gauche et Doppler uniquement à droite.

Résultats

Les figures 5.5, 5.6 et 5.7 présentent les résultats expérimentaux obtenus à partir de la trajectoire estimée et des statistiques d’erreur de positionnement et de dispersion des erreurs. Comme nous pouvons le voir, au départ, l’estimation basée uniquement sur la vitesse est la meilleure, mais au cours de la mission, un biais conséquent apparaît et l’estimation de position du filtre commence à dériver. C’est un fait exagéré qui se produit également dans les systèmes classiques INS et DVL [83]. Étant donné que les mesures de vitesse sont moins bonnes que celles obtenues

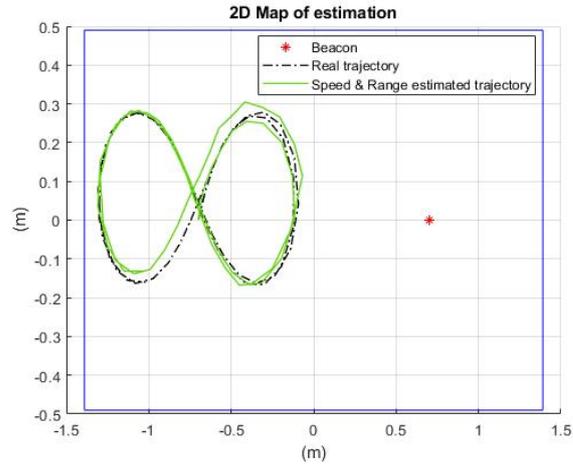


FIGURE 5.6 – Résultat expérimentation bassin, système proposé dans une version simplifiée.

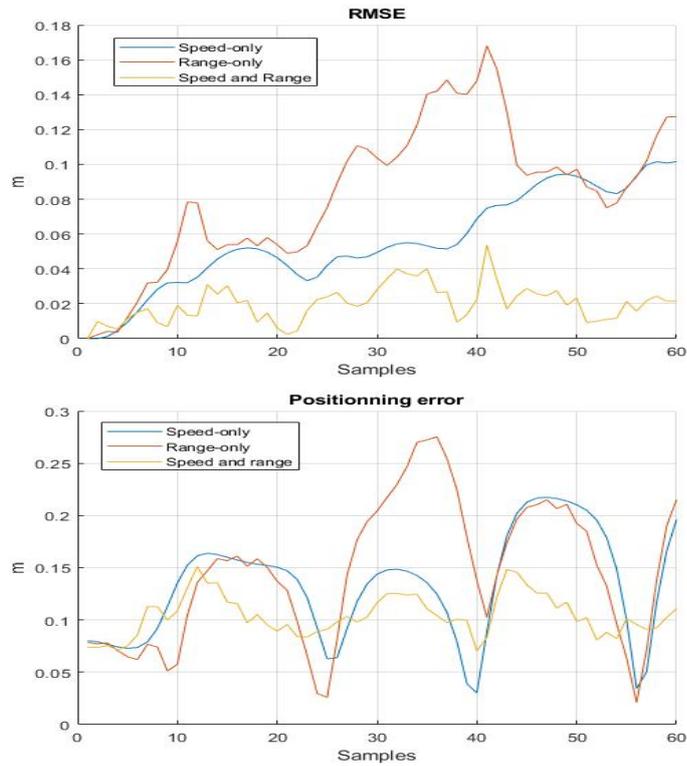


FIGURE 5.7 – Représentation de la dispersion des erreurs (RMSE) en haut et de l'erreur de positionnement en bas.

par un [DVL](#), le biais de dérive est également moins bon. Nous observons le même phénomène d'offset qui augmente avec le temps.

L'estimation basée uniquement sur la distance n'est ni précise (variance de l'erreur) ni exacte (erreur moyenne) car le filtre de Kalman ne dispose pas de l'information sur l'accélération et les mesures de portée ne sont pas précises par rapport à la taille de la piscine du côté gauche (3 m²). L'erreur de mesure est généralement de l'ordre d'un centimètre, mais elle est suffisamment significative.

La méthode de localisation proposée, qui utilise à la fois les estimations de vitesse et de distance, s'avère meilleure en termes de précision et d'exactitude que les méthodes de localisation basées uniquement sur la vitesse ou la distance. En particulier, le schéma proposé présente une erreur de positionnement contrainte sous les 15 centimètres qui ne dérive pas, contrairement à la méthode de localisation basée uniquement sur la vitesse.

En conclusion, dans un environnement relativement restreint et réfléchissant, nous avons montré qu'en dépit d'erreurs conséquentes dans les mesures par rapport aux valeurs réelles de vitesse ou de distance, l'ajout de l'estimation du décalage Doppler au temps de vol améliore l'estimation de la localisation de l'[AUV](#). Grâce à cela, on augmente la précision et l'exactitude et on élimine la dérive de l'estimation basée uniquement sur la vitesse.

5.3 Expérimentation au lac de Ty Colo, Saint-Renan, France

A partir de l'expérimentation simplifiée précédente en bassin concluante, la décision a été prise de tester le système réel complet en 2D en milieu réel pendant l'été 2022, d'abord en lac pour des raisons de simplicité d'accès puis en mer. Nous avons choisi d'utiliser un système d'enregistrement nomade, simulant un [AUV](#), pour post-traiter l'estimation de positionnement ainsi qu'un système d'émission à position fixe, simulant une balise fixe, afin d'envoyer des signaux de communication [ASM](#) à intervalle régulier, sans transpondeur. Il s'agit donc d'une structure à communication [ASM OWTT](#).

L'expérimentation a été réalisée le 13/06/2022 au lac de Ty Colo à Saint Renan, France. L'objectif visé était de tester les performances de la synchronisation entre les deux systèmes. La synchronisation est, pour rappel, un élément absolument crucial dans le cadre d'une structure de communication [OWTT](#). Dans le cadre de

l'architecture à deux boîtiers (système émission et système réception), on synchronise les systèmes grâce au [Pulse Per Second \(PPS\)](#) des antennes [GPS](#). Lorsque deux [GPS](#) (ou plus globalement [GNSS](#)) sont dans la même zone (dizaine de kilomètres par exemple), les [PPS](#) sont synchronisés. Selon les antennes, ils peuvent avoir un décalage fixe, mais celui-ci ne varie pas. Il sera donc nécessaire de calculer ce décalage avant de réaliser une mission.



FIGURE 5.8 – Lac de Saint-Renan. Système émetteur au point 1 à gauche, système récepteur à droite au pont mesure.

Le système d'émission est un matériel existant développé par l'équipe SEACom préalablement aux travaux de thèse. Dans le cadre des expérimentations menées ici, elle a simplement été clonée avec des composants identiques. Elle est visible à gauche de la figure 5.8. Elle se compose d'un [GPS](#), d'un [Field-programmable gate array \(FPGA\)](#) Altera Cyclone V, contenant un softCore NIOS II sur une carte DE1 de Terasic, d'un clavier et d'un écran pour l'interface homme-machine, d'un connecteur audio XLR pour brancher un projecteur sous-marin, de batteries et un amplificateur audio. Son rôle est de faire émettre au projecteur Neptune Sonar D/26 un fichier audio *wav* sur la synchronisation [PPS](#) du [GPS](#). Dans tous les essais menant à l'expérimentation finale dans la rade de Brest, nous avons fixé cette période à $T_{\text{com}} = 3$ s. En effet, si besoin en post-traitement il sera possible d'augmenter cette valeur mais pas de la réduire.

Le système de réception quant à lui a été spécifiquement intégré pour le besoin

des expérimentations décrites dans ce manuscrit. Son fonctionnement est basé sur de l'enregistrement de données (*data-logging*) à haute fréquence d'échantillonnage pour réaliser le post-traitement (estimations, filtrages...) séparément. L'élément principal est un boîtier d'enregistrement numérique et analogique NI DAQ USB-6212 (5.9), branché en USB à un PC durci disposant de `Matlab` pour l'enregistrement. L'hydrophone B&K 8104 qui a pour rôle de réceptionner les communications `ASM` est branché au même pré-ampli RX B&K NEXUS utilisé pour les essais bassin (cf figure 5.1). Le pré-ampli est alimenté par une batterie. Pour compléter les données d'enregistrement, un `GPS` et une `IMU` SparkFun 9DoF, qui sera présentée section suivante, sont également branchés sur le DAQ NI. Cela fait en tout 4 voies qui sont enregistrées par l'enregistreur NI :

- Le signal `Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)` des trames NMEA du `GPS`.
- Le signal `PPS` du `GPS`.
- Le signal `UART` de l'`IMU`.
- Le signal en sortie du pré-ampli RX correspondant à l'enregistrement acoustique.

La fréquence d'échantillonnage que nous avons choisi est $f_e = 96$ kHz. Les 4 voies sont enregistrées sur des voies analogiques, malgré la présence de 3 signaux numériques. En effet, pour des besoins de synchronisation la plus précise possible, nous avons besoin d'avoir le `PPS` et le signal acoustique sur la même échelle de temps. Un code `Matlab` reproduisant la lecture numérique des valeurs de l'`UART` à partir du signal analogique a donc été développé. De cette manière, les 4 signaux sont parfaitement synchronisés.

A l'aide des deux systèmes détaillés ci-dessus, l'objectif est donc de vérifier que les distances réelles (calculées au moyen des deux `GPS`) et estimées (calculées au moyen du signal `ASM` décrit en figure 3.3) après post-traitement correspondent.

La figure 5.10 montre les 4 distances testées ainsi que le point où le système de réception est positionné ("Mesure"). Lors de chaque point, entre 5 et 7 minutes de communications sont enregistrées. La valeur de distance estimée est alors une moyenne mais on n'a constaté que très peu de variance. La vitesse du son estimée était de 1470 m/s.

Pour corriger le biais fixe entre les deux `PPS`, la méthode qui sera réutilisée pour l'expérimentation finale est de coller le projecteur à l'hydrophone récepteur puis d'émettre sous l'eau très faiblement à intervalle régulier pour obtenir une distance nulle. Lors des essais lac, nous avons mesuré un biais temporel de 0.20664 μ s.

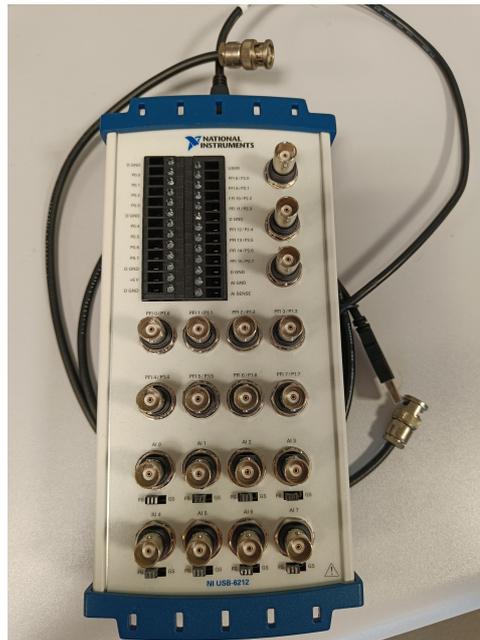


FIGURE 5.9 – NI DAQ USB-6212

Malheureusement, un problème dans l'enregistrement des données GPS du système émetteur a fait qu'aucune des données n'a pu être récupérée. Nous avons donc dû estimer la position GPS des points à l'aide des photos de chaque point prise sur place. Cependant, en plus de la stabilité des résultats obtenus, du biais qui n'a pas bougé entre le début et la fin de l'expérimentation et des estimations de distance juste en comparaison à celles mesurées par un mètre sur le ponton, les résultats ont été jugés satisfaisants. Le point numéro 4 est probablement plus éloigné dans la réalité.

C'est ce système, fiabilisé, qui sera réutilisé pendant l'expérimentation dans la rade de Brest. De plus, l'autonomie observée était suffisante pour prévoir une journée entière d'expérimentation.

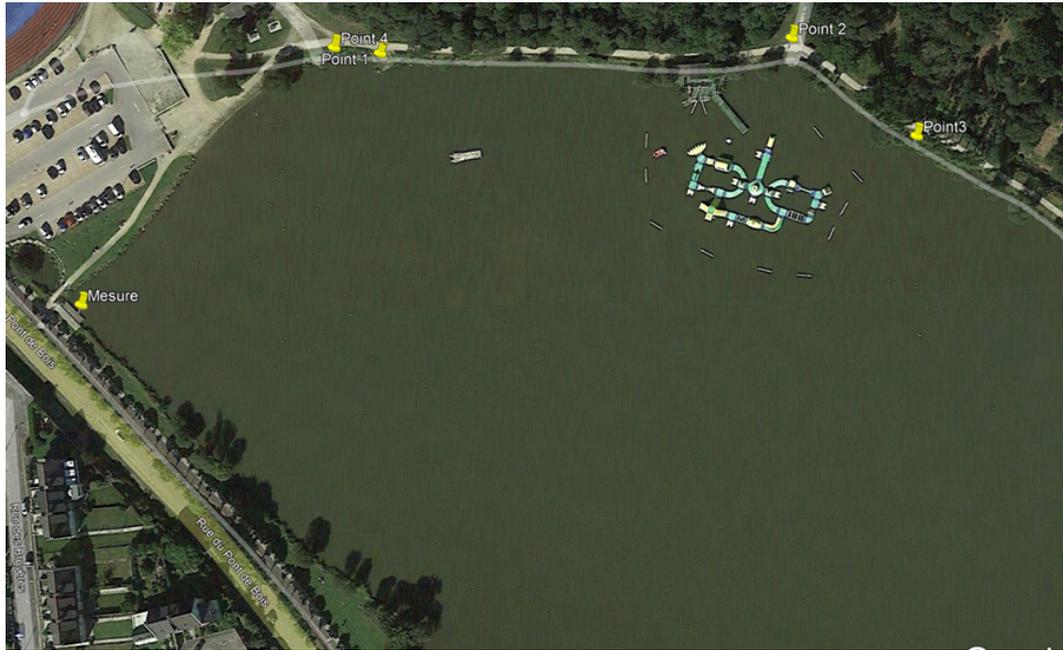


FIGURE 5.10 – Essais lac

Point sur la carte	Profondeur RX	Profondeur TX	Distance réelle (m)	Distance estimée (m)
Point #1	20 cm	20 cm	118.81	121.1150
Point #2	20 cm	80 cm	241.52	239.7592
Point #3	20 cm	80 cm	271.19	294.6273
Point #4	20 cm	80 cm	114.21	128.6648

TABLE 5.1 – Résultats des essais lac

5.4 Expérimentation mobile en rade de Brest

Entre l'expérimentation en lac décrite ci-dessus et l'expérimentation mobile en rade de Brest, des essais ont été conduits sur la centrale inertielle qui sera utilisée. Ils sont détaillés en annexe A.

L'expérimentation en rade de Brest a eu lieu les 5 et 6 juillet 2022. L'objectif est de tester en conditions réelles les performances de l'algorithme développé dans le cadre de ce manuscrit. Après des simulations convaincantes mais sans perturbations de l'environnement, la rade de Brest est un terrain idéal pour effectuer cette expérimentation. De multiples courants y sont présents à vitesse et sens différents même dans des zones réduites. Il s'agit également d'un lieu fréquenté par la faune mais surtout par de multiples bateaux. En résumé, les résultats de l'expérimentation compléteront les résultats de simulations grâce à un environnement non connu, non prévisible et non constant. Toutefois, nous considérons encore une fois un problème de localisation en deux dimensions afin que le système à localiser reste en surface et ait accès au [GPS](#) afin de connaître sa localisation exacte, l'estimation de la profondeur pouvant être facilement et précisément effectuée au moyen d'un capteur de pression.

Protocole de l'expérimentation en mer

Matériel

Le matériel utilisé est repris de l'expérimentation en lac et l'expérimentation sur l'[IMU](#). Pour simuler une mission d'un [AUV](#), on dispose de deux plateformes sur l'eau :

- Le Zodiac mobile, en photo à gauche de la figure [5.11](#), représente dans ce scénario l'[AUV](#). Il est contrôlable par la poussée des moteurs et son cap. On décide de le déplacer avec une poussée constante ce qui induit une vitesse qui varie selon la force du courant de la mer. Sur ce Zodiac, un écran permet de voir les positions [GPS](#) passées sur une carte couleur ce qui permet de réaliser des trajectoires manuellement malgré la dérive due au courant.

Le système de réception, connecté au PC disposant du programme d'enregistrement (*logging*) est fixé à l'avant du Zodiac. L'hydrophone B&K 8105 qui enregistre le canal acoustique sous-marin est submergé à 1 mètre de profondeur à l'aide d'un poids et d'une barre métallique.

- La plateforme en photo à droite de la figure [5.11](#), représente dans ce scénario la balise de référence fixe. Il s'agit du système dénommé LMAIR¹ qui est une plateforme dédiée aux expérimentations [ASM](#) [[11](#)]. Accessible à distance par le réseau 4G, il est possible d'émettre depuis la plateforme des signaux [ASM](#)

1. Le Laboratoire Marin d'Acoustique et d'Imagerie de la Rade (LMAIR) est une infrastructure de recherche innovante portée par l'ISEN Brest Yncréa Ouest et financé dans le cadre du Contrat Plan Etat Région (CPER) 2015-2020 dénommé "Infrastructure de Recherche pour Observatoires Marins Innovants (IROMI)" avec le concours de la région Bretagne, du conseil départemental du Finistère, de Brest métropole et enfin du fond européen de développement régional (FEDER).

à partir de fichiers ".wav" et également de faire l'acquisition de signaux [ASM](#) jusqu'à 5 voies de réception. Cependant, pour des raisons de synchronisation d'horloge au delà des capacités de la plateforme, nous utiliserons ici le même système d'émission nomade que celui utilisé lors des expérimentations en lac, connecté à un projecteur Neptune sonar D/26, visible sur la photo de droite de la figure 5.11. L'émetteur est alors submergé après calibration au centre de la plateforme LMAIR à une profondeur de 1.5 mètres.



FIGURE 5.11 – Expérimentation en rade de Brest, Zodiac mobile (gauche) et bouée fixe (droite)

Scénario de mission et conditions de l'environnement

L'expérimentation a eu lieu en deux sessions de 3 heures. La première s'est déroulée le mardi 5 juillet 2022 après-midi et, suite à un problème que l'on présente sous-section suivante, la deuxième s'est déroulée le mercredi 6 juillet 2022 au matin. Les conditions météorologiques et marines étaient similaires pour les deux sessions :



FIGURE 5.12 – Vue GPS de l'une des trajectoires

Paramètre	Valeur
Température air	22 °C à 24 °C
Température eau	17.8 °C
Vitesse du son dans l'eau (SVP)	1514 m/s
Vitesse courants marins	0 – 3 noeuds
Vitesse du zodiac	1 – 5 noeuds
Profondeur des fonds marins	3 – 5 mètres
Aire de mission utilisée (session 1)	0.2 km ²
Aire de mission utilisée (session 2)	0.15 km ²

TABLE 5.2 – Conditions environnementales de l'expérimentation en rade de Brest

Les différentes trajectoires réalisées se rapprochent le plus possible d'une trajectoire de type boustrophedon. Une contrainte technique liée à l'utilisation du NI DAQ USB-6212 connecté à Matlab fait qu'un enregistrement dure 10 minutes et le processus d'enregistrement est de nouveau lancé, cela donne des morceaux de missions non contiguës. Ce seront donc des portions de la mission qui seront utilisées pour réaliser l'estimation de positionnement.

Problème de centrale inertielle

Malheureusement, deux problèmes liés à la centrale inertielle ont été rencontrés. Malgré le soin apporté à la préparation spécifique pour l'IMU et sa calibration pour chaque session, elle n'a pas pu être exploitable pour cette expérimentation. Le premier problème a impacté le premier jour d'expérimentation, la session 1. Le système de réception à l'avant du bateau a subi une sollicitation mécanique qui a décalé de plusieurs degrés son orientation par rapport à l'axe du cap du bateau. Cet angle a de plus légèrement varié au cours de la mission dont l'estimation ou la mesure n'a pas été possible. Un premier post-traitement le jour même après la session 1 a permis de mettre en évidence ce défaut, ce qui a donné lieu à la session 2. Lors de cette session, le mercredi 6 juillet matin, le système de réception a été cette fois-ci plus lourdement fixé à l'avant du Zodiac.

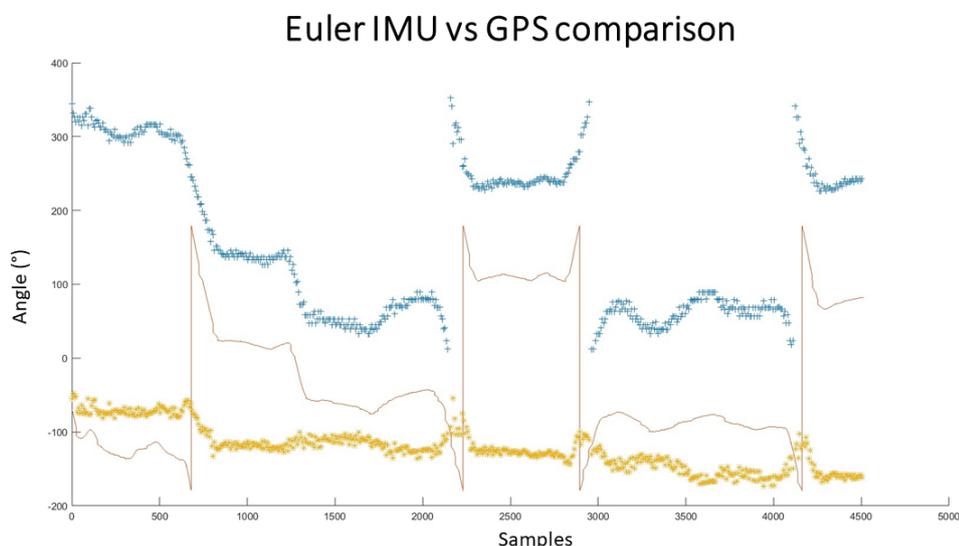


FIGURE 5.13 – Défaut IMU pour l'une des sections de la session 2 : en **bleu** discontinu l'angle de cap GPS, en **rouge** continu l'angle de cap IMU et en **jaune** la différence entre les deux

Le deuxième problème a été rencontré plus tard, après l'été, lors des post-traitements pour réaliser l'estimation de positionnement par l'algorithme proposé. En effet, les résultats constatés de l'IMU ont été largement moins bons que prévu. La figure 5.13 montre la comparaison entre le cap GPS et le cap IMU après filtrage. La forme que décrivent ces courbes est similaire mais l'erreur est plutôt de l'ordre de 50° , ce qui est trop pour obtenir une estimation de positionnement fiable.

Il faut cependant faire la différence entre les deux valeurs. Le cap estimé par le GPS est naturellement différent de celui estimé par l'IMU. Par exemple, si le

Zodiac se déplace en ligne droite mais que du fait des courants marins son angle de cap est orienté vers la droite (familièrement "en crabe"), le **GPS** estimera le cap du bateau comme parallèle à la ligne droite et l'**IMU** estimera le cap du bateau comme étant incliné.

Néanmoins malgré ce décalage naturel, la différence entre **GPS** et **IMU** est principalement provoquée par l'imprécision de la centrale inertielle. Plusieurs tentatives pour palier à cela ont été développées à partir des mesures de l'**IMU** :

- Afficher le cap avec combinaisons des 3 capteurs (magnétomètre, gyroscope et accéléromètre) directement en sortie de la centrale.
- Afficher et filtrer le cap avec combinaisons des 3 capteurs (magnétomètre, gyroscope et accéléromètre) avec un filtre de Kalman **KF**.
- Afficher et filtrer le cap magnétique seul, sans information du gyroscope et de l'accéléromètre. Avec **KF** et sans **KF**.
- Afficher et filtrer le cap inertiel seul, c'est à dire avec gyroscope et accéléromètre mais sans magnétomètre. Avec **KF** et sans **KF**.
- Estimer le biais entre l'information **GPS** et **IMU** (figure 5.13) par régression linéaire sur toutes les sections de la session 2 avec pour objectif d'obtenir un possible biais constant de manière à le compenser. Cependant, le biais n'a pas pu être déterminé comme étant constant.
- Enfin, utiliser un filtre de Kalman étendu **EKF** classique pour l'estimation de l'angle de cap, qui corrige le biais en ajoutant le **GPS** comme mesure. On fusionne donc les données **IMU/GPS**. Mais cette solution n'a non plus pas donné satisfaction.

En conclusion, la mesure de l'angle de cap du Zodiac, cruciale pour la précision de l'estimation de positionnement, n'a pas pu être exploitée avec la mesure de l'**IMU** car trop éloignée de la réalité.

Pour tout de même obtenir des résultats, nous avons donc décider d'utiliser l'estimation de l'angle par le **GPS**. Il ne s'agit pas d'un angle parfait, mais comparable à une très bonne **IMU**. Son défaut majeur est que cet angle est estimé par période de une seconde ce qui limite grandement l'algorithme de positionnement proposé qui sera par conséquent rafraîchi seulement chaque seconde au lieu de 250 ms.

Paramètre (Notation)	Valeur
Position bouée fixe	48.38243 latitude -4.407295 longitude
Fréquence échantillonnage enregistrement (f_s)	96153 Hz
Période des signaux de communication ASM (T_{com})	3 s
Durée de communication ASM	0.3 s
Période de rafraîchissement de l'algorithme (Δ_t)	1 s
Offset PPS	0.197 ms
Fréquence pure-tone (f_{pt})	20 kHz
Fréquence centrale de la donnée (f_0)	28 kHz
Filtre estimateur	EKF
\mathbf{P}_0	\mathbf{I}_4
\mathbf{R}	$\text{diag}(\mathbf{var}_R)$
\mathbf{Q}	$\text{diag}(\Delta_t^6 \ \Delta_t^6 \ \Delta_t^6 \ \Delta_t^6)$

TABLE 5.3 – Paramètres de l’expérimentation en rade de Brest

Résultats

Numéro de la trajectoire	\mathbf{var}_R
#1 ($t_{\text{max}}=600$ s)	$(0.3 \ 2.9 \ 2.9)^T$
#2 ($t_{\text{max}}=300$ s)	$(0.01 \ 0.01 \ 0.09)^T$
#3 ($t_{\text{max}}=600$ s)	$(13 \ 9.1 \ 1)^T$
#4 ($t_{\text{max}}=200$ s)	$(0.8 \ 20 \ 3.6)^T$

TABLE 5.4 – Valeurs de \mathbf{var}_R pour chaque trajectoire

Parmi les 6 sections de la session 2, nous choisissons d’en présenter 4. Les figures 5.14 et 5.15 montrent les quatre trajectoires choisies. Pour simplifier la lecture des axes, la position de départ de toutes les sections commence à $(0, 0)$ et la position connue de la bouée est représentée par une étoile rouge. La ligne bleue en pointillés représente l’estimation de position de l’état de l’art ROSB, tandis que la ligne rouge en pointillés représente l’algorithme de positionnement de ce manuscrit. La position réelle, représentée par une ligne noire continue, est la mesure GNSS.

La première trajectoire est une trajectoire proche de la bouée fixe mais longue (10 minutes) et comportant plusieurs croisements. La deuxième est une trajectoire

simple et courte (5 minutes) avec un demi-tour. La troisième section choisie est la plus proche d'une trajectoire type boustrophedon et dure 10 minutes. La dernière trajectoire choisie est la plus éloignée de toutes. Elle comporte un demi-tour et une ligne droite.

Les figures 5.16 présentent l'erreur de positionnement et RMSE au fil du temps pour chaque trajectoire. Le RMSE reflète la confiance de l'estimation de l'EKF.

Enfin, les tableaux 5.5 et 5.7 détaillent les résultats complets. Pour le premier tableau 5.5, la première colonne est la moyenne de l'erreur de position en mètre pour l'estimation de v_r avec extraction du signal *pure-tone* (détaillé chapitre 3). La deuxième colonne est cette fois-ci calculée avec l'estimation de v_r au moyen de la méthode du banc de filtres Doppler (détaillé chapitre 3). La dernière colonne est l'estimation de positionnement par l'état de l'art ROSB donc sans v_r (et ω_b).

Le deuxième tableau 5.7 montre les résultats de l'expérimentation pour les 4 trajectoires en utilisant l'algorithme développé et l'estimation de v_r par extraction du *pure-tone*. Toutefois, on fait varier T_{com} par pas de 3 secondes. On garde les mêmes matrices de covariance de bruit que celles caractérisées dans le tableau 5.4.

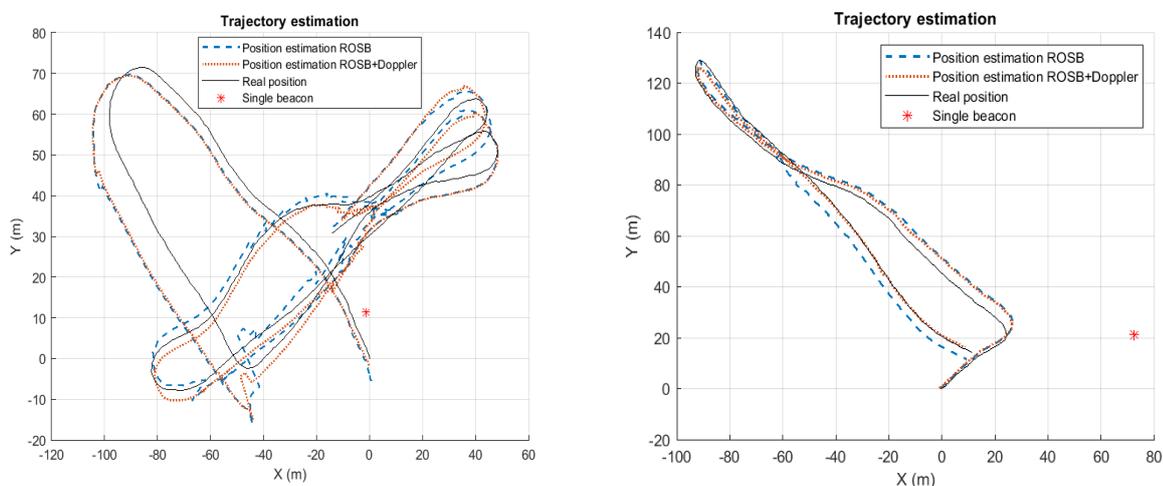


FIGURE 5.14 – Trajectoire #1 à gauche, trajectoire #2 à droite

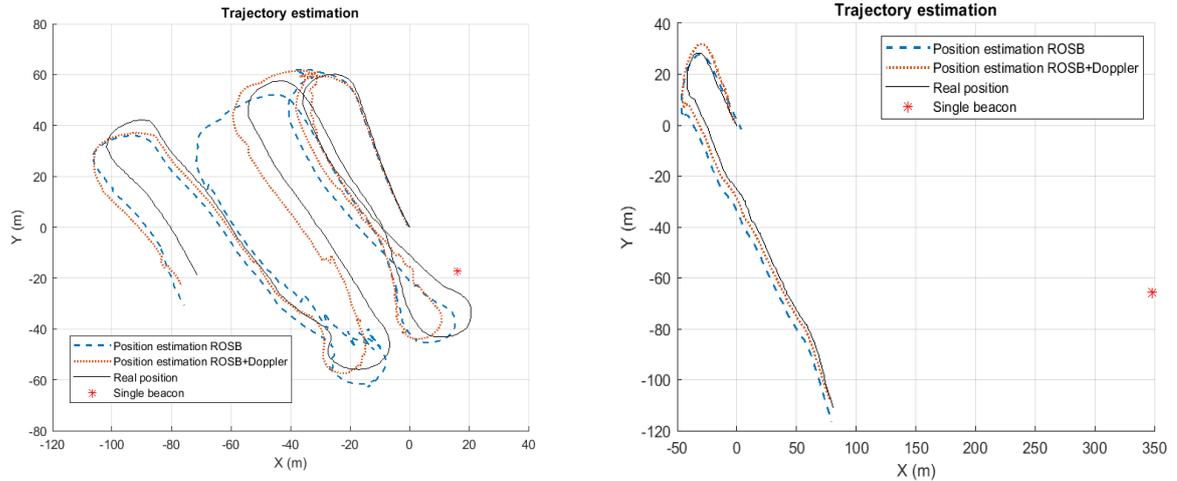


FIGURE 5.15 – Trajectoire #3 à gauche, trajectoire #4 à droite

Numéro de la trajectoire	E-P moyen avec estimation v_r basée sur le signal <i>pure tone</i>	E-P moyen avec estimation v_r basée sur banc de filtres	E-P moyen état de l'art (méthode ROSB)
#1 ($t_{\max}=600s$)	4.6225 m	4.7563 m	5.4287 m
#2 ($t_{\max}=300s$)	2.1537 m	1.9731 m	2.9931 m
#3 ($t_{\max}=600s$)	5.0740 m	5.1593 m	8.6719 m
#4 ($t_{\max}=200s$)	4.2069 m	5.804 m	6.2746 m

TABLE 5.5 – Résultat de 4 sections de l'expérimentation en rade avec le filtre EKF selon la méthode d'estimation Doppler et comparaison avec l'état de l'art.

Numéro de la trajectoire	Distance parcourue en m	%etd max	%etd moyen
#1 ($t_{\max}=600s$)	698.4989	1.7179	0.6617
#2 ($t_{\max}=300s$)	353.3752	1.4149	0.6094
#3 ($t_{\max}=600s$)	681.5850	1.7606	0.7444
#4 ($t_{\max}=200s$)	190.5176	4.1990	2.2081

TABLE 5.6 – Résultats sous forme de %etd pour les 4 sections de l'expérimentation en rade de Brest avec le filtre EKF et l'estimation de v_r basée sur le signal *pure tone*.

T_{com}	E-P moyen #1 en m	E-P moyen #2 en m	E-P moyen #3 en m	E-P moyen #4 en m
3 secondes	4.6225	2.1537	5.0740	4.2069
6 secondes	5.0982	3.3472	7.1929	4.4613
9 secondes	5.6782	3.3813	7.4395	5.0431
12 secondes	6.0585	3.4354	8.4071	5.6932
15 secondes	DIV	2.5071	8.2798	5.3535
18 secondes	13.71	4.4618	9.3593	7.5195

TABLE 5.7 – Résultats de 4 sections de l’expérimentation en rade avec le filtre **EKF** et estimation v_r basée sur le signal *pure tone* en fonction des périodes de communication **ASM**. La notation **DIV** désigne une divergence de l’algorithme.

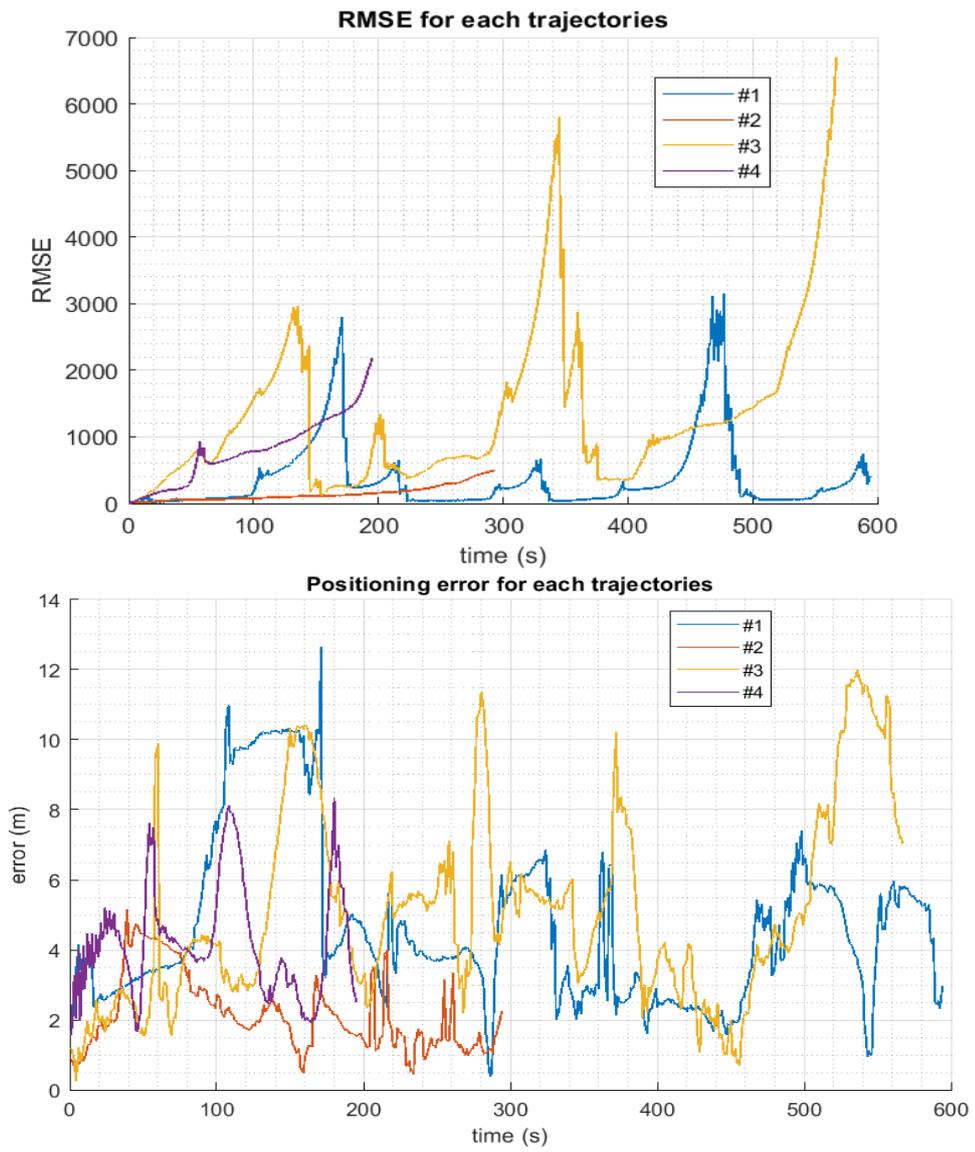


FIGURE 5.16 – Représentation de l'erreur de positionnement et de son RMSE

Discussion

Chacune des trajectoires présentées dans le tableau 5.5 ont leur erreur de position moyenne inférieure à 6 mètres, par rapport au GNSS, pour l'algorithme développé. C'est une affirmation qui peut être étendue à l'ensemble des deux sessions d'expérimentation, quelle que soit la distance ou la complexité de la trajectoire suivie. Cependant, on peut observer qu'un chemin plus simple est évidemment plus facile à estimer (comme le #2) et la distance joue également un rôle (le #2 est meilleur que le #4). La figure 5.16 met en évidence le fait qu'après 5 minutes de localisation, l'erreur ne s'accroît pas et donc, l'algorithme ne diverge pas. L'erreur augmente principalement pendant les virages pour les raisons suivantes :

- Le courant marin entraîne une dérive du bateau qui a un impact sur l'angle de cap, l'angle d'arrivée de la communication ASM, puis la vitesse relative v_r .
- L'angle d'arrivée de la communication ASM n'est pas mesuré ou estimé par ASM, mais par linéarité de l'EKF.
- Entre chaque communication, l'EKF ne mesure que l'angle de cap ψ .

Après achèvement du post-traitement, on constate que les erreurs de positionnement moyens obtenus en utilisant l'estimation du Doppler par le *pure-tone* sont meilleurs que ceux obtenus avec banc de filtres. Ce résultat est crucial car il démontre l'intérêt de l'ajout du signal monochromatique dans la forme d'onde des communications acoustiques. L'estimation du décalage Doppler grâce au signal monochromatique est alors non seulement plus rapide à calculer mais également plus précis.

Les résultats affichés dans le tableau 5.7 montrent que, de la même manière qu'en simulation dans le chapitre 4, les erreurs de positionnement augmentent progressivement lorsque les périodes de communications augmentent. Pour la section #1 à $T_{\text{com}} = 15$ s, on note une divergence. La période de 20 secondes suivante contient une grande erreur au milieu de la section puis re-converge pour la fin de la section.

Le tableau 5.6 montre les résultats sous forme de *percentage of error on travelled distance, %etd*. Ces valeurs permettent une comparaison avec les résultats obtenus en simulation. Pour les trois premières trajectoires, on note des résultats très proches de ceux obtenus en simulation (tableaux 4.9 et 4.10 entre autres). Le résultat de la dernière section s'explique par la faible distance parcourue en 200 s. La vitesse moyenne du Zodiac a été moindre par rapport aux autres sections. Ajouté à cela l'écart de l'erreur de positionnement moyen entre les deux estimations de v_r possible, l'estimation du décalage Doppler a probablement été plus erroné sur cette section. Enfin, il s'agit également de la section avec le plus grand écart

balise-Zodiac malgré une trajectoire moins complexe.

En conclusion, nous avons pu observer grâce à cette expérimentation que le système proposé dans le cadre de ce manuscrit, qui utilise judicieusement l'information de Doppler, est plus performant que l'état de l'art [ROSB](#) que ce soit en simulation sans contraintes environnementales ou en expérimentation en conditions réelles.

5.5 Essais mobiles en condition de plus grande profondeur à Vilanova i la Geltrú, Espagne

Suite aux essais en rade de Brest, nous avons observé quatre limites :

- Les simulations et expérimentations ne sont pas en trois dimensions. Malgré le fait que l'ajout d'un capteur de pression est peu complexe et peu coûteux, et que l'ajout de mesures de l'[IMU](#) a volontairement été omis, l'angle d'arrivée de la communication [ASM](#) est plus complexe en 3D et donc potentiellement induit plus d'erreur.
- L'utilisation de l'angle de cap provenant d'une centrale inertielle n'a pas pu être validé lors de l'expérimentation précédente. Même si l'estimation du [GPS](#) reste une très bonne indication sur la performance du système proposé, la période de rafraîchissement de l'algorithme était limitée à une seconde. En simulation, fixer la période à $\Delta_t = 0.01s$ ou à $\Delta_t = 0.2s$ n'a pas significativement changé la précision ou l'exactitude de l'algorithme. En revanche, en fixant la période à $\Delta_t = 1s$, l'estimation converge toujours jusqu'à la fin de la mission mais la précision et l'exactitude de l'estimation de positionnement diminuent.
- Les communications acoustiques sous-marines ont été réalisées en petits fonds (< 10 m). Même si théoriquement les plus fortes profondeurs sous-marines induisent moins de contraintes pour les communications [ASM](#) (moins de multi-trajets et moins de bruit), elles ont quand même des contraintes liées à la bathymétrie par exemple (déjà développé dans le chapitre 2).
- Enfin, nous avons réalisé l'expérimentation précédente en se basant sur un système à communication [OWTT](#) grâce à la synchronisation du [GPS](#). Dans la réalité, un [AUV](#) utilisera principalement un système [TWTT](#) à base de transpondeur pour communiquer donc estimer le temps de vol et compenser le décalage fréquentiel Doppler.

En dehors de la première limite qui n'est pas réalisable en terme de temps, une dernière expérimentation a été planifiée dans le cadre de cette thèse. Grâce à une

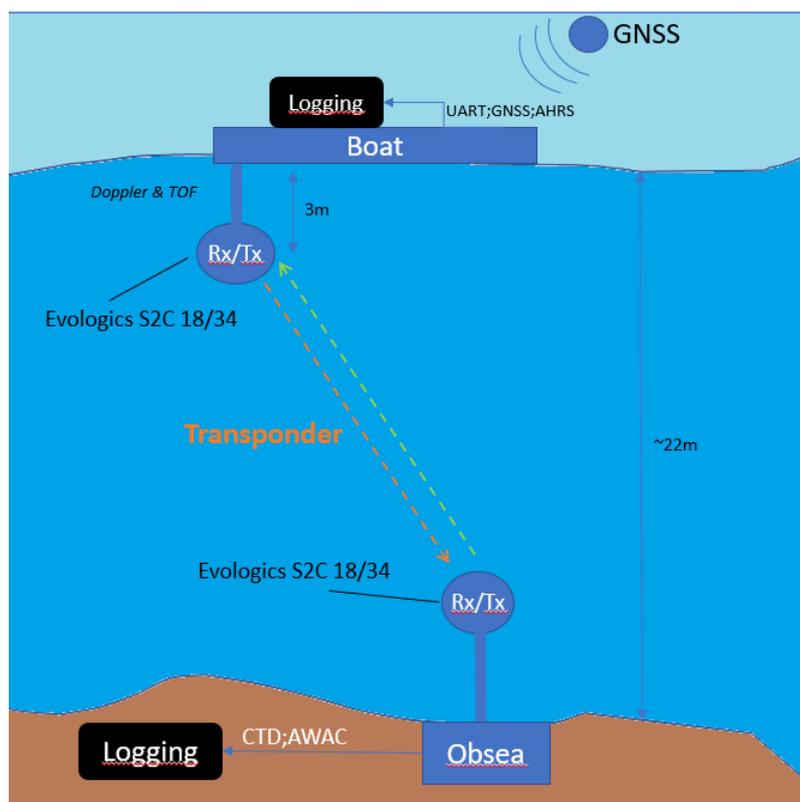


FIGURE 5.17 – Plan de l’expérimentation à Vilanova i la Geltrú, Espagne

collaboration de type Transnational Access (TNA) en lien avec le projet européen *Metrology for Integrated Marine Management and Knowledge-Transfer Network* (MINKE) et l’université polytechnique de Catalogne (UPC) située à Vilanova i la Geltrú en Espagne, l’équipe SEACom a pu utiliser les moyens d’essais mis en place par l’équipe SARTI, plus précisément, l’observatoire câblé OBSEA [23] submergé à environ 22 mètres de profondeur, où un transpondeur a pu être déployé.

La figure 5.17 montre le plan de l’expérimentation. Ce plan a servi de base pour élaborer le protocole de l’expérimentation. Les essais ont eu lieu du 22 mai 2023 au 24 mai 2023 dont deux jours d’essais en mer, les 22 et 23 mai.

Protocole expérimental

L’estimation de positionnement reste en 2D. En effet, la profondeur de la station Obsea est fixe et le bateau Zodiac reste en surface. Le principe général reste le même par rapport à la précédente expérimentation : un système d’enregistrement sauvegarde les données pour l’estimation en post-traitement.

Cependant, comme les communications [ASM](#) sont dans un mode transpondeur, c'est le Zodiac image de l'[AUV](#) qui envoie à intervalle régulier des communications dans le but d'obtenir une réponse de la balise. Le matériel utilisé est cette fois-ci le suivant :

- Deux modems acoustiques Evologics S2C (Sweep Spread Carrier) 18/34 WISE. Ils fonctionnent sur la même bande de fréquence que les expérimentations précédentes, à savoir la bande 18 kHz - 34 kHz. En revanche, le protocole de communication est propre à Evologics et il n'est pas possible d'y avoir accès pour modification. Ces modems peuvent fonctionner en mode transpondeur, ce qui permet d'obtenir l'estimation du décalage Doppler et le temps de vol sans synchronisation des horloges. Cette technique a fait l'objet d'un paragraphe chapitre 2 (cf figure 2.1). Le modem côté Zodiac envoie une communication [ASM](#), dont la donnée sera ici une chaîne de caractères valant "bonjour", puis attend ensuite la réponse sous forme d'acquiescement de la part du modem fixé sur OBSEA.

Nous choisissons la période de communication T_{com} à 5 secondes, de manière à avoir suffisamment de portée pour envisager de plus longues trajectoires malgré le système [TWTT](#). La portée théorique maximale entre les deux modems est alors d'ordre de grandeur :

$$(T_{\text{com}} - T_{\text{trait}}) \cdot c_w / 2 \quad (5.4)$$

Ici, on considère le temps de traitement des modems T_{trait} à une seconde. Avec $c_w = 1500$ m/s, la portée théorique maximale est de l'ordre de 3000 m. Le modem côté surface est branché via un port série au boîtier d'enregistrement, comme montré par le haut de la figure 5.18.

- L'[IMU](#) choisie est une XSENS MTI-670. Il s'agit cette fois-ci d'une [AHRS MEMS](#) reconnue dans le milieu industriel comme étant fiable, simple d'utilisation et à embarquer, facile à calibrer et précise. Malgré un coût d'environ 1000 euros bien plus élevé que la Sparkfun, ce choix a été porté par l'importance cruciale de l'exploitation de l'angle de cap pour la réussite de l'expérimentation. L'[AHRS](#) est également connectée en série dans le boîtier d'enregistrement, directement avec le [GPS](#) servant de référence pour le positionnement. Le [GPS](#) ne sert plus pour la synchronisation et donc la voie du [PPS](#) n'est pas enregistrée.
- Le boîtier d'enregistrement, faisant le lien pour ces trois voies, a été développé avec l'aide de l'équipe SEACOM. En plus de batteries et d'un convertisseur Ethernet vers port série pour l'enregistrement des données du modem, les trois voies sont donc connectées en analogique à la même carte NI DAQ

USB-6212 que l'expérimentation précédente. La raison de l'utilisation de l'enregistrement analogique plutôt que numérique malgré la présence de trois voies numériques est la synchronisation entre les trois signaux. En utilisant le même programme `Matlab` pour décoder les signaux UART que précédemment, l'exploitation des données est tout aussi aisée. L'enregistrement, cette fois-ci sans coupure, est effectué sur un PC avec `Matlab` branché en USB.

- Enfin, côté OBSEA, l'autre modem configuré en mode transpondeur est connecté en Ethernet au réseau, ce qui permet d'y accéder à distance directement sur le Zodiac pour monitorer le bon fonctionnement du modem. Un capteur `CTD` est installé sur la plateforme pour obtenir une estimation de la vitesse du son dans l'eau tout au long de la mission. Elle a été estimée à $c_w = 1512$ m/s sur la durée de l'expérimentation.

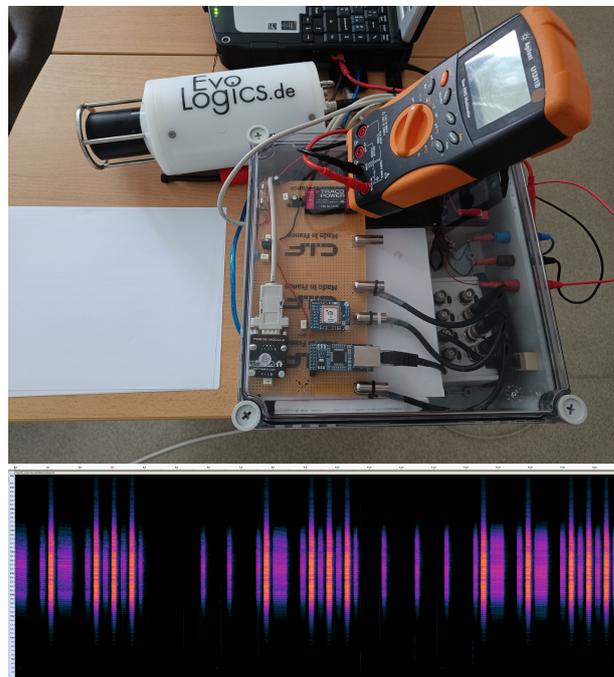


FIGURE 5.18 – Modem Evologics S2C 18/34 WISE connecté au boîtier d'enregistrement en haut, extraits de signaux reçus sur Obsea pendant l'expérimentation en bas

Résultats

Les essais ont pu être réalisés avec succès, et l'exploitation des données a commencé mais n'a pas pu être finalisée pour le manuscrit. Nous avons cependant noté plusieurs phénomènes. En dépit de la valeur de T_{com} à 5 secondes et une

réel puis comparer les bénéfices de l'ajout de la vitesse relative par information de Doppler par rapport au temps de vol uniquement (ROSB) ou Doppler uniquement. La zone de mission étant très réduite, cette expérimentation en bassin n'avait pas pour objectif de proposer une comparaison directe avec la simulation ou avec l'état de l'art industriel. Au résultat, l'expérimentation a été concluante. Le matériel et les méthodes de réception seront ré-utilisés pour l'expérimentation suivante en mer à Brest. Les résultats en eux-mêmes ont mis en valeur l'intérêt de l'ajout de l'information du Doppler compensé par les communications acoustiques dans le cadre du positionnement des AUVs par une balise acoustique unique.

La deuxième campagne d'essais, précédée de deux expérimentations de préparation, a été réalisée en fin de deuxième année de thèse. L'objectif était d'enregistrer en mer des trajectoires classiques de manière à post-traiter l'estimation de positionnement. Les conditions sont simplifiées par rapport à une mission type d'un AUV (trajets OWTT et bonne synchronisation), cependant toutes les conditions environnementales sont réunies pour obtenir une analyse pertinente sur les performances du système développé : courants, inertie du véhicule, bruits environnants, valeurs aberrantes, etc... Les résultats nous indiquent que les erreurs de positionnement moyennes obtenues en utilisant l'estimation du Doppler par le *pure-tone* sont meilleurs que ceux obtenus avec banc de filtres. On constate de nouveau, comme tout au long des résultats obtenus dans ce manuscrit, que l'ajout de la vitesse relative par estimation de Doppler rend l'estimation de positionnement plus exacte que pour l'état de l'art ROSB. Enfin, à l'échelle du pourcentage de la distance parcourue et en dégradant le nombre de communications acoustiques par minute, les résultats sont proches de ceux obtenus en simulation.

La dernière campagne d'essais a eu lieu dans le cadre d'une collaboration TNA avec l'université polytechnique de Catalogne. La cible de cette expérimentation était de compléter la précédente expérimentation qui fut un succès. Pour rendre l'analyse complète, nous choisissons de faire l'expérimentation en mer près de Vilanova i la Geltrú à moyens fonds. La balise, située à environ 22 mètres de profondeur, est en mode transpondeur et répond à la demande de l'AUV. Le contexte est alors sans synchronisation GPS, en TWTT et avec une centrale inertielle AHRS performante. Les résultats seront attendus lors d'un article courant 2024.

Chapitre 6

Conclusion générale et perspectives

6.1 Synthèse

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont été motivés par la problématique de la navigation des drones sous-marins autonomes [AUVs](#). Dans le milieu sous-marin, l'absence de système de navigation de type [GNSS](#) et de communication sans-fil à haut débit telles que les radios communications dans l'air implique l'intégration d'un système de navigation lourd, volumineux et complexe dans l'état de l'art. Dans le chapitre [1](#), nous avons introduit le contexte de la thèse, le domaine des véhicules sous-marins ainsi que l'état de l'art des communications sans-fil en milieu sous-marin. A la fin du chapitre, nous avons introduit les recherches en relation avec cette thèse. Le système proposé utilise les communications [ASM](#) pour le positionnement et donc la navigation par le biais d'une forme d'onde adaptée et de capteurs peu volumineux. Ce système est en l'occurrence particulièrement adapté pour les μ -[AUVs](#), ces derniers ne disposant que d'un espace très limité. L'utilisation des communications simultanément pour l'échange des données en temps réel avec une station et pour le positionnement permet de réduire le nombre de capteurs dans le véhicule.

Le chapitre [2](#) présente l'état de l'art du positionnement pour les [AUVs](#). Ce chapitre souligne la diversité des systèmes existants. Dans le milieu industriel, le système le plus courant est une combinaison de systèmes de positionnement tels que l'[INS/DVL](#) combinés à un système de positionnement par acoustique du type [LBL](#) ou [USBL](#). Ces technologies sont reconnues pour leur performance même pour des durées de missions allant jusqu'à une vingtaine d'heures. En deuxième partie de ce chapitre, nous avons vu les algorithmes qui fusionnent les données de ces systèmes de positionnement ainsi que les algorithmes qui font le lien entre estimation de la position et navigation sous-marine. Dans nos contributions, nous avons choisi

deux de ces estimateurs, en l'occurrence l'[EKF](#) et l'[UKF](#) pour comparer leurs performances.

Le chapitre [3](#) présente les premières contributions de la thèse. Nous présentons le modèle de communication [ASM](#), et notamment le signal d'émission comprenant un signal hors bande utile de la communication [ASM](#), un signal dit *pure-tone*, permettant d'estimer à la réception de façon précise et en continu l'effet Doppler, image de la vitesse relative de l'[AUV](#) par rapport à l'émetteur. Cette estimation Doppler est utilisée à la fois pour décoder le signal reçu mais également, en plus de l'information de temps de vol, pour estimer le positionnement de l'[AUV](#). Dans ce chapitre, nous présentons une seconde méthode d'estimation Doppler basée sur la corrélation entre le signal reçu et un banc de filtres adaptés dopplérisés. Si cette méthode possède l'avantage de ne pas employer de signaux hors de la bande utile, elle requière une complexité de calcul bien plus importante que la méthode basée sur le signal *pure tone*. Les deux méthodes seront comparées lors des expérimentations. Ensuite l'architecture générale du système est introduite. En considérant un signal [GNSS](#) pour l'initialisation de la position, seuls 4 capteurs sont utilisés : capteur de pression, centrale inertielle [AHRS](#), capteur de vitesse de son dans l'eau [SVS](#) et donc le [GNSS](#) lorsque l'[AUV](#) est en surface. Un modem [ASM](#), le système d'estimation de positionnement et le système de navigation complètent le système. Enfin, le modèle 3D puis le modèle 2D, qui seront utilisés pour les simulations et les expérimentations, sont exposées. On montre également que le système peut être utilisé soit avec une bouée fixe à la surface ou également avec une balise sous-marine fixe dans les fonds marins.

Les essais en simulation sont exposés dans le chapitre [4](#). Les simulations sont réalisées avec le logiciel `Matlab` en retenant une architecture comprenant deux algorithmes : un algorithme servant à modéliser l'environnement et un autre calculant le positionnement de l'[AUV](#). Ce dernier est ré-utilisé ensuite pour les expérimentations. Pour analyser la performance du système de positionnement proposé, sept scénarios sont mis en place. Chaque scénario est spécifié pour permettre des analyses sur chaque paramètre impactant la précision du positionnement à savoir le temps entre chaque signal de communication [ASM](#), la durée de mission, le niveau du bruit, le positionnement de la balise ou encore le type de trajectoire. On conclut par une analyse des résultats, des discussions sur ceux-ci par rapport à l'état de l'art et les limitations des simulations en 2D.

Toutes les expérimentations menées au cours de la thèse sont développées dans le chapitre [5](#). Les premiers essais sont réalisés en laboratoire dans une bassin de 6 m^3 avec une trajectoire de type lemniscate et la forme d'onde décrite dans le chapitre [3](#). Le matériel utilisé en réception (pré-ampli RX et carte réception NI DAQ

USB-6212) est identique aux essais expérimentaux qui suivront. L'expérimentation en rade de Brest ainsi que les essais préliminaires en lac (réception acoustique en lac et centrale inertielle en laboratoire) ont donné lieu à plusieurs résultats dans un environnement réel confirmant la performance de l'algorithme développé dans ce manuscrit. Pour compléter les expérimentations, une autre expérience en mer, cette fois-ci à plus grand fond, a eu lieu en fin de thèse dont les résultats donneront lieu à un article de journal planifié pour la fin d'année 2024.

6.2 Production scientifique

Ce travail de thèse a été présenté dans 3 conférences dont 2 de niveau international avec actes :

1. - Garin, R., Vanwynsberghe, C., Forjonel, P., Tomasi, B., & Bouvet, P.-J. (2021, September). Simultaneous underwater acoustic localization and communication : an experimental study. OCEANS 2021. <https://hal.science/hal-03456667> [38]
2. - Garin, R., Bouvet, P.-J., Forjonel, P., & Tomasi, B. (2022, September). Performance of autonomous underwater vehicle positioning by acoustic communication. Sea Tech Week 2022 Conference. <https://hal.science/hal-03814661> [34]
3. - Garin, R., Bouvet, P.-J., Forjonel, P., & Tomasi, B. (2023, June). Sea experimentation of single beacon simultaneous localization and communication for AUV navigation. OCEANS 2023. <https://hal.science/hal-04132884> [36]

La première conférence, OCEANS San-Diego & Porto a eu lieu en 2021 en distanciel du fait du contexte sanitaire lié à la COVID-19. L'article [38] et la présentation portaient sur les résultats d'expérimentations en bassin présentés au chapitre 5. Cette expérimentation faisait directement suite à une série de premières simulations initiées au début des travaux de thèse. L'objectif était de montrer l'intérêt de l'ajout de l'information du Doppler par estimation sur le signal *pure-tone* par rapport au système de positionnement de l'état de l'art ROSB.

La deuxième conférence, Sea Tech Week 2022 a eu lieu à Brest, en Septembre 2022. Elle n'a pas donné lieu à un article de conférence mais à une présentation [34]. La présentation a porté sur une partie des simulations présentées dans le chapitre 4. Elle a eu lieu après les essais en mer ce qui a permis d'utiliser les bruits constatés lors des expérimentations bien que les données n'avaient pas encore pu être totalement exploitées. De plus, avant cette conférence de fin septembre, un séminaire interne sur le même sujet a été présenté mi septembre à toute la recherche

au sein de l'ISEN Yncréa Ouest, L@bISEN [35].

IEEE OCEANS Limerick a été la dernière conférence dans laquelle ces contributions de thèse ont été présentées. Elle a eu lieu en juin 2023 avec un article de conférence [36] publié en parallèle de la présentation. Le sujet était la présentation des résultats de l'expérimentation en rade de Brest qui avait eu lieu en juillet 2022. Nous avons pu alors démontrer le fonctionnement en conditions réelles du système de positionnement proposé par rapport, entre autre, à la simulation et à l'état de l'art.

Enfin un article de journal est en cours de finalisation [37] et devrait être soumis pour fin 2024, il portera sur les résultats de l'expérimentation en mer à Barcelone grâce à la collaboration Transnational Access avec l'université polytechnique de Catalogne.

6.3 Perspectives

Les travaux de cette thèse ouvrent le champ à de multiples perspectives de développement. D'un point de vue applicatif, nous en avons déjà parlé dans les chapitres introductifs 1 et 2 mais la cible idéale pour un tel système est le micro-AUV (abrégé μ -AUV dans ce manuscrit). Du fait de la contrainte de taille, de poids, d'énergie et enfin de coût, les μ -AUVs bénéficieraient avantageusement d'un tel système de navigation. Il est tout à fait possible d'y ajouter d'autres capteurs qui n'ont pas fait l'objet de travaux dans le cadre de ce sujet mais qui peuvent dans certains cas améliorer la précision de positionnement tels que des systèmes optiques, radiofréquence ou même DVL d'entrée de gamme. Enfin, les μ -AUVs ne sont pas conçus pour des missions longues et parcourant des dizaines de kilomètres, ce qui fait écho aux résultats expérimentaux de ce manuscrit.

Pour les AUVs plus globalement un tel système est, en comparaison avec l'état de l'art, rapide à mettre en place et ne nécessite aucune calibration. En conséquence, l'utilisation du système introduit dans cette thèse permettrait un déploiement rapide pour des missions courtes ou urgentes.

En terme de perspectives de recherche, ce sujet ouvre la voie à plusieurs axes possibles. Premièrement, la thèse s'est concentrée sur un aspect en deux dimensions de la problématique. Grâce à l'ajout d'un capteur de pression et des informations complètes de la centrale inertielle, le fonctionnement en trois dimensions pourrait être envisagé en utilisant le modèle présenté dans le chapitre 3. Plus le modèle est complet et l'estimateur garni de mesures, plus le système sera précis et exact.

Malgré le fait que l'angle d'arrivée de la communication est une inconnue, et le sera d'autant plus si on considère trois axes au lieu de deux, la relative bonne linéarité des trajectoires et des vitesses engagées donne une bonne confiance sur un fonctionnement correct du système. En revanche, les biais (sous forme de décalage progressif de l'erreur) pour des missions durant plusieurs heures seront à mesurer. On peut également citer le recalage [GPS](#) comme méthode de correction du biais lors de la remontée à la surface de l'[AUV](#), qui n'a pas été traité dans les résultats de ce manuscrit.

De plus avec l'estimation du Doppler instantanée obtenue grâce à la forme d'onde spécifique à notre application de communication et positionnement simultanés, le système pourra être développé pour fonctionner en temps réel. La variable cruciale pour obtenir un positionnement le plus juste possible est le temps entre deux communications [ASM](#). Plus la zone de mission est réduite, plus les communications peuvent se faire de manière plus régulière et donc le positionnement d'autant plus précis. Un projet de drone de surface a été développé avec la collaboration d'étudiants de l'école ISEN Brest. Son rôle était d'implémenter le système de positionnement et communication simultanés développé dans le cadre de la thèse. Comportant un hydrophone de réception plongé sous l'eau, l'objectif était que le drone se positionne uniquement à l'aide du système positionnement proposé et ce en temps réel. Dans un premier temps prévu pour fonctionner en post-traitement puis en temps réel, ce projet de plusieurs années avec plusieurs étudiants n'a pas pu aboutir à temps pour la fin de cette thèse. Le prototype est montré en photo figure [6.1](#). Il est actuellement fonctionnel mécaniquement, en flottaison et est contrôlable à distance par une manette.

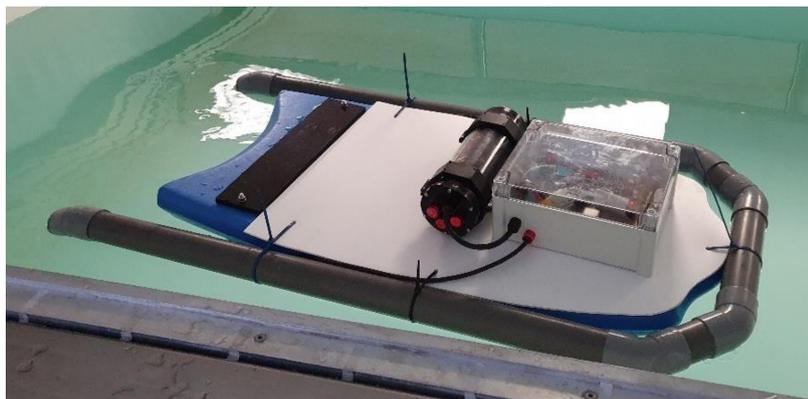


FIGURE 6.1 – Prototype de drone de surface autonome avec modem acoustique appelé "Porteur"

La partie navigation est à intégrer dans la chaîne de traitement. Dans l'état

de l'art de la navigation chapitre 2, nous avons présenté les techniques de commande et de pilotage d'un drone sous-marin autonome. On rappelle que les pilotes automatiques classiques pour les AUVs sont développés pour commander l'angle de cap, la vitesse linéaire ainsi que la profondeur dans la chaîne de contrôle. La dynamique du véhicule (sa position et ses valeurs de vitesses et d'orientations) est la partie qui a été traitée dans le cadre de cette thèse car la plus conséquente. Il reste ensuite à faire le lien entre position/état de l'AUV et la chaîne de commande décrite ci-dessus pour agir sur les *thrusters* du drone.

De même, il serait tout à fait possible de faire naviguer plusieurs AUVs à partir d'une même balise ASM. Dans l'état de l'art actuel, il est tout à fait possible de faire coexister plusieurs sources et/ou plusieurs récepteurs de communication ASM au sein d'un même bande de fréquence [7, 8, 73], ainsi il serait possible, pour plusieurs AUVs, de se positionner individuellement par rapport à une même balise et d'évoluer de manière autonome par rapport aux autres [25]. L'avantage de ces recherches seraient que le déploiement d'un ou plusieurs AUVs n'entraînerait pas de sur-coûts par rapport à au déploiement d'un AUV unique avec comme application potentielle les flottes ou les essais d'AUVs. Par ailleurs, dans les travaux de thèse, nous avons considéré une seule voie de réception, il serait possible d'augmenter le nombre de voies, ce qui permettrait d'une part d'augmenter la robustesse de la communication ASM du fait de l'exploitation de la diversité spatiale [10] et d'autre part d'obtenir une information sur l'angle d'arrivée et ainsi d'améliorer le positionnement tel un système USBL

Lors des travaux de la thèse, nous nous sommes concentrés sur des estimateurs de Kalman plutôt classiques tels que les filtres EKF et UKF. Si le filtre particulaire PF ne nous semble pas être une option viable du fait de sa complexité d'implémentation en particulier sur des petits systèmes embarqués, le système de proposé pourrait être amélioré en considérant un filtre tel que l'Adaptive Kalman Filter (AKF ou AEKF s'il est étendu) [68]. Ce dernier met à jour en temps réel la matrice de covariance du bruit en fonction de l'environnement et des mesures récoltées par l'estimateur.

Annexe A

Performance et calibration de l'angle de cap de la centrale inertielle

A.1 Protocole expérimental



FIGURE A.1 – Sparkfun 9DOF Razor IMU M0 (14001)

Le dernier élément qui n'a volontairement pas été encore présenté est l'[IMU](#). Le choix d'une centrale inertielle ultra low-cost a été volontaire, dans le but de valider les bons résultats des simulations. L'[IMU](#) 9DOF (9 degrés de liberté) Razor M0 de Sparkfun a été choisie du fait de son *firmware* libre d'accès, de la communauté autour de ce module et de son coût, autour de 20 euros à sa sortie (cf figure [A.1](#)). Il s'agit d'un module qui regroupe :

- Le capteur MPU-9250, répandu dans le domaine des [IMU](#) à bas coût. Il dispose d'un gyroscope, d'un accéléromètre et d'un magnétomètre dans les trois dimensions.
- Un micro-contrôleur 32-bit ARM Cortex-M0 compatible Arduino.
- Un port micro-sd qui autorise un enregistrement des données en parallèle du port UART.

— Un port batterie LiPo que l'on utilisera également.

L'ensemble fonctionne jusqu'à 250 Hz mais, pour l'enregistrement sur la carte micro-SD de toutes les données ainsi que de l'horodatage, nous choisissons 20 Hz ce qui suffit pour notre algorithme. Le *firmware* fourni avec le module permet déjà d'estimer certaines valeurs sans que nous ayons à le faire nous même telles que le cap, les angles d'Euler et les Quaternions.

L'objectif de cette expérimentation est de valider le fonctionnement de la centrale inertielle avant de réaliser l'expérimentation en mer : vérifier la véracité des valeurs de cap, des vitesses angulaires et des accélérations ainsi que sa tenue au long terme par un calcul du biais. De plus, on cherche à réaliser la calibration de l'IMU pour que le jour de l'expérimentation les mesures ne soient pas bruitées par l'environnement. Pour cela, on réalise une expérimentation en deux étapes. On se concentre uniquement sur la mesure du cap, cruciale pour l'expérimentation en mer et la plus sensible à l'environnement.

Première étape, en laboratoire avec le matériel représenté en figure A.2. La centrale inertielle est fixée mécaniquement à un servomoteur 270° lui même fixé à un étau. Le servomoteur et l'IMU sont branchés à une Arduino Uno. Un programme Matlab est développé pour commander le servomoteur et programmer une suite d'angles pour simuler une trajectoire lemniscate et boustrophedon pendant une heure au minimum. L'IMU transmet ses données à Matlab par le biais de l'Arduino. De cette manière, on peut afficher en temps réel l'angle de cap estimé et l'angle de cap réel. La figure A.3 est une capture de l'affichage pour l'utilisateur. On vérifie la commande visuellement grâce à un cercle gradué de plusieurs angles de référence.

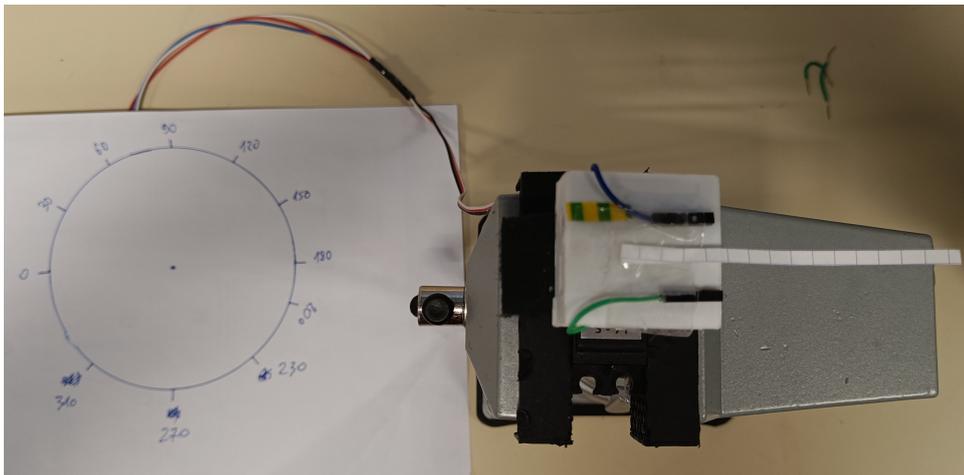


FIGURE A.2 – Matériel expérimental

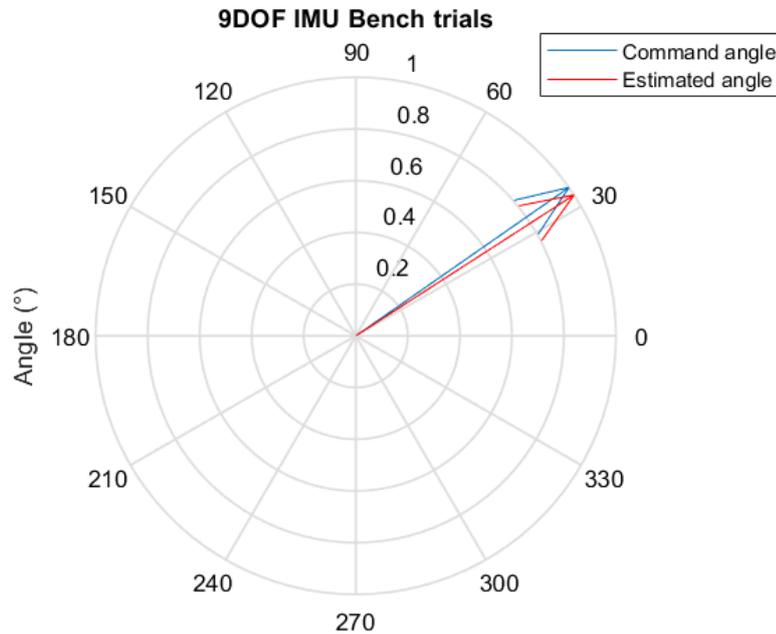


FIGURE A.3 – Interface d’essai [IMU](#) sur Matlab

La deuxième étape est réalisée en conditions réelles. Pour cela, le système de réception (cf figure 5.8 droite) sans hydrophone est embarqué dans une voiture. On réalise une calibration magnétique à l’endroit du boîtier. Après un trajet de 20 minutes, on compare les caps [GPS](#) et celui de l’[IMU](#) en post-traitement. Ces essais ont eu lieu mi-mai 2022.

A.2 Calibration et filtrage

La calibration et le filtrage sont des éléments essentiels lors de l’utilisation d’une centrale inertielle. Qu’elle soit [IMU](#), [AHRS](#) ou [INS](#), la calibration magnétique est un élément fondamental pour palier à l’environnement dans lequel se trouve le capteur. La figure [A.4](#) montre les deux calibrations possibles sur un magnétomètre. La calibration *Hard Iron* (Calibration d’effet magnétique fort) et la calibration *Soft Iron* (Calibration d’effet magnétique doux). Les matériaux ferromagnétiques perturbent le champ magnétique ambiant et provoquent une distorsion des mesures du magnétomètre. La calibration *Soft Iron* consiste à caractériser et à compenser ces distorsions pour obtenir des mesures magnétiques plus précises. Sur la figure [A.4](#) à gauche, on voit bien les différentes distorsions du fait de l’environnement ambiant. L’objectif est d’obtenir une forme la plus proche possible d’une sphère à partir des mesures du magnétomètre. La calibration *Hard Iron* quant à elle corrige les erreurs

de décalage magnétique constant (offset) dans les mesures du magnétomètre. Ces décalages sont généralement dus à des champs magnétiques constants créés par des objets métalliques fixes à proximité du magnétomètre. Cette calibration consiste à mesurer et à corriger ces erreurs de décalage afin que les mesures du magnétomètre reflètent correctement le champ magnétique terrestre. On observe le décalage décrit en figure A.4 à droite. Pour les deux calibrations, on bouge l'IMU dans les 3 axes à des vitesses et des orientations variables. Il est également possible de calibrer

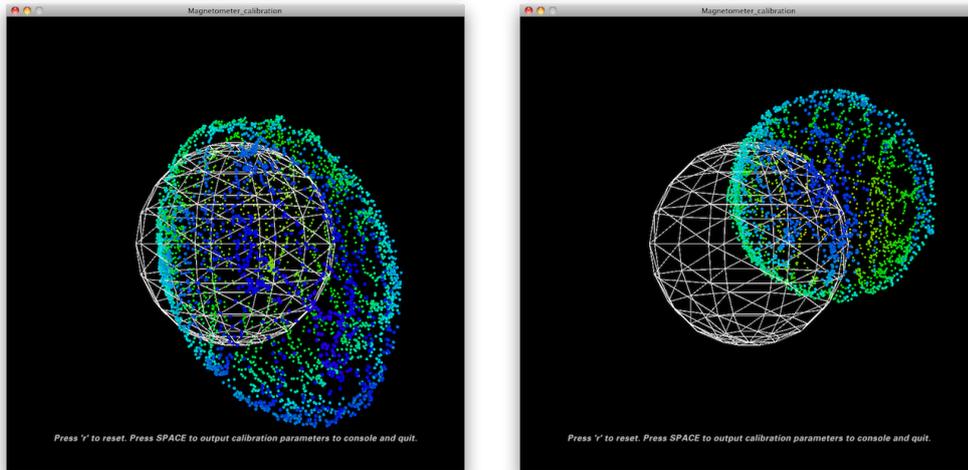


FIGURE A.4 – Calibration *Soft Iron* (à gauche) et *Hard Iron* (à droite).
 Source : <https://github.com/Razor-AHRS/razor-9dof-ahrs/wiki/Tutorial#sensor-calibration>

les bruits de mesure de l'accéléromètre et du gyroscope. Dans le premier cas, on déplace et oriente l'IMU de la plus lente des façons possibles et dans le deuxième cas, on fixe sans bouger l'IMU. Dans les deux cas, on obtient des valeurs minimales et maximales qui permettent de caractériser et corriger le bruit.

Le filtrage consiste à extraire des estimations d'orientation à partir des 3 capteurs de l'IMU, tout comme pour l'estimation de positionnement. L'outil le plus courant est encore une fois le filtre de Kalman et le filtre de Kalman étendu. Heureusement, ici ce filtrage est simplifié puisque la Sparfun Razor M0 9DOF est une AHRS. Il est donc possible d'obtenir directement les valeurs sur les angles d'Eulers, Quaternions et cap magnétique. Cette expérimentation va donc valider ces données une fois les calibrations effectuées.

A.3 Résultats

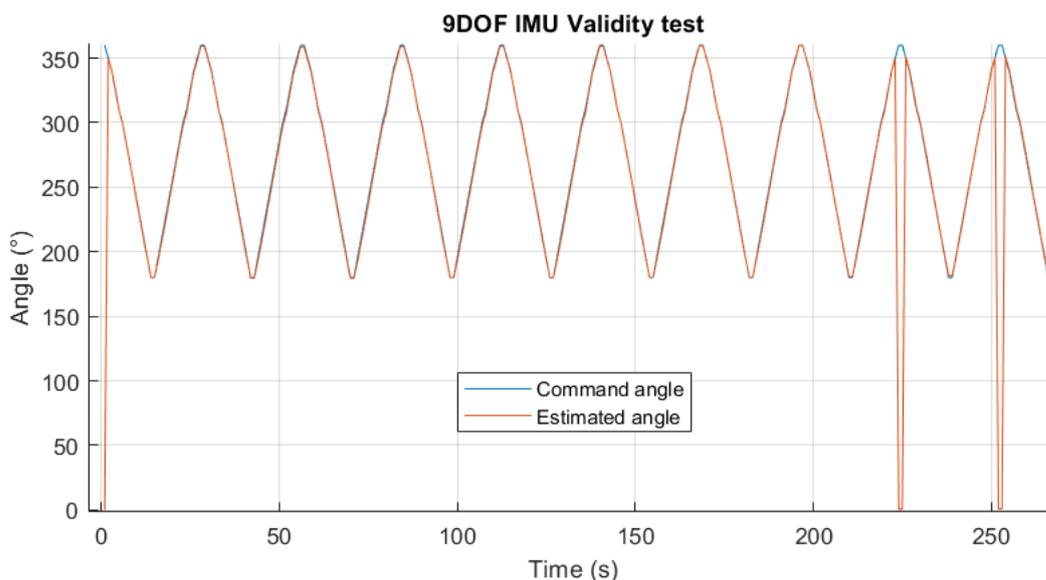


FIGURE A.5 – Résultat estimation de cap IMU, trajectoire en "S"

La figure A.5 représente une fenêtre de 5 minutes sur le premier test, en laboratoire. Les résultats obtenus sur le cap sont convaincants : après une heure, nous n'avons observé qu'un faible biais, de l'ordre du degré, et aucune valeur aberrante. L'erreur sur la mesure (toujours de l'ordre du degré) est inférieure à celui utilisé en simulation entre autre.

La deuxième expérience correspond à plusieurs trajets routiers avec le protocole détaillé au dessus. La figure A.6 montre l'un des trajets empruntés. Les résultats ont été de nouveau concluants, avec un biais et un bruit plus importants mais toujours inférieurs à celui de la simulation.

Grâce à ces résultats, nous pouvons en conclure qu'en plus des parties acoustiques sous-marine, enregistrement des données et GPS, la partie liée à l'estimation du cap est fonctionnelle et toutes les données sont valables. L'expérimentation en rade de Brest peut donc être réalisée.

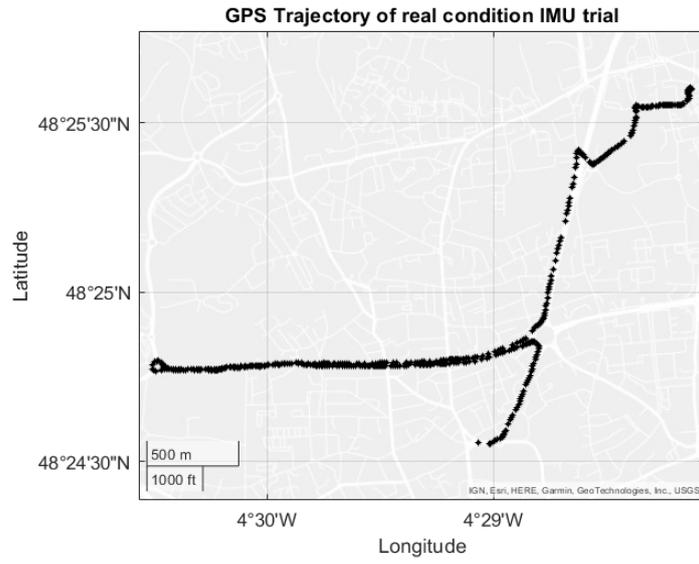


FIGURE A.6 – Trajet routier en condition réelle

Table des figures

1.1	BlueROV2 ©BlueRobotics (gauche) et Système TMS (droite)	10
1.2	AUV Remus©100 et plan général d'un AUV	12
1.3	Le protocole JANUS, ©Centre for Maritime Research and Experimentation, OTAN	14
1.4	Débits empiriques en fonction de la distance (échelle logarithmique) pour les différents moyens de communication sans fil en milieu sous-marin à partir des données de [31]	16
2.1	Principe du TDOA [26]	22
2.2	Principe du calcul du temps de vol au moyen d'un transpondeur	23
2.3	Principe du positionnement par angle d'arrivée ou AOA	24
2.4	Systèmes de positionnement par balise de référence	25
2.5	9 DOF IMU à gauche, et comparaison des technologies gyroscopiques à droite.	30
2.6	Doppler Velocity Log (DVL) de LinkQuest.	32
2.7	Principe de fonctionnement du DVL.	32
2.8	Principe de fonctionnement du filtre de Kalman.	36
2.9	Transformation sans parfum	38
2.10	Principe de fonctionnement du filtre particulaire.	40
2.11	Trajectoire caractéristique d'un AUV, en forme de grille appelé boustrophedon [46].	40
2.12	Commande et pilotage d'un drone sous-marin.	41
2.13	Pilotage automatique par suivi de point de passage.	42
3.1	Schéma d'une chaîne de communication.	44
3.2	Constellation BPSK	46
3.3	PSD du signal transmis sur fréquence porteuse.	47
3.4	Architecture de la trame de communication	47
3.5	Schéma de la partie décodage en réception de la communication ASM	48
3.6	Représentation simpliste de l'effet Doppler.	48
3.7	Évolution de $\arg(\tilde{r}_{pt}(t))$ à gauche, zoom sur la phase de l'angle du signal <i>pure-tone</i> et régression linéaire à droite.	53

3.8	Schéma bloc de l'architecture générale du système.	54
3.9	Principe de fonctionnement d'un capteur SVS. <i>Source Sensotech</i>	56
3.10	Deux systèmes de balise unique fixe possibles.	57
3.11	Dynamique de l'AUV sur le plan 3D	59
3.12	Dynamique de l'AUV sur le plan 2D	62
4.1	Architecture globale de l'algorithme Matlab	67
4.2	Différences entre précision et exactitude [82]	70
4.3	Logigramme de l'algorithme de positionnement	72
4.4	Lemniscate de Bernoulli à gauche, boustrophedon à droite.	73
4.5	Chemin de Dubins "RSR".	74
4.6	Niveau de bruit fort	79
4.7	Niveau de bruit faible	79
4.8	Niveau de bruit intermédiaire	79
4.9	Scénario 1, Vue de dessus à deux dimensions de l'estimation de position moyenne par rapport à la position réelle de l'AUV en noir.	81
4.10	Vue de dessus à deux dimensions de l'estimation de position moyenne par rapport à la position réelle de l'AUV en noir, en utilisant l'algorithme du manuscrit.	83
4.11	Résultat ligne 3 du tableau du scénario 3, avec ellipse de confiance à 90%.	85
4.12	Meilleur résultat, moins bon résultat et résultat moyen pour le scénario 3, UKF avec bruit importants.	86
4.13	Scenario 4 : vue de dessus à deux dimensions de l'estimation de position moyenne par rapport à la position réelle de l'AUV en noir. On utilise le filtre EKF et l'algorithme de positionnement proposé.	88
4.14	Courbes de statistiques pour le scénario 4	89
4.15	Scénario 5 : vue de dessus à deux dimensions de la fin de l'estimation de position moyenne par rapport à la position réelle de l'AUV en noir. On utilise le filtre UKF et le système innovant dans une mission longue.	91
4.16	Résultats du scénario 6, balise à l'Ouest à gauche et balise à l'Est à droite.	94
4.17	Résultat de l'estimation de l'angle d'arrivée de la communication	97
4.18	Divergence scénario 3, angle d'arrivée de la communication (bearing angle).	98
5.1	Bassin d'expérimentation avec émetteur Neptune Sonar D/26 (à gauche) et récepteur B&K 8104 (à droite).	100
5.2	Matériel expérimental pour l'expérience en bassin. A gauche en haut le pré-ampli d'émission et à gauche en bas le PC de commande des bras. A droite, le pré-ampli de réception.	101
5.3	Densité spectrale de puissance type du signal de communication ASM utilisé dans le bassin.	102

5.4	Ratio de l'erreur de l'estimation par rapport à la valeur réelle.	104
5.5	Résultat expérimentation bassin, ROSB à gauche et Doppler uniquement à droite.	104
5.6	Résultat expérimentation bassin, système proposé dans une version simplifiée.	105
5.7	Représentation de la dispersion des erreurs (RMSE) en haut et de l'erreur de positionnement en bas.	105
5.8	Lac de Saint-Renan. Système émetteur au point 1 à gauche, système récepteur à droite au pont mesure.	107
5.9	NI DAQ USB-6212	109
5.10	Essais lac	110
5.11	Expérimentation en rade de Brest, Zodiac mobile (gauche) et bouée fixe (droite).	112
5.12	Vue GPS de l'une des trajectoires	113
5.13	Défaut IMU pour l'une des sections de la session 2 : en bleu discontinu l'angle de cap GPS, en rouge continu l'angle de cap IMU et en jaune la différence entre les deux	114
5.14	Trajectoire #1 à gauche, trajectoire #2 à droite	117
5.15	Trajectoire #3 à gauche, trajectoire #4 à droite	118
5.16	Représentation de l'erreur de positionnement et de son RMSE	120
5.17	Plan de l'expérimentation à Vilanova i la Geltrú, Espagne	123
5.18	Modem Evologics S2C 18/34 WISE connecté au boîtier d'enregistrement en haut, extraits de signaux reçus sur Obsea pendant l'expérimentation en bas	125
5.19	L'une des trajectoires des essais à Vilanova i la Geltru, Espagne, 24 mai 2023	126
6.1	Prototype de drone de surface autonome avec modem acoustique appelé "Porteur"	133
A.1	Sparkfun 9DOF Razor IMU M0 (14001)	135
A.2	Matériel expérimental	136
A.3	Interface d'essai IMU sur <code>Matlab</code>	137
A.4	Calibration <i>Soft Iron</i> (à gauche) et <i>Hard Iron</i> (à droite). <i>Source</i> : https://github.com/Razor-AHRS/razor-9dof-ahrs/wiki/Tutorial#sensor-calibration	138
A.5	Résultat estimation de cap IMU, trajectoire en "S"	139
A.6	Trajet routier en condition réelle	140

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques des différents moyens de communications sans fil en milieu sous-marin [31].	16
2.1	Description des paramètres des filtres de Kalman	37
4.1	Paramètres des scénarios de simulation	78
4.2	Résultat du scénario 1 pour 200 missions simulées avec le filtre UKF. . .	80
4.3	Résultat du scénario 1 pour 200 missions simulées avec le filtre EKF. . .	82
4.4	Résultat du scénario 2 pour 200 missions simulées avec le filtre UKF. Comparaison entre l’algorithme proposé et la méthode ROSB.	82
4.5	Scenario 3 : comparaison du comportement de l’estimateur selon le niveau de bruit entre l’algorithme proposé et l’état de l’art ROSB en utilisant l’UKF sauf lorsque l’EKF est indiqué.	84
4.6	Résultat du scénario 4 pour 300 missions simulées avec l’algorithme proposé et le filtre EKF.	87
4.7	Scenario 4 : comparaison entre l’état de l’art ROSB et l’algorithme proposé en utilisant l’EKF.	87
4.8	Résultat du scénario 5 pour 200 missions simulées avec le filtre UKF. . .	90
4.9	Résultat du scénario 6 pour 200 missions simulées avec le filtre UKF. . .	90
4.10	Résultat du dernier scénario de simulation.	92
5.1	Résultats des essais lac	110
5.2	Conditions environnementales de l’expérimentation en rade de Brest . .	113
5.3	Paramètres de l’expérimentation en rade de Brest	116
5.4	Valeurs de \mathbf{var}_R pour chaque trajectoire	116
5.5	Résultat de 4 sections de l’expérimentation en rade avec le filtre EKF selon la méthode d’estimation Doppler et comparaison avec l’état de l’art. 118	
5.6	Résultats sous forme de %etd pour les 4 sections de l’expérimentation en rade de Brest avec le filtre EKF et l’estimation de v_r basée sur le signal <i>pure tone</i>	118

5.7 Résultats de 4 sections de l'expérimentation en rade avec le filtre EKF et estimation v_r basée sur le signal *pure tone* en fonction des périodes de communication ASM. La notation **DIV** désigne une divergence de l'algorithme. 119

Glossaire

Terme	Description
T	Température de l'eau
a	Accélération de l'AUV
B	Largeur de bande
c_w	Célérité du son dans l'eau
Δ_t	Période de rafraîchissement de l'algorithme
$f(.)$	Fonction d'évolution
f_0	Fréquence centrale du signal de modulation
f_D	Décalage fréquentiel dû à l'effet Doppler
f_{pt}	Fréquence de signal <i>pure tone</i>
f_s	Fréquence d'échantillonnage
$g(.)$	Fonction d'observation
$g^{\text{com}}(.)$	Fonction d'observation en présence de communication ASM
Ω	Vitesse de rotation du cap de l'AUV
ω_b	Angle d'arrivée de la communication ASM ou <i>bearing angle</i> en anglais
$\phi(t)$	Réponse impulsionnelle du SRRC
ψ	Cap de l'AUV
\mathbf{Q}	Matrice de covariance du bruit d'état
\mathbf{R}	Matrice de covariance de mesure
T_{com}	Temps entre 2 trames de communication ASM
t_{max}	Durée maximum de la simulation de trajectoire
t_{TOF}	Temps de vol d'un signal ou TOF en anglais
\mathbf{u}_k	Vecteur de commande
v	Vitesse du drone
v_r	Vitesse relative du drone
\mathbf{y}_k	Vecteur de mesures à l'estime
$\mathbf{y}_k^{\text{com}}$	Vecteur de mesures en tenant compte des données de communication ASM

Terme	Description
z_k	Vecteur d'état

Acronymes

Terme	Description
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AHRS	Attitude and Heading Reference System
AOA	Angle Of Arrival
ASM	Acoustique Sous-Marin
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CTD	Conductivity, Temperature & Depth
DGPS	Differential Global Positioning System
DVL	Doppler Velocity Log
EKF	Extended Kalman Filter
FOG	Fiber Optical Gyroscope
FPGA	Field-programmable gate array
GIB	GPS Intelligent Buoy
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
KF	Kalman Filter
LBL	Long BaseLine
LD	Laser Diode
LED	Light-Emitting Diode
LS	Least Square
MAP	Maximum A Posteriori
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
ML	Maximum Likelihood
NED	North, East and Down
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OWTT	One Way Travel Time
PF	Particle Filter

Terme	Description
PPS	Pulse Per Second
PSD	Power Spectral Density
PSK	Phase shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	RadioFréquence
RLG	Ring Laser Gyroscope
RMSE	Root Mean Square Error
ROSB	Range-Only Single Beacon
ROV	Remotely Operated Vehicles
SBL	Short BaseLine
SEACom	Systèmes Embarqués, Acoustique et Commu- nications
SLAM	Simultaneous Localisation and Mapping
SNLE	Sous Marin Nucléaire Lanceur d'Engin
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SRRC	Square Root Raised Cosine
SVP	Sound Velocity Profiler
SVS	Sound Velocity Sensor
TDOA	Time Difference Of Arrival
TMS	Tether Management System
TOA	Time Of Arrival
TOF	Time-Of-Flight
TWTT	Two Way Travel Time
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitt
UKF	Unscented Kalman Filter
USBL	Ultra-Short BaseLine

Bibliographie

- [1] s. AHMAD, R. SUTTON et R. BURNS. « Retrieval of an Autonomous Underwater Vehicle : An Interception Approach ». In : *Underwater Technology : The International Journal of The Society for Underwater* 25 (déc. 2003), p. 185-197. DOI : [10.3723/175605403783101676](https://doi.org/10.3723/175605403783101676).
- [2] B. ALLOTTA, A. CAITI, L. CHISCI, R. COSTANZI, F. DI CORATO, C. FANTACCI, D. FENUCCI, E. MELI et A. RIDOLFI. « An unscented Kalman filter based navigation algorithm for autonomous underwater vehicles ». en. In : *Mechatronics* 39 (nov. 2016), p. 185-195. ISSN : 0957-4158. DOI : [10.1016/j.mechatronics.2016.05.007](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.05.007). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741581630037X> (visité le 09/09/2021).
- [3] M. ARULAMPALAM, S. MASKELL, N. GORDON et T. CLAPP. « A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking ». In : *IEEE Transactions on Signal Processing* 50.2 (2002), p. 174-188. DOI : [10.1109/78.978374](https://doi.org/10.1109/78.978374).
- [4] C. AUBRY, P. FORJONEL, P. BOUVET, A. POTTIER et Y. AUFFRET. « On the use of Doppler-shift estimation for simultaneous underwater acoustic localization and communication ». In : *OCEANS 2019 - Marseille*. OCEANS 2019 - Marseille. Juin 2019, p. 1-5. DOI : [10.1109/OCEANSE.2019.8867265](https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2019.8867265).
- [5] E. BALESTRIERI, L. D. VITO, F. PICARIELLO, S. RAPUANO et I. TUDOSA. « A TDoA-based Measurement Method for RF Emitters Localization by Exploiting Wideband Compressive Sampling ». In : *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2020, p. 1-6. DOI : [10.1109/I2MTC43012.2020.9129267](https://doi.org/10.1109/I2MTC43012.2020.9129267).
- [6] T. BASAR. « A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems ». In : *Control Theory : Twenty-Five Seminal Papers (1932-1981)*. 2001, p. 167-179. DOI : [10.1109/9780470544334.ch9](https://doi.org/10.1109/9780470544334.ch9).
- [7] C. BERNARD, P.-J. BOUVET, A. POTTIER et P. FORJONEL. « Multiple access acoustic communication in underwater mobile networks ». In : *2021 Fifth Underwater Communications and Networking Conference (UComms)*. Août 2021.

- [8] C. BERNARD, P.-J. BOUVET et B. TOMASI. « Spread Spectrum Modulation with Grassmannian Constellations for Mobile Multiple Access Underwater Acoustic Channels ». en. In : *Sensors* 22.21 (jan. 2022). Number : 21 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 8518. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s22218518](https://doi.org/10.3390/s22218518). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/21/8518> (visité le 14/11/2022).
- [9] D. BERTSEKAS. *Nonlinear Programming*. Jan. 2003.
- [10] P. BOUVET, Y. AUFFRET, D. MUNCK, A. POTTIER, G. JANVRESSE, Y. EUSTACHE, P. TESSOT et R. BOURDON. « Experimentation of MIMO underwater acoustic communication in shallow water channel ». In : *OCEANS 2017 - Aberdeen*. OCEANS 2017 - Aberdeen. Juin 2017, p. 1-6. DOI : [10.1109/OCEANSE.2017.8084719](https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084719).
- [11] P.-J. BOUVET, P. FORJONEL et Y. AUFFRET. *IROMI-LMAIR : An innovative network of instrumental platforms for marine and underwater technologie*. Brest, France, oct. 2020. URL : <https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/moqesm2020.html>.
- [12] P.-J. BOUVET, P. FORJONEL, B. TOMASI, Y. AUFFRET, Y. AMIRAT, G. FELD, M. DENIEL et P. SIMON. « Contactless data transfer for autonomous underwater vehicle docking station ». In : *OCEANS 2021*. OCEANS 2021 San Diego - Porto Online Proceedings. San Diego, CA, United States, sept. 2021. URL : <https://hal.science/hal-03454717>.
- [13] A. CAITI, V. CALABRÒ, T. FABBRI, D. FENUCCI et A. MUNAFÒ. « Underwater communication and distributed localization of AUV teams ». In : *2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*. Juin 2013, p. 1-8. DOI : [10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608166](https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608166).
- [14] A. T. G. CASALINO, E. SIMETTI, A. SPERINDÈ et S. TORELLI. « Impact of LBL Calibration on the Accuracy of Underwater Localization ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 47.3 (2014). 19th IFAC World Congress, p. 3376-3381. ISSN : 1474-6670. DOI : <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00956>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016421270>.
- [15] T. CASEY, B. GUIMOND et J. HU. « Underwater Vehicle Positioning Based on Time of Arrival Measurements from a Single Beacon ». In : *OCEANS 2007*. OCEANS 2007. ISSN : 0197-7385. Sept. 2007, p. 1-8. DOI : [10.1109/OCEANS.2007.4449186](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2007.4449186).

- [16] X. CHE, I. WELLS, G. DICKERS, P. KEAR et X. GONG. « Re-evaluation of RF electromagnetic communication in underwater sensor networks ». In : *IEEE Communications Magazine* 48.12 (déc. 2010), p. 143-151. ISSN : 0163-6804. DOI : [10.1109/MCOM.2010.5673085](https://doi.org/10.1109/MCOM.2010.5673085).
- [17] C. COQUET, A. ARNOLD et P.-J. BOUVET. « Control of a Robotic Swarm Formation to Track a Dynamic Target with Communication Constraints : Analysis and Simulation ». In : *Applied Sciences* 11.7 (2021). ISSN : 2076-3417. DOI : [10.3390/app11073179](https://doi.org/10.3390/app11073179). URL : <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/7/3179>.
- [18] N. CRASTA, M. BAYAT, A. P. AGUIAR et A. M. PASCOAL. « Observability analysis of 3D AUV trimming trajectories in the presence of ocean currents using range and depth measurements ». en. In : *Annual Reviews in Control* 40 (jan. 2015), p. 142-156. ISSN : 1367-5788. DOI : [10.1016/j.arcontrol.2015.09.009](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2015.09.009). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578815000462> (visité le 01/04/2022).
- [19] N. CRASTA, M. BAYAT, A. P. AGUIAR et A. M. PASCOAL. « Observability analysis of 2D single beacon navigation in the presence of constant currents for two classes of maneuvers ». en. In : *IFAC Proceedings Volumes*. 9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems 46.33 (jan. 2013), p. 227-232. ISSN : 1474-6670. DOI : [10.3182/20130918-4-JP-3022.00060](https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00060). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016461628> (visité le 01/04/2022).
- [20] T. CREUTZ, B. WEHBE, S. ARNOLD et M. HILDEBRANDT. « Towards Robust Autonomous Underwater Docking for Long-Term Under-Ice Exploration ». In : *OCEANS 2023 - Limerick*. 2023, p. 1-8. DOI : [10.1109/OCEANSLimerick52467.2023.10244435](https://doi.org/10.1109/OCEANSLimerick52467.2023.10244435).
- [21] V. CREUZE. « Robots marins et sous-marins - Perception, modélisation, commande ». fr. In : *Robotique* (sept. 2014). DOI : [10.51257/a-v1-s7783](https://doi.org/10.51257/a-v1-s7783). URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/doi/10.51257/a/v1/s7783> (visité le 18/03/2022).
- [22] N. DAVARI et A. GHOLAMI. « An Asynchronous Adaptive Direct Kalman Filter Algorithm to Improve Underwater Navigation System Performance ». In : *IEEE Sensors Journal* 17.4 (fév. 2017). Conference Name : IEEE Sensors Journal, p. 1061-1068. ISSN : 1558-1748. DOI : [10.1109/JSEN.2016.2637402](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2637402).
- [23] J. DEL-RIO, M. NOGUERAS, D. M. TOMA, E. MARTÍNEZ, C. ARTERO-DELGADO, I. BGHIEL, M. MARTINEZ, J. CADENA, A. GARCIA-BENADI, D. SARRIA, J. AGUZZI, I. MASMITJA, M. CARANDELL, J. OLIVE, S. GOMARIZ, P. SANTAMARIA et A. MÀNUEL LÀZARO. « Obsea : A Decadal Balance for a

- Cabled Observatory Deployment ». In : *IEEE Access* 8 (2020). Conference Name : IEEE Access, p. 33163-33177. ISSN : 2169-3536. DOI : [10.1109/ACCESS.2020.2973771](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973771).
- [24] R. DIAMANT, L. M. WOLFF et L. LAMPE. « Location Tracking of Ocean-Current-Related Underwater Drifting Nodes Using Doppler Shift Measurements ». In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 40.4 (oct. 2015). Conference Name : IEEE Journal of Oceanic Engineering, p. 887-902. ISSN : 1558-1691. DOI : [10.1109/JOE.2014.2370911](https://doi.org/10.1109/JOE.2014.2370911).
- [25] A. DIKAREV, A. GRIFFITHS, S. A. WATSON, B. LENNOX et P. R. GREEN. « Combined multiuser acoustic communication and localisation system for μ AUVs operating in confined underwater environments ». en. In : *IFAC-PapersOnLine* 48.2 (2015), p. 161-166. ISSN : 24058963. DOI : [10.1016/j.ifacol.2015.06.026](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.026). URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896315002657> (visité le 05/01/2017).
- [26] L. DING, Y. XIAO, X. DENG et L. FENG. « Safety monitoring and evacuation guide system for pipeline testing laboratory by indoor positioning technique and distributed sensor network ». In : *International Journal of Distributed Sensor Networks* 14 (juin 2018), p. 155014771878368. DOI : [10.1177/1550147718783684](https://doi.org/10.1177/1550147718783684).
- [27] M. DUNBABIN, P. CORKE, I. VASILESCU et D. RUS. « Experiments with Cooperative Control of Underwater Robots ». In : *I. J. Robotic Res.* 28 (mai 2009), p. 815-833. DOI : [10.1177/0278364908098456](https://doi.org/10.1177/0278364908098456).
- [28] T. H. EGGEN, A. B. BAGGEROER et J. C. PREISIG. « Communication over Doppler spread channels. Part I : Channel and receiver presentation ». In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25.1 (jan. 2000). Conference Name : IEEE Journal of Oceanic Engineering, p. 62-71. ISSN : 1558-1691. DOI : [10.1109/48.820737](https://doi.org/10.1109/48.820737).
- [29] R. EUSTICE. « Large-area visually augmented navigation for autonomous underwater vehicles ». In : (oct. 2007). DOI : [10.1575/1912/1414](https://doi.org/10.1575/1912/1414).
- [30] G. EYNARD et C. LAOT. « Blind Doppler compensation scheme for single carrier digital underwater communications ». In : *OCEANS 2008*. 2008, p. 1-5. DOI : [10.1109/OCEANS.2008.5152066](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5152066).
- [31] M. FEWELL, A. von TROJAN et M. STEED. *Empirical Range-Data-Rate Relationships for Undersea Wireless Communications Systems*. General Document DSTG-GD-1101. Defense Science et Technology Group, Australian Government, oct. 2020.

- [32] T. I. FOSSEN. « Guidance and Control of Ocean Vehicles ». en. In : *University of Trondheim, Norway, Printed by John Wiley & Sons, Chichester, England, ISBN : 0 471 94113 1, Doctors Thesis* (1999). URL : <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A2ea31f56-6db4-475b-afe6-d146cebbd7e9> (visité le 25/10/2021).
- [33] M. FRANCHI, A. RIDOLFI et B. ALLOTTA. « Underwater navigation with 2D forward looking SONAR : An adaptive unscented Kalman filter-based strategy for AUVs ». English. In : *Journal of Field Robotics* 38.3 (2021), p. 355-385. ISSN : 1556-4959. DOI : [10.1002/rob.21991](https://doi.org/10.1002/rob.21991).
- [34] R. GARIN, P.-J. BOUVET, P. FORJONEL et B. TOMASI. « Performance of autonomous underwater vehicle positioning by acoustic communication ». In : *Sea Tech Week 2022 Conference*. Brest, France, sept. 2022. URL : <https://hal.science/hal-03814661>.
- [35] R. GARIN, P.-J. BOUVET, P. FORJONEL et B. TOMASI. *Performance du positionnement de drone sous-marins autonomes par communication acoustique (Séminaire interne)*. Brest, France, sept. 2022.
- [36] R. GARIN, P.-J. BOUVET, P. FORJONEL et B. TOMASI. « Sea experimentation of single beacon simultaneous localization and communication for AUV navigation ». In : *OCEANS 2023*. Limerick, Ireland, juin 2023. URL : <https://hal.science/hal-04132884> (visité le 16/10/2023).
- [37] R. GARIN, P.-J. BOUVET, P. FORJONEL, B. TOMASI et C. VANWYNSBERGHE. « Low-cost Communication-based Autonomous Underwater Vehicle Positioning System (to be submitted) ». In : *MDPI Sensors* XX.XX (déc. 2024), p. XX.
- [38] R. GARIN, C. VANWYNSBERGHE, P. FORJONEL, B. TOMASI et P.-J. BOUVET. « Simultaneous underwater acoustic localization and communication : an experimental study ». In : *OCEANS 2021 : San Diego – Porto*. 2021, p. 1-6. DOI : [10.23919/OCEANS44145.2021.9705890](https://doi.org/10.23919/OCEANS44145.2021.9705890).
- [39] A. R. GIRARD, J. B. SOUSA et J. E. SILVA. « Autopilots for Underwater Vehicles : Dynamics, Configurations, and Control ». en. In : *OCEANS 2007 - Europe*. Aberdeen, Scotland, UK : IEEE, juin 2007, p. 1-6. ISBN : 978-1-4244-0634-0 978-1-4244-0635-7. DOI : [10.1109/OCEANSE.2007.4302459](https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2007.4302459). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4302459/> (visité le 27/06/2023).
- [40] J. GONZÁLEZ-GARCÍA, A. GÓMEZ-ESPINOSA, E. CUAN-URQUIZO, L. G. GARCÍA-VALDOVINOS, T. SALGADO-JIMÉNEZ et J. A. E. CABELLO. « Autonomous Underwater Vehicles : Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions ». In : *Applied Sciences* 10.4 (jan. 2020). Number : 4 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 1256. DOI : [10.3390/app10041256](https://doi.org/10.3390/app10041256).

- 3390/app10041256. URL : <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/4/1256> (visité le 28/10/2020).
- [41] R. GUYONNEAU. « Méthodes ensemblistes pour la localisation en robotique mobile ». Theses. Université d'Angers, nov. 2013. URL : <https://theses.hal.science/tel-00961501>.
- [42] T. HAMZA, M.-A. KHALIGHI, S. BOURENNANE, P. LÉON et J. OPDERBECKE. « Investigation of solar noise impact on the performance of underwater wireless optical communication links ». EN. In : *Optics Express* 24.22 (oct. 2016). Publisher : Optica Publishing Group, p. 25832-25845. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.24.025832](https://doi.org/10.1364/OE.24.025832). URL : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-24-22-25832> (visité le 23/03/2022).
- [43] F. HANSON et S. RADIC. « High bandwidth underwater optical communication ». eng. In : *Applied Optics* 47.2 (jan. 2008), p. 277-283. ISSN : 1559-128X.
- [44] M. HAO, Y.-c. SUN et Z.-l. CAO. « Adaptive extended Kalman filter (AEKF)-based mobile robot localization using sonar ». In : *Robotica* 18 (sept. 2000), p. 459-473. DOI : [10.1017/S0263574700002605](https://doi.org/10.1017/S0263574700002605).
- [45] A. HEALEY et D. LIENARD. « Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles ». In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 18.3 (1993), p. 327-339. ISSN : 1558-1691. DOI : [10.1109/JOE.1993.236372](https://doi.org/10.1109/JOE.1993.236372).
- [46] O. HEGRENAES, E. BERGLUND et O. HALLINGSTAD. « Model-Aided Inertial Navigation for Underwater Vehicles ». In : juin 2008, p. 1069 -1076. DOI : [10.1109/ROBOT.2008.4543346](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543346).
- [47] F. HIDALGO et T. BRÄUNL. « Review of underwater SLAM techniques ». In : *2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*. Fév. 2015, p. 306-311. DOI : [10.1109/ICARA.2015.7081165](https://doi.org/10.1109/ICARA.2015.7081165).
- [48] X. HUANG, F. YANG et J. SONG. « Hybrid LD and LED-based underwater optical communication : state-of-the-art, opportunities, challenges, and trends [Invited] ». In : *Chinese Optics Letters* 17 (jan. 2019), p. 100002. DOI : [10.3788/COL201917.100002](https://doi.org/10.3788/COL201917.100002).
- [49] IXBLUE. *What is a USBL system ?* <https://www.ixblue.com/knowledge/what-is-a-usbl-system/>. Accessed : 2023-08-20.
- [50] C. R. JASSAL. *Here is all you need to know about Doppler Velocity Log.* <https://www.myseatime.com/blog/detail/here-is-all-you-need-to-know-about-doppler-log>. Accessed : 2023-08-20.
- [51] L. JAULIN. « A Nonlinear Set Membership Approach for the Localization and Map Building of Underwater Robots ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 25.1 (2009), p. 88-98. DOI : [10.1109/TR0.2008.2010358](https://doi.org/10.1109/TR0.2008.2010358).

- [52] L. JAULIN. *Mobile Robotics*. Sous la dir. d'ISTE. Mobile Robotics. Nov. 2015. URL : <https://hal.science/hal-01236489>.
- [53] L. JAULIN. *Mobile Robotics*. Sous la dir. d'ISTE. Mobile Robotics. Nov. 2015. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01236489>.
- [54] L. JAULIN, B. ZERR, F. BARS, S. ROHOU et D. MASSÉ. « Calcul par intervalles pour la robotique mobile intelligente Lab-STICC ». In : (avr. 2019).
- [55] P. KATHIROLI, P.-P. J. BEAUJEAN et N. XIROS. « Source speed estimation using a pilot tone in a high frequency acoustic modem ». In : *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA*. 2011, p. 1-8. DOI : [10.23919/OCEANS.2011.6106941](https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6106941).
- [56] P. KATHIROLI, P.-P. J. BEAUJEAN et N. XIROS. « Source speed estimation using a pilot tone in a high frequency acoustic modem ». In : *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA*. 2011, p. 1-8. DOI : [10.23919/OCEANS.2011.6106941](https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6106941).
- [57] H. KAUSHAL et G. KADDOUM. « Underwater Optical Wireless Communication ». In : *IEEE Access* 4 (2016), p. 1518-1547. ISSN : 2169-3536. DOI : [10.1109/ACCESS.2016.2552538](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2552538).
- [58] Y. KIM et H. BANG. « Introduction to Kalman Filter and Its Applications ». In : nov. 2018. ISBN : 978-1-83880-536-4. DOI : [10.5772/intechopen.80600](https://doi.org/10.5772/intechopen.80600).
- [59] N. KUTER et S. KUTER. « Accuracy comparison between GPS and DGPS : A field study at METU campus ». In : *Italian Journal of Remote Sensing* 42 (oct. 2010), p. 3-14. DOI : [10.5721/ItJRS20104231](https://doi.org/10.5721/ItJRS20104231).
- [60] C. LAPOINTE et M. ENGINEERING. « Virtual Long Baseline (VLBL) Autonomous Underwater Vehicle Navigation Using a Single Transponder ». In : (juin 2006).
- [61] M. B. LARSEN. « High Accuracy Autonomous Navigation of Underwater Vehicles ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 33.21 (2000). 5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC 2000), Aalborg, Denmark, 23-25 August 2000, p. 159-166. ISSN : 1474-6670. DOI : [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37068-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37068-4). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017370684>.
- [62] P.-M. LEE, S.-M. KIM, B.-H. JEON, H. T. CHOI et C.-M. LEE. « Improvement on an inertial-Doppler navigation system of underwater vehicles using a complementary range sonar ». In : *Proceedings of the 2004 International Symposium on Underwater Technology (IEEE Cat. No.04EX869)*. Avr. 2004, p. 133-138. DOI : [10.1109/UT.2004.1405508](https://doi.org/10.1109/UT.2004.1405508).

- [63] J. LLORET, S. SENDRA, M. ARDID et J. J. P. C. RODRIGUES. « Underwater Wireless Sensor Communications in the 2.4 GHz ISM Frequency Band ». In : *Sensors (Basel, Switzerland)* 12.4 (mars 2012), p. 4237-4264. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s120404237](https://doi.org/10.3390/s120404237). URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3355409/> (visité le 19/03/2018).
- [64] A. MALLIOS, P. RIDAO, D. RIBAS, F. MAURELLI et Y. PETILLOT. « EKF-SLAM for AUV navigation under probabilistic sonar scan-matching ». In : *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. ISSN : 2153-0866. Oct. 2010, p. 4404-4411. DOI : [10.1109/IRoS.2010.5649246](https://doi.org/10.1109/IRoS.2010.5649246).
- [65] B. MARR. *The 4 Ds Of Robotization : Dull, Dirty, Dangerous And Dear*. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/10/16/the-4-ds-of-robotization-dull-dirty-dangerous-and-dear/?sh=427b90ba3e0d>. Accessed : 2023-09-20.
- [66] I. MASMITJÀ RUSIÑOL. « Acoustic underwater target tracking methods using autonomous vehicles ». In : *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)* (21 jan. 2020). Accepted : 2020-03-23T01 :01 :02Z Publisher : Universitat Politècnica de Catalunya. URL : <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/180789> (visité le 14/04/2021).
- [67] H. MEDWIN. « Speed of sound in water : A simple equation for realistic parameters ». en. In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 58.6 (déc. 1975), p. 1318-1319. ISSN : 0001-4966, 1520-8524. DOI : [10.1121/1.380790](https://doi.org/10.1121/1.380790). URL : <https://pubs.aip.org/jasa/article/58/6/1318/749398/Speed-of-sound-in-water-A-simple-equation-for> (visité le 25/10/2023).
- [68] R. MEHRA. « On the identification of variances and adaptive Kalman filtering ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 15.2 (1970), p. 175-184. DOI : [10.1109/TAC.1970.1099422](https://doi.org/10.1109/TAC.1970.1099422).
- [69] P. NEWMAN et J. LEONARD. « Pure range-only sub-sea SLAM ». en. In : *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*. Taipei, Taiwan : IEEE, 2003, p. 1921-1926. ISBN : 978-0-7803-7736-3. DOI : [10.1109/ROBOT.2003.1241875](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1241875). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1241875/> (visité le 25/02/2021).
- [70] A. PALMEIRO, M. MARTÍN, I. CROWTHER et M. RHODES. « Underwater radio frequency communications ». In : *OCEANS 2011 IEEE - Spain*. 2011, p. 1-8. DOI : [10.1109/Oceans-Spain.2011.6003580](https://doi.org/10.1109/Oceans-Spain.2011.6003580).

- [71] L. PAULL, S. SAEEDI, M. SETO et H. LI. « AUV Navigation and Localization : A Review ». In : *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* 39 (1^{er} jan. 2014), p. 131-149. DOI : [10.1109/JOE.2013.2278891](https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2278891).
- [72] J. POTTER, J. ALVES, D. GREEN, G. ZAPPA, I. NISSEN et K. MCCOY. « The JANUS underwater communications standard ». In : *2014 Underwater Communications and Networking (UComms)*. Sept. 2014, p. 1-4. DOI : [10.1109/UComms.2014.7017134](https://doi.org/10.1109/UComms.2014.7017134).
- [73] A. POTTIER, P.-J. BOUVET et P. FORJONEL. « Performance evaluation of Multi-User MIMO Underwater Acoustic Communications ». In : *2021 Fifth Underwater Communications and Networking Conference (UComms)*. Août 2021.
- [74] S. RECOUVREUR. *MEMS vs FOG : what inertial system should you choose ?* <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/mems-vs-fog-what-inertial-system-should-you-choose/>. Accessed : 2023-08-20.
- [75] G. P. M. ROZÁL et J. A. HARTIGAN. « The MAP test for multimodality ». In : *Journal of Classification* 11.1 (mars 1994), p. 5-36. ISSN : 1432-1343. DOI : [10.1007/BF01201021](https://doi.org/10.1007/BF01201021). URL : <https://doi.org/10.1007/BF01201021>.
- [76] D. RUDOLPH et T. A. WILSON. « Doppler Velocity Log theory and preliminary considerations for design and construction ». In : *2012 Proceedings of IEEE Southeastcon*. ISSN : 1558-058X. Mars 2012, p. 1-7. DOI : [10.1109/SECon.2012.6196918](https://doi.org/10.1109/SECon.2012.6196918).
- [77] J. SAUDE et A. P. AGUIAR. « Single Beacon Acoustic Navigation for an AUV in the Presence of Unknown Ocean Currents ». In : t. 42. Sept. 2009, p. 298-303. DOI : [10.3182/20090916-3-BR-3001.00048](https://doi.org/10.3182/20090916-3-BR-3001.00048).
- [78] A. SCHERBATYUK. « The AUV positioning using ranges from one transponder LBL ». In : *'Challenges of Our Changing Global Environment'. Conference Proceedings. OCEANS '95 MTS/IEEE*. T. 3. 1995, 1620-1623 vol.3. DOI : [10.1109/OCEANS.1995.528728](https://doi.org/10.1109/OCEANS.1995.528728).
- [79] S. SENDRA, J. LLORET, J. M. JIMENEZ et L. PARRA. « Underwater Acoustic Modems ». In : *IEEE Sensors Journal* 16.11 (juin 2016), p. 4063-4071. ISSN : 1530-437X. DOI : [10.1109/JSEN.2015.2434890](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2434890).
- [80] B. SHARIF, J. NEASHAM, O. HINTON et A. ADAMS. « A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications ». In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25.1 (2000), p. 52-61. DOI : [10.1109/48.820736](https://doi.org/10.1109/48.820736).

- [81] M. STOJANOVIC et P.-P. J. BEAUJEAN. « Acoustic Communication ». In : *Springer Handbook of Ocean Engineering*. Sous la dir. de M. R. DHANAK et N. I. XIROS. Cham : Springer International Publishing, 2016, p. 359-386. ISBN : 978-3-319-16649-0. DOI : [10.1007/978-3-319-16649-0_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16649-0_15). URL : https://doi.org/10.1007/978-3-319-16649-0_15.
- [82] D. L. STREINER et G. R. NORMAN. « “Precision” and “accuracy” : two terms that are neither ». In : *Journal of clinical epidemiology* 59.4 (2006), p. 327-330.
- [83] A. TAL, I. KLEIN et R. KATZ. « Inertial Navigation System/Doppler Velocity Log (INS/DVL) Fusion with Partial DVL Measurements ». In : *Sensors (Basel, Switzerland)* 17.2 (fév. 2017), p. 415. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s17020415](https://doi.org/10.3390/s17020415). URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5335996/> (visité le 07/09/2021).
- [84] F. TEIXEIRA, P. FREITAS, L. PESSOA, R. CAMPOS et M. RICARDO. « Evaluation of IEEE 802.11 Underwater Networks Operating at 700 MHz, 2.4 GHz and 5 GHz ». In : *Proceedings of the International Conference on Underwater Networks & Systems. WUWNET '14*. New York, NY, USA : ACM, 2014, 11 :1-11 :5. ISBN : 978-1-4503-3277-4. DOI : [10.1145/2671490.2674571](https://doi.org/10.1145/2671490.2674571). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2671490.2674571> (visité le 29/03/2017).
- [85] J. TRUBUIL et T. CHONAVEL. « Accurate Doppler estimation for underwater acoustic communications ». In : *2012 Oceans - Yeosu*. 2012, p. 1-5. DOI : [10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263500](https://doi.org/10.1109/OCEANS-Yeosu.2012.6263500).
- [86] J. W. TUKEY et al. *Exploratory data analysis*. T. 2. Reading, MA, 1977.
- [87] P. v. WALREE. « Channel sounding for acoustic communications : techniques and shallow-water examples ». In : (2011).
- [88] E. WAN et R. VAN DER MERWE. « The unscented Kalman filter for non-linear estimation ». en. In : *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No.00EX373)*. Lake Louise, Alta., Canada : IEEE, 2000, p. 153-158. ISBN : 978-0-7803-5800-3. DOI : [10.1109/ASSPCC.2000.882463](https://doi.org/10.1109/ASSPCC.2000.882463). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/882463/> (visité le 05/02/2021).
- [89] S. E. WEBSTER, R. M. EUSTICE, H. SINGH et L. L. WHITCOMB. « Advances in single-beacon one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles ». In : *The International Journal of Robotics Research* 31.8 (2012), p. 935-950. DOI : [10.1177/0278364912446166](https://doi.org/10.1177/0278364912446166). eprint : <https://doi.org/10.1177/0278364912446166>. URL : <https://doi.org/10.1177/0278364912446166>.
- [90] A. WERRIES et J. M. DOLAN. « Adaptive Kalman Filtering Methods for Low-Cost GPS/INS Localization for Autonomous Vehicles ». en. In : (), p. 6.

- [91] A. B. WILLUMSEN, O. HALLINGSTAD et B. JALVING. « Integration of Range, Bearing and Doppler Measurements from Transponders into Underwater Vehicle Navigation Systems ». In : *OCEANS 2006*. ISSN : 0197-7385. Sept. 2006, p. 1-6. DOI : [10.1109/OCEANS.2006.306851](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2006.306851).
- [92] M. YUAN, Y. LI, Y. LI, S. PANG et J. ZHANG. « A fast way of single-beacon localization for AUVs ». In : *Applied Ocean Research* 119 (1^{er} fév. 2022), p. 103037. ISSN : 0141-1187. DOI : [10.1016/j.apor.2021.103037](https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.103037). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118721004946> (visité le 13/05/2022).
- [93] L. ZHANG, T. ZHANG, H.-S. SHIN et X. XU. « Efficient Underwater Acoustical Localization Method Based On Time Difference and Bearing Measurements ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2021), p. 1-16. DOI : [10.1109/TIM.2020.3045193](https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3045193).

Titre : Communication et positionnement simultanés pour les drones sous-marins autonomes

Mot clés : AUV, positionnement, Kalman, Doppler, Communication acoustique sous-marin

Résumé : Cette thèse porte sur la navigation des drones sous-marins autonomes (AUV) en l'absence de signaux GPS sous l'eau. Pour résoudre ce problème, elle propose une approche innovante qui combine la localisation de l'AUV avec la communication acoustique sous-marine avec une balise en surface. Cette méthode utilise l'estimation du décalage Doppler requis pour le décodage des signaux de communication afin d'estimer la vitesse relative de l'AUV. De plus, le temps de vol de la communication est utilisé pour mesurer la distance entre l'AUV et la balise. Le système final nécessite seulement des capteurs peu onéreux, tels qu'une centrale inertielle, un capteur de pression, un GPS pour l'initialisation, et un transpondeur acoustique pour le drone,

combiné avec un capteur de profilage de la vitesse du son. Une balise fixe communique avec le drone et est équipée d'un transpondeur acoustique. Cette approche offre une précision comparable à l'état de l'art, avec une faible empreinte spatiale et un coût réduit. Des simulations et des essais en bassin de 6 m³ ont été effectués avec succès, confirmant la faisabilité du système. De plus, des expérimentations en mer dans des conditions réelles ont montré une précision d'environ 3 mètres, démontrant l'efficacité de l'algorithme. En comparaison avec l'état de l'art, le système proposé est plus rapide à mettre en place, ne nécessite pas de calibration, est plus économique, et consomme moins d'énergie, bien qu'il soit légèrement moins précis.

Title: Simultaneous communication and positioning for autonomous underwater drones

Keywords: AUV, positioning, Kalman, Doppler, Underwater Acoustic Communicati

Abstract: This thesis focuses on the navigation of autonomous underwater drones (AUVs) in the absence of underwater GPS signals. To address this issue, it proposes an innovative approach that combines AUV localization with underwater acoustic communication to a surface beacon. This method utilizes the Doppler shift estimation required for communication signal demodulation in order to estimate the relative velocity of the AUV. Additionally, the communication's time of flight is used to measure the distance between the AUV and the beacon. The final system requires only affordable components, such as an inertial navigation system, a pressure sensor, a GPS for initialization, and an acoustic transponder for

the drone, combined with a sound velocity profiling sensor. A fixed beacon communicates with the drone and is equipped with an acoustic transponder. This approach offers accuracy comparable to the state-of-the-art, with a small spatial footprint and reduced cost. Successful simulations and tests were conducted in a 6 m³ test tank, confirming the feasibility of the system. Furthermore, real-world sea trials demonstrated an accuracy of approximately 3 meters, showcasing the algorithm's effectiveness. Compared to the state-of-the-art, the proposed system is quicker to set up, requires no calibration, is more cost-effective, and consumes less power, although it is slightly less accurate.