

Optimisation du déploiement et des performances d'un
système de positionnement ultrasonique longue portée pour le
sous-marin MASKI+

par

Simon BABINEAU

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE, CONCENTRATION PERSONNALISÉE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 13 SEPTEMBRE 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Simon Babineau, 2019



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Guy Gauthier, Directeur de Mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Luc Provencher, Co-directeur
Institut de Recherche d'Hydro-Québec

Mme. Lyne Woodward, Présidente du Jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Maarouf Saad, membre du jury
Département de génie électrique, École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 22 AOÛT 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur de recherche, M. Guy Gauthier et mon codirecteur de recherche, M. Luc Provencher, pour leur aide, conseils, disponibilité et soutien, qui furent essentiels à la réussite de ce projet de recherche. J'aimerais aussi remercier ma femme pour m'avoir permis de réaliser ce projet, Alexandre Filion pour tous ses conseils, les membres de ma famille, ainsi que mes amis proches pour le support moral qu'ils m'ont donné.

De plus, j'aimerais souligner la contribution de l'unité d'expertise Robotique d'inspection et de maintenance, du Laboratoire d'Expérimentation de l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ), où les tests matériels et logiciels ont été réalisés et le Port de Montréal, où les tests de performances ont eut lieu.

Enfin, j'aimerais remercier l'École de technologie supérieure pour le support offert lors des cours et des démarches nécessaires à l'accomplissement de ce projet de maîtrise.

Optimisation du déploiement et des performances d'un système de positionnement ultrasonique longue portée pour le sous-marin MASKI+

Simon BABINEAU

RÉSUMÉ

Le présent travail a pour but d'améliorer les performances d'un système de positionnement ultrasonique longue portée lorsqu'utilisé pour positionner le sous-marin MASKI+ dans son environnement d'utilisation typique. Le système de positionnement SouthStar de Desert Star Systems sera utilisé pour les tests. Le sous-marin MASKI+ est un robot sous-marin d'inspection longue portée qui est opéré à distance. Il a été conçu à l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ) pour permettre l'inspection sécuritaire et efficace des installations immergées d'Hydro-Québec. Les retombées de ces inspections sont estimées à plus de 2 millions de dollars canadiens par année. Les installations immergées sont principalement des barrages hydroélectriques, des galeries d'amenées et des digues de rétention pour les réservoirs. L'environnement où est principalement utilisé le MASKI+ est donc en eau douce et à des profondeurs inférieures à 300 m.

Afin de bien comprendre le contexte d'utilisation du système, une présentation des différentes technologies de positionnement sous-marin sera faite. Un bon nombre de ces technologies sont d'ailleurs également utilisées par le sous-marin MASKI+, comme les capteurs de vitesse à effet Doppler et les systèmes de navigation inertiels. Les avantages et inconvénients de ces technologies de positionnement relatif seront présentés afin de présenter leur complémentarité en relation avec le système de positionnement ultrasonique.

Les différents types de système de positionnement, soit LBL, SBL et USBL, seront par la suite présentés, ainsi que les différents facteurs qui peuvent affecter les performances d'un système de positionnement ultrasonique. Parmi ces derniers, la vitesse du son dans l'eau, les différents effets que son évaluation et sa variation peuvent avoir sur la propagation des pulsations ultrasoniques et le positionnement des balises de référence seront présentés.

Le système SouthStar sera par la suite abordé. Ce dernier appartient à la catégorie de système de positionnement de type LBL. Ce qui le différencie d'un système LBL standard est l'utilisation d'une source de pulsation unique pour réaliser le positionnement. En effet, seule la balise à localiser émet des pulsations ultrasoniques, puisque les balises de référence ne répondent pas à la balise qu'il faut localiser. L'avantage de cette méthode de fonctionnement est d'éviter l'accumulation d'imprécision liée à la propagation des pulsations ultrasoniques pour la réponse des balises de référence.

Les balises de référence prennent leur nom du fait que leur position est connue. Afin de positionner les balises de référence de façon à maintenir une position stable, un système de déploiement a été conçu pour optimiser la performance du système de positionnement. La conception du système de déploiement a dû tenir compte des multiples contraintes associées à l'utilisation

du système de positionnement dans l'environnement typique du sous-marin. Le concept choisi fut celui d'un cadre monté sur roues qui s'appuient sur les murs des installations immergées et est ancré au sommet de ces dernières.

Avant d'évaluer les performances du système dans un environnement réel, des tests en piscine ont été réalisés afin de valider le bon fonctionnement du système de positionnement. Ces tests ont également permis de faire ressortir les faiblesses du système vendu par Desert Star Systems, dont des problèmes logiciels et des limitations de modification de paramètres importants.

Pour donner suite à la validation du fonctionnement de base du système de positionnement, des tests en environnement réel ont été réalisés au Port de Montréal. Ces tests ont permis de réaliser des trajets de plus grandes étendues qu'en piscine. Une multitude de cas de figure ont été préparés spécialement pour les tests en environnement réel. Ils représentent différentes configurations de déploiement pour adresser les problématiques qu'il est possible de rencontrer lors de l'inspection de structures immergées. Les tests en environnement réel ont permis de valider l'influence de certains paramètres de déploiement comme la distance entre les murs et les balises de référence, la profondeur de ces dernières et le comportement du système lorsqu'une balise de référence rencontre des problèmes.

Les données recueillies lors des tests en environnement réel ont ensuite été traitées. L'objectif était d'optimiser la performance du positionnement avec le traitement des données brutes. Différentes méthodes ont donc été testées. Les méthodes permettant d'améliorer le plus les performances, et ce même dans des conditions d'utilisations difficiles, sont la calibration de chacune des balises de référence et l'élimination des données aberrantes basée sur la vitesse maximale.

Dans ce travail, un système de déploiement a spécialement été conçu et optimisé pour l'utilisation du système de positionnement ultrasonique dans l'environnement typique d'utilisation du sous-marin MASKI+. Les paramètres d'utilisation de ce système de déploiement ont été établis sur des tests en environnement réel. De plus, des pistes de solution pour l'optimisation des performances du positionnement ont été testées avec succès avec les données recueillies pendant les tests en environnement réel.

Mots-clés: système de positionnement, ultrasons, LBL, ROV, trilatération, sous-marin, MASKI+

Deployment and performance optimisation of a long range ultrasonic positioning system for the MASKI+ inspection ROV

Simon BABINEAU

ABSTRACT

The objective of the present work is to improve the general performances of a long range ultrasonic positioning system when used to position the MASKI+, an inspection Remotely Operating Vehicule (ROV), in its typical work environment. The SouthStar positioning system, which was used for the current tests, is manufactured and sold by Desert Star Systems. The MASKI+, a long range ROV, is primarily used for the inspection of Hydro-Québec's submerged infrastructures. It was designed entirely at Hydro-Quebec's Research Institute, specifically with this purpose in mind. The MASKI+ allows a safe and efficient way to monitor the submerged infrastructures' state. It is estimated to save the company more than 2 million Canadian dollars each year in avoided costs. Hydro-Québec's submerged infrastructures are mainly hydroelectric dams, headrace tunnels and reservoir dams. The MASKI+'s work environment is fresh water with depths that go up to 300 m.

To ensure a good understanding of the context in which the positioning system is used, different positioning technologies are presented, many of which are also used on the MASKI+. These include Doppler Velocity Logs (DVL) and inertial navigation systems. The advantages and disadvantages of those technologies are also presented to highlight their complementarity in relation to the ultrasonic positioning systems.

The different types of ultrasonic positioning systems, LBL, SBL and USBL are briefly described. The different aspects that influence an ultrasonic positioning system's performance are then explained. Among these are the underwater speed of sound, the effect of its variation on ultrasound propagation and the acoustic equipment's positioning at the worksite.

The SouthStar positioning system, a LBL system, isn't a typical LBL system. The major distinctive point is its use of a single pulsation from the ROV to calculate the position. No reply from the reference acoustic microphones is used. This reduces the accumulation of positioning errors caused by the propagation of ultrasonic pulses to estimate distances with the reference microphones.

The reference microphones have known positions. To ensure these positions remained unchanged during the inspections, a deployment system was designed and fabricated during the present work. The design process took into account the many constraints associated with the use of the positioning system of the MASKI+ within its usual environment. The chosen design was a tubular frame on wheels. The frame was rolled down the dam walls and secured at the top of the dam with ropes.

Before the positioning system's performance could be evaluated, tests were conducted in a pool. These tests were performed to validate the proper functioning of the positioning system and to expose software problems and parameter modification limitations of the SouthStar system sold by Desert Star Systems.

Following the pool tests, performance evaluation tests were conducted at the Port of Montreal. This real life environment is similar to dam inspection. It can even be considered more challenging. These tests allowed the evaluation of different deployment configurations. Among these were the depth and the distances from the walls of the reference microphones.

The data collected was then analysed. To improve the positioning performances, different methods were used. The calibration of the reference's microphones and discrimination of aberrant positions based on maximum speed proved to be the most beneficial methods.

In the present work, a deployment system was designed for the specific needs of dam inspection with a long range ultrasonic positioning systems. It was later used to gather positioning data in a real world environment. Different methods were then successfully used to improve the positioning results.

Keywords: positioning system, ultrasound, LBL, ROV, trilateration, underwater, MASKI+

TABLE DES MATIÈRES

		Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	PROBLÉMATIQUE	5
1.1	Contexte	5
1.2	Objectifs	6
CHAPITRE 2	TECHNOLOGIES DE POSITIONNEMENT	7
2.1	Systèmes de positionnement global	7
2.2	Systèmes de positionnement sous-marin	8
2.2.1	Systèmes de positionnement à l'estime	8
2.2.1.1	Les capteurs de vitesse à effet Doppler	9
2.2.1.2	Les systèmes de navigation inertielle	11
2.2.2	Les systèmes de positionnement ultrasonique	11
2.2.2.1	Déploiement	12
2.2.2.2	Fréquences utilisées par les systèmes	12
2.2.2.3	Méthode de localisation	13
2.3	Principe de base de la trilatération	14
2.4	Intégration de données provenant de plusieurs capteurs	14
2.5	Sources d'erreurs possibles	15
2.5.1	Rapport signal sur bruit	15
2.5.2	Vitesse du son dans l'eau	16
2.5.2.1	Formules théoriques	17
2.5.2.2	Influence des paramètres principaux	20
2.5.2.3	Profil de vitesse	22
2.5.2.4	Eau douce	24
2.5.2.5	Réfraction	25
2.5.3	Positionnement des éléments acoustiques	26
2.5.3.1	Vitesse du son dans l'eau	26
2.5.3.2	Zones mortes	26
2.5.3.3	Confondre un écho et le vrai signal	28
2.5.3.4	Déplacement des balises et mauvaise évaluation de leur position	28
CHAPITRE 3	SYSTÈME À L'ÉTUDE	29
3.1	Principe de fonctionnement	29
3.2	Matériel	31
3.3	Interface logicielle	32
CHAPITRE 4	SYSTÈME DE DÉPLOIEMENT	35
4.1	Contraintes considérées	35

4.1.1	Environnement	35
4.1.2	Système de déploiement	35
4.2	Concept retenu	36
4.3	Autre concept	41
CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE DES TESTS		43
5.1	Évaluation des performances du système	43
5.2	Test en piscine	44
5.2.1	Le démarrage du système	45
5.2.2	Modification apportée au système	45
5.2.3	Ce qu'il faut retenir des tests en piscine	46
5.3	Tests en environnement réel	47
5.3.1	Équipements spécifiques aux tests	47
5.3.2	Lieux des tests	49
5.3.3	Positionnement des balises RBS	51
5.3.4	Cas de figure	52
5.3.4.1	Cas 1 : Test de référence	53
5.3.4.2	Cas 2 : Test de base	54
5.3.4.3	Cas 3 : Distance du mur des RBS	55
5.3.4.4	Cas 4 : Profondeur des RBS	56
5.3.4.5	Cas 5 : Delta de profondeur TLT vs RBS	57
5.3.4.6	Cas 6 : Perte d'une balise RBS	58
5.3.4.7	Cas 7 : Vitesse plus élevée	59
CHAPITRE 6 RÉSULTATS DES TESTS EN ENVIRONNEMENT RÉEL		61
6.1	Présentation des résultats	61
6.2	Conclusion partielle	72
CHAPITRE 7 TRAITEMENT ET ANALYSE DES RÉSULTATS		75
7.1	Pistes d'amélioration	75
7.1.1	Calibration	75
7.1.2	Élimination des valeurs aberrantes	75
7.1.3	Moyenne mobile	76
7.1.4	Algorithmes pour la localisation avec une quantité de balises de référence différente de trois	76
7.1.4.1	Solution possible à une balise de référence	77
7.1.4.2	Solution possible à deux balises de référence	78
7.1.5	Méthode de trilatération utilisée	78
7.2	Impact des pistes d'améliorations	85
7.2.1	Calibration	86
7.2.2	Élimination des positions aberrantes basée sur la vitesse maximale	87
7.2.3	Limites physiques	88
7.2.4	Moyenne mobile	89

7.2.5	Résultats des cas de figures suite aux corrections	91
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		93
ANNEXE I	COEFFICIENTS UTILISÉS AVEC LA FORMULE DE CHEN ET MILLERO	97
BIBLIOGRAPHIE		98

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Distance des éléments acoustiques en fonction du type de système de positionnement 12
Tableau 2.2	Bande de fréquences et portée maximale 13
Tableau 2.3	Précision des LBL en fonction de la fréquence 26
Tableau 4.1	Améliorations apportées au système de déploiement de la version V2 à V7 38

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	DVL Navigator de Teledyne..... 9
Figure 2.2	Zones d'intersection de 2 sphères et de 3 sphères 15
Figure 2.3	Évolution de la vitesse du son en fonction de la température..... 20
Figure 2.4	Évolution de la vitesse du son en fonction de la profondeur..... 21
Figure 2.5	Évolution de la vitesse du son en fonction de la salinité 21
Figure 2.6	Exemple de variation de vitesse du son 23
Figure 2.7	Zone morte causée par la courbure du chemin acoustique 27
Figure 3.1	Schéma de communication du système SouthStar 29
Figure 3.2	Quatre balises RBS et une balise TLT 30
Figure 3.3	Chargeur et cinq modules FRF 31
Figure 3.4	Interface du logiciel SouthStar 32
Figure 3.5	Interface du logiciel DiveBase 33
Figure 4.1	Système de déploiement V1 37
Figure 4.2	Système de déploiement V2 (à gauche) à V6 (à droite)..... 38
Figure 4.3	Système de déploiement V7 40
Figure 5.1	Piscine de tests du LE 44
Figure 5.2	Bouée mobile de la balise TLT 48
Figure 5.3	Carte avec profondeur du Bassin Bickerdike 49
Figure 5.4	Photo satellite du Bassin Bickerdike 50
Figure 5.5	Positions des balises RBS pour le test en environnement réel 51
Figure 5.6	Schéma de la trajectoire du cas de figure 1 53
Figure 5.7	Schéma de la trajectoire du cas de figure 2 54

Figure 5.8	Schéma de la trajectoire du cas de figure 3	55
Figure 5.9	Schéma de la trajectoire du cas de figure 4	56
Figure 5.10	Schéma de la trajectoire du cas de figure 5	57
Figure 5.11	Schéma de la trajectoire du cas de figure 6	58
Figure 5.12	Schéma de la trajectoire de cas de figure 7	59
Figure 6.1	Résultats du cas de figure 1.....	62
Figure 6.2	Résultats du cas de figure 2.....	63
Figure 6.3	Résultats du cas de figure 3.....	64
Figure 6.4	Positions individuelles de chaque balise du cas de figure 3.....	65
Figure 6.5	Résultats du cas de figure 4.....	66
Figure 6.6	Position individuelles de chaque balise du cas de figure 4.....	67
Figure 6.7	Résultats du cas de figure 5.....	68
Figure 6.8	Résultats du cas de figure 6.....	69
Figure 6.9	Interface du logiciel DiveBase pour le cas de figure 6	70
Figure 6.10	Résultats du cas de figure 7.....	71
Figure 7.1	Représentation graphique de V_{1-3} , i et j	81
Figure 7.2	Comparaison des méthodes de calcul de position	83
Figure 7.3	Comparaison des résultats de trilatération de DiveBase vs ATI	85
Figure 7.4	Impact de la calibration des balises fixes	86
Figure 7.5	Élimination des positions aberrantes basée sur la vitesse maximale de 3 m/s	87
Figure 7.6	Correction des positions basée sur les limites physiques	88
Figure 7.7	Moyenne mobile basée sur des valeurs antérieures	89
Figure 7.8	Comparaison du nombre d'échantillons des moyennes mobiles	90

Figure 7.9	Cas de figure 1 avec correctifs	91
Figure 7.10	Cas de figure 2 avec correctifs	92
Figure 7.11	Cas de figure 3 avec correctifs	92

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
ABS	« Acrylonitrile Butadiene Styrene »
ATI	Algorithme de Trilatération de l'IREQ
AUV	« Autonomous Underwater Vehicle »
DGPS	« Differential Global Positioning System »
DVL	« Doppler Velocity Log »
ÉTS	École de Technologie Supérieure
FRF	Module de communication sans-fil
GPS	« Global Positioning System »
IREQ	Institut de Recherche d'Hydro-Québec
LBL	« Long Based Line »
LE	Laboratoire d'Expérimentation de l'IREQ
NPSE	«Noncausal a Priori SNR Estimator»
PC	« Personal Computer »
RF	Radiofréquence
RBS	« Remote Baseline Station »
ROV	« Remotely Operated Vehicle »
SBL	« Short Based Line »
SNI	Système de Navigation Inertielle
SNR	« Signal to Noise Ratio »
SPU	Système de Positionnement Ultrasonique
TLT	Balise Ultrasonique Mobile
UART	« Universal Asynchronous Receiver Transmitter »
USBL	« Ultra Short Based Line »

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE TEMPS

Période

h	heure
s	seconde

Fréquence

GHz	gigahertz
kHz	kilohertz

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

km	kilomètre
m	mètre
cm	centimètre

UNITÉS DE MASSE

Masse

kg	kilogramme
----	------------

Masse volumique

kg/m ³	kilogramme par mètre cube
-------------------	------------------------------

UNITÉS CALORIFIQUES

Température

°C	degré Celsius
----	---------------

UNITÉS MÉCANIQUES

Vitesse

mm/s	millimètre par seconde
m/s	mètre par seconde
km/h	kilomètre par heure

Accélération

m/s ²	mètre par seconde carré
------------------	-------------------------

Contrainte, pression

μPa	micropascal
-----	-------------

Viscosité cinématique

m ² /s	mètre carré par seconde
-------------------	-------------------------

UNITÉS ÉLECTRIQUES

Flux énergétique

GW	gigawatt
MW	mégawatt

UNITÉS D'INTENSITÉ DU SON

dB	décibel
----	---------

Source : Bureau international des poids et mesures (2006).

INTRODUCTION

Depuis bien longtemps, les hommes tentent de se localiser au cœur des vastes territoires de notre planète. L'utilisation de cartes et de repères physiques tels que les étoiles et le Soleil permit aux premiers explorateurs de planifier et de suivre des trajets sur de grandes distances.

De grandes avancées technologiques dans le domaine des systèmes de positionnement global (GPS) permettent maintenant de se positionner facilement et à faible coût sur la majorité de la planète. Dans le cas des GPS, il est toutefois idéal d'être à l'extérieur et d'avoir au minimum une partie du ciel en vue, car cette technologie doit communiquer en ligne de vue avec plusieurs satellites.

La majorité des besoins et des applications étant située sur la terre, sur l'eau ou dans les airs, il est normal que les technologies se soient développées à ces fins en utilisant le médium de communication commun à tous ces environnements : l'air. Ce médium est essentiel aux communications sans fil et par conséquent aux systèmes de positionnement de grandes portées.

D'autres besoins et applications sont situés dans un environnement moins populaire : les milieux sous-marins. Il s'agit d'un environnement ayant un accès et des conditions difficiles, et où les possibilités techniques sont plus restreintes. Étant donné que cet environnement ne permet pas à l'humain d'y interagir directement, cela complexifie et ralentit considérablement les avancées technologiques. En effet, l'humain se doit de créer des machines et des robots sous-marins pour pouvoir travailler efficacement et de façon sécuritaire dans cet environnement.

L'utilisation des sous-marins téléopérés ou «Remotely Operated Vehicle» (ROV) est maintenant répandu à travers le monde (Paull, Saeedi, Seto, & Li, 2014). Les ROVs sont appelés à réaliser des tâches très variées qui vont de l'inspection visuelle de coques de bateaux (Tobe, 2013) à la réparation de puits de pétrole en haute mer (Sun et al., 2015). La majorité des ROVs

commerciaux utilisent des technologies des années 1990-2000 et sont conçus pour une utilisation en haute mer.

Au Québec, depuis le début des années 90, les besoins de l'industrie hydroélectrique ont amené Hydro-Québec à développer plusieurs générations de robots sous-marins spécialement conçus pour l'opération en eau douce. Plusieurs d'entre eux étaient dédiés à l'inspection de barrages (Provencher & Sarraillon, 2016) et d'autres étaient spécialisés dans les interventions reliées aux structures immergées (Beaudry et al., 2010). L'inspection de barrages, tout particulièrement, implique un environnement très difficile. Il présente une visibilité très limitée, de forts courants et des débris présents à de multiples endroits. Le positionnement devant le barrage est aussi un défi qui doit être adressé, car avec une faible visibilité dans un environnement hostile, la localisation 3D est cruciale au bon déroulement des inspections et des interventions sous-marines.

Dans le cadre de ce projet de recherche, les problématiques réelles reliées à l'utilisation d'un système de positionnement ultrasonique pour localiser un sous-marin en eau douce devant un barrage seront abordées. L'hypothèse est qu'il est possible d'améliorer globalement la précision du positionnement. Pour ce faire, l'optimisation du déploiement du système et le traitement des données seront les aspects principalement abordés ici.

Les contributions du présent travail incluent le premier démarrage d'un nouveau système de positionnement acoustique. Cela comprend, entre autres, l'assemblage du système, l'installation temporaire du système dans l'environnement d'essais en milieu contrôlé, la configuration de l'ordinateur dédié à l'utilisation du système de positionnement, l'ensemble des tests en milieu contrôlé et la modification de la source d'alimentation du système de positionnement. Le démarrage du système, la conception, l'achat et l'assemblage du système de déploiement font aussi partie des contributions du présent travail. De plus, les contributions du présent travail

incluent l'élaboration, la préparation et la réalisation des essais en milieu réel. Pour finir, toutes les pistes d'améliorations utilisées dans le mémoire sont des contributions du présent travail.

Le présent mémoire est composé de 7 chapitres qui s'organisent comme suit :

1. Le chapitre 1 présente la problématique et les objectifs des présents travaux ;
2. Le chapitre 2 présente certaines technologies de positionnement et plus en détail le fonctionnement d'un système de positionnement ultrasonique ;
3. Le chapitre 3 présente le système de positionnement utilisé pour les présents travaux ;
4. Le chapitre 4 présente le système de déploiement conçu lors des présents travaux ;
5. Le chapitre 5 présente les différents tests effectués ;
6. Le chapitre 6 présente les résultats obtenus lors des tests en environnement réel ;
7. Le chapitre 7 présente l'amélioration des performances par le traitement des données.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

1.1 Contexte

De grands chantiers ont permis la construction de nombreuses installations immergées d'envergure à travers le globe, comme le barrage des Trois Gorges en Chine. Par sa géologie, le Québec est un endroit favorable à l'utilisation de l'hydroélectricité. Les barrages hydroélectrique et les digues formant un réservoir requièrent une inspection régulière afin d'évaluer l'état des installations. Ces inspections concernent entre autres l'état du fond, l'accumulation des débris à proximité de l'entrée des prises d'eau, l'état des vannes et la dégradation des murs eux-mêmes.

Ces inspections sont effectuées à titre préventif et sont généralement effectuées de façon périodique. La détection tardive ou l'absence de détection de ces problèmes entraînent des risques et des coûts supplémentaires. Chez Hydro-Québec seulement, il est estimé que les retombées de l'inspection des installations par un seul sous-marin épargnent annuellement à l'entreprise 2 millions de dollars canadiens (Provencher & Sarraillon, 2016).

En 2016, la Chine opérait déjà un parc hydroélectrique de 331 110 MW (International Hydropower Association, 2017). Leurs objectifs pour 2020 et 2050 sont respectivement de 350 GW et 540 GW (Walker & Qin, 2015). Avec une telle croissance et la durée de vie moyenne de ces installations, il est possible de dire que l'inspection de barrages hydroélectriques est un domaine en croissance.

L'inspection des structures immergées peut, entre autres, se faire à l'aide de ROVs. Chez Hydro-Québec, pendant la période de 2000 à 2015, les sous-marins ROV2, ROV3 et MASKI ont effectués plus de 220 campagnes d'inspections en chantier (Provencher, Sarraillon et al., 2015). Les technologies améliorant leur performance et facilitant leur utilisation sont donc en constante évolution pour répondre aux besoins grandissants.

1.2 Objectifs

L'incorporation de nouvelles technologies passe souvent par l'ajout de nouveaux équipements ou logiciels. Le système de localisation choisi pour la quatrième génération de ROVs conçu par Hydro-Québec, le MASKI+, incorpore une multitude de technologies de pointe et de nouveaux équipements comme un gyroscope optique et une centrale inertielle de performance militaire, ainsi qu'un système de positionnement ultrasonique longue portée.

L'objectif des présents travaux a été d'optimiser le déploiement et les performances de ce système de positionnement ultrasonique pour son utilisation éventuelle avec le MASKI+. Le système de positionnement est déployé sur le site d'inspection à l'aide d'un système de déploiement. Ce dernier est spécialement conçu pour répondre aux besoins liés à l'inspection de structures immergées comme les barrages hydroélectriques. L'atteinte de l'objectif passe également par le traitement des résultats bruts fourni par le système de positionnement. Le traitement de ces données a été réalisé afin d'optimiser les performances du positionnement dans les conditions qu'impose l'inspection de barrages et autres installations connexes. Pour bien comprendre l'ampleur des travaux réalisés et des contraintes associées à ce projet, une présentation des technologies entourant le positionnement sous-marin s'impose.

CHAPITRE 2

TECHNOLOGIES DE POSITIONNEMENT

2.1 Systèmes de positionnement global

Bien qu'initialement réservée au domaine militaire, la technologie de positionnement global GPS a été mise à la disposition du grand public. Cela a grandement amélioré la navigation au quotidien pour plusieurs types de véhicules (auto, avions, satellites, etc.). L'utilisation du GPS a également contribué à l'avancement scientifique dans, entre autres, le domaine de la navigation, de l'arpentage et de la géodésie.

La technologie GPS est basée sur un réseau de satellites qui émettent des signaux qui sont ensuite captés par les récepteurs sur Terre. Les récepteurs utilisent le temps de propagation des signaux pour calculer leur position relative aux satellites GPS. La localisation d'un récepteur GPS de base a une précision d'environ une dizaine de mètres. Des techniques permettent d'améliorer davantage la précision des positions obtenues par GPS.

L'une de ces techniques est le GPS différentiel (DGPS). Cette technique consiste à compenser les erreurs en comparant la position calculée par le récepteur de la station DGPS à partir des signaux GPS avec la position réelle d'une station DGPS. Les stations DGPS ont un emplacement connu et sont ainsi capables de détecter des erreurs dans les signaux transmis par les satellites GPS. Le décalage enregistré est ensuite transmis par ondes radio par la station DGPS. Les récepteurs GPS utilisant la technologie DGPS captent ce signal et corrigent leurs résultats avec le décalage DGPS. La précision de la position utilisant cette technologie est d'une dizaine de centimètres dans des conditions idéales (National Coordination Office for Space-Based Positioning). De plus, la dégradation des performances de cette technique ne serait que de 22 cm sur une distance de 100 km de la station de DGPS (Monteiro, Moore, & Hill, 2005). La plupart des appareils GPS modernes utilisent la technologie DGPS.

Grâce à plusieurs avancées technologiques comme l'amélioration des différents capteurs, moteurs et batteries, l'utilisation de ROV ou de véhicules sous-marins autonomes, en anglais « Autonomous Underwater Vehicle » (AUV) est de plus en plus courante pour des tâches de plus en plus variées. Ces engins sont utilisés, entre autres, pour cartographier les fonds marins, pour inspecter des installations immergées de toutes sortes et pour des missions de sauvetage et de recherche.

Malheureusement, les ondes radios utilisées par les satellites GPS, d'une fréquence d'environ 1,5 GHz, sont incapables de pénétrer dans l'eau. C'est pourquoi d'autres techniques et technologies sont requises pour le positionnement sous-marin.

2.2 Systèmes de positionnement sous-marin

La précision du positionnement des véhicules sous-marins affecte directement leur capacité à naviguer efficacement ainsi que la qualité des relevés effectués par ces derniers. Plusieurs techniques et technologies ont été développées pour répondre à ce problème. Certaines peuvent être regroupées sous l'appellation navigation à l'estime ou en anglais « dead reckoning ». Une autre famille d'instruments est celle des systèmes de positionnement acoustique. Voici une courte description de ces deux groupes.

2.2.1 Systèmes de positionnement à l'estime

L'appellation « navigation à l'estime » regroupe des techniques se basant sur une position antérieurement connue, la direction et la vitesse du véhicule, ainsi que le temps écoulé pour calculer la prochaine position. Parmi les instruments utilisés pour la navigation à l'estime sous l'eau, on retrouve les capteurs de vitesse à effet Doppler ou en anglais « Doppler Velocity Log » (DVL) et les systèmes de navigation inertielle (SNI). Le sous-marin MASKI+ est équipé d'un DVL et d'une centrale inertielle (Provencher & Sarraillon, 2016). Voici donc une courte présentation du fonctionnement de ces instruments.

2.2.1.1 Les capteurs de vitesse à effet Doppler

Les DVLs utilisent, comme leur nom l'indique, l'effet Doppler pour évaluer la vitesse du fond marin par rapport au capteur. La vitesse est intégrée par rapport au temps pour obtenir le déplacement. En général, les DVLs utilisent quatre oscillateurs piézoélectriques pour générer et capter une pulsation acoustique. Pour obtenir un vecteur de vitesse 3D, il faut qu'au moins trois oscillateurs captent leur écho revenant du fond marin ou d'une autre surface.

Le MASKI+ est équipé du DVL Navigator fabriqué par Teledyne RD Instruments présenté à la Figure 2.1. Leur gamme d'équipement utilise des appareils dont la fréquence varie entre 38,4 kHz et 1228,8 kHz. Leur portée est inversement proportionnelle à la fréquence utilisée. Par exemple, si un même appareil qui utilise une fréquence de 307,2 kHz passe à une fréquence de 1228,8 kHz, sa portée passera de 200 m à 25 m. Cependant, plus la fréquence est élevée, plus il sera facile d'obtenir des résultats précis (Teledyne RD Instruments, 2008). Les valeurs de déplacement des DVLs peuvent être jointes à d'autres données pour améliorer la précision de l'estimation. Certains appareils ont leur propre boussole, capteur de profondeur, d'attitude et de température.



Figure 2.1 DVL Navigator de Teledyne
Tirée de Teledyne RD Instruments (2008, p.2)

Le principal problème de tout système de navigation à l'estime est le fait de se baser sur la position précédente pour trouver la nouvelle position, puisque cela accumule les erreurs avec le temps. En effet, les erreurs des calculs précédents sont additionnées à l'erreur du nouveau calcul. À titre d'exemple, pour les DVLs de Teledyne RD Instruments, la précision à long terme varie entre $\pm 0,2 \%$ ± 1 mm/s et $\pm 1,15 \%$ ± 2 mm/s (Teledyne RD Instruments, 2008). La partie de l'erreur en % et celle en mm/s sont cumulées pour obtenir la précision à long terme totale. Donc, si un véhicule sous-marin se déplace de 1000 m en 1000 s, l'erreur possible est de ± 3 m s'il utilise le DVL le plus précis ou de $\pm 13,5$ m s'il utilise le DVL le moins précis. Si on utilise une vitesse que l'on retrouve chez plusieurs modèles de ROV soit environ 5,56 km/h (3 nœuds), et que le ROV se déplace pendant une journée de travail entière (8 h) on se retrouve avec des erreurs de ± 118 m et ± 569 m pour le plus précis et le moins précis respectivement.

Il est facile d'imaginer des situations où ces erreurs sont inacceptables. Afin de les remettre à zéro, il faut utiliser une position provenant d'une autre source et l'utiliser comme nouveau point de départ pour le calcul de la prochaine position.

En plus de l'accumulation de l'erreur avec le temps, les DVLs sont aussi susceptibles de rencontrer d'autres sources d'erreurs. Par exemple, si un écho ne revient pas du fond marin, mais plutôt d'un objet entre deux eaux ou une concentration importante de particules dans l'eau, le DVL ne peut distinguer la différence. Puisque le DVL mesure des vitesses relatives, si l'objet sur lequel le signal acoustique rebondit est en mouvement, la valeur de la vitesse sera faussée. Les capteurs DVL sont donc sujets à des erreurs provoquées par de mauvaises observations du milieu les entourant.

2.2.1.2 Les systèmes de navigation inertielle

Tous comme les DVLs, les SNIs doivent avoir une position de départ pour y ajouter le déplacement calculé et trouver la nouvelle position. Contrairement aux DVLs qui obtiennent leurs valeurs de vitesse en observant le milieu qui les entoure (ex : la vitesse du fond marin par rapport au capteur), les SNIs n'ont besoin d'aucun contact avec l'extérieur pour fonctionner. Ce sont des appareils capables de détecter les accélérations dans tous les degrés de liberté. Les valeurs d'accélération sont doublement intégrées par rapport au temps pour obtenir le déplacement.

De nos jours, plusieurs types de SNI sont toujours en utilisation, dont, entre autres, les gyromètres à laser et les gyromètres à fibre optique. Comme mentionnés précédemment, les techniques de navigation à l'estime, dont font partie les SNIs, accumulent les erreurs avec le temps. Cependant, les SNIs ne sont pas affectées par des erreurs provenant de mauvaises observations du milieu extérieur, puisqu'ils basent leur valeur de position uniquement sur les accélérations mesurées sans interaction avec l'extérieur.

2.2.2 Les systèmes de positionnement ultrasonique

Le deuxième groupe précédemment identifié est celui des systèmes de positionnement ultrasoniques. Un système de positionnement ultrasonique utilise des émetteurs-récepteurs acoustiques pour transmettre des signaux et ensuite calculer la position d'un émetteur-récepteur.

Les systèmes de positionnement ultrasoniques se divisent en trois grands types. Ils sont catégorisés en fonction de la distance typique séparant leurs éléments acoustiques. Cette distance est appelée «baseline» en anglais. Les éléments acoustiques font ici référence aux émetteurs et récepteurs acoustiques utilisés par le système. Voici donc les trois grands types : ligne de base très courte ou « ultra short baseline » (USBL), ligne de base courte ou « short baseline » (SBL) et ligne de base longue ou « long baseline » (LBL). Le Tableau 2.1, présente les distances séparant généralement les éléments acoustiques en fonction des différents types de système. Ces distances peuvent varier d'un modèle à l'autre.

Tableau 2.1 Distance des éléments acoustiques en fonction du type de système de positionnement

Tiré de Vickery (1998, p.5)

Type de système	USBL	SBL	LBL
Distance des éléments acoustiques	Généralement moins de 10 cm	Plusieurs dizaines de mètres (20 à 50 m.)	100 m. ou plus

2.2.2.1 Déploiement

Puisque les distances entre les éléments acoustiques sont assez petites, les systèmes USBL et SBL sont en général déployés directement sur un vaisseau de surface. Cela simplifie grandement le déploiement. Cependant, pour obtenir une position absolue du véhicule sous-marin que le système localise, le système doit avoir la position du vaisseau de surface, généralement un bateau. Cela peut être réalisé, entre autres, à l'aide d'un système supplémentaire de type GPS. La précision de la position absolue du véhicule est cependant affectée par la précision de ce deuxième système de positionnement. Au début de chaque déploiement, une calibration est requise pour donner une position de départ au système. La précision de cette calibration est également en partie responsable de la précision générale du système.

En raison de la grande distance entre leurs éléments acoustiques, les systèmes LBL doivent être déployés avant le début de la mission et récupérés à la fin. Leur position doit être connue et idéalement demeurer fixe tout au long de la mission. La qualité de ces positions affectera la précision du positionnement de l'appareil durant la mission. Pour ce faire, les éléments acoustiques des systèmes LBL sont généralement ancrés au fond marin. L'ensemble de ces conditions allonge grandement le temps et le coût requis pour la mission.

2.2.2.2 Fréquences utilisées par les systèmes

La fréquence utilisée par les systèmes de positionnement ultrasoniques a une influence sur la portée et la précision. Le Tableau 2.2, montre l'influence de la bande de fréquences choisie sur la portée maximale d'un système ultrasonique.

Tableau 2.2 Bande de fréquences et portée maximale
Tiré de Vickery (1998, p.8)

	Bande de fréquences (kHz)	Portée maximale
Basse fréquence (BF)	8 à 16	> 10 <i>km</i>
Moyenne fréquence (MF)	18 à 36	2 à 3 <i>km</i>
Haute fréquence (HF)	30 à 60	1500 <i>m</i>
Très haute fréquence (THF)	50 à 110	< 1000 <i>m</i>
Très très haute fréquence (TTHF)	200 à 300	< 100 <i>m</i>

Comme il est mentionné dans (Vickery, 1998) et traduit ici en français, « on assume que les niveaux de bruit dans les bandes de fréquences sont moins élevés que 95 dB et que les puissances des émetteurs sont plus élevées, soit 195 dB (référence de 1 μPa à 1 m) ».

2.2.2.3 Méthode de localisation

Un autre aspect qui différencie les types de systèmes de positionnement ultrasoniques est la technique utilisée pour évaluer la position de l'appareil à localiser. En effet, les systèmes USLB et SBL n'utilisent pas la même technique que ceux de type LBL. Les systèmes USBL et SBL estiment en général l'angle d'arrivée du signal acoustique et la distance de la source du signal. L'angle d'arrivée du signal peut être estimé en comparant les temps d'arrivée de la pulsation ou le déphasage du signal acoustique capté par les différents éléments acoustiques. Pour les systèmes USBL, l'espacement entre les éléments acoustiques est déterminé en fonction de la fréquence utilisée par le système. La section 2.1 de (Seaton, 2013) illustre bien la technique.

La distance entre le véhicule à localiser et les éléments acoustiques est, quant à elle, estimée de plusieurs façons. Cependant, le principe de base ne change pas. Si le système connaît le temps écoulé entre l'émission par le véhicule à localiser et la capture du signal acoustique par le système de positionnement et la vitesse du son dans l'eau, il peut déduire la distance. Dans certains cas, le système émet lui-même un signal d'interrogation et le véhicule répond ensuite. Le système n'a qu'à diviser en deux le temps entre son signal d'interrogation et la réception de la réponse. Dans le cas des ROVs et des systèmes remorqués, l'appareil sous-marin est relié à

la surface par un câble. L'équivalent du signal d'interrogation peut être transmis par ce câble. Le moment où l'émetteur envoie le signal de réponse est donc connu et le temps de voyage peut être estimé (Vickery, 1998).

Dans le cas des systèmes LBL, ce n'est pas l'angle d'arrivée qui est calculé. Puisque les éléments acoustiques sont séparés d'une grande distance, il est possible que l'appareil à localiser soit entre les éléments acoustiques. Les systèmes LBL n'estiment donc pas l'angle d'arrivée du signal. Ils utilisent plutôt au moins trois évaluations de distance entre la cible et autant d'éléments acoustiques dont la position est connue. Les distances sont évaluées à l'aide du temps de voyage de la pulsation ou du signal acoustique comme pour les systèmes USLB et SBL. Une fois les distances connues, un positionnement est obtenu par trilatération.

2.3 Principe de base de la trilatération

La trilatération est une méthode de localisation qui utilise trois points dont l'emplacement est connu et leur distance respective avec un point à localiser. Pour une valeur de distance autour d'un point de référence on obtient une infinité de solutions formant une sphère. Son rayon est la distance entre le point de référence et le point à localiser. L'intersection de cette sphère avec une deuxième sphère qui est en contact donne une solution en forme de cercle. L'ajout d'une troisième sphère en contact avec les deux premières donne seulement deux solutions possibles. La Figure 2.2 présente un exemple de l'intersection de deux et trois sphères. Dans le cas du scénario à trois sphères, puisqu'un sous-marin demeure entre le plan formé par les balises à la surface de l'eau et le fond marin, il est généralement possible d'éliminer une des deux solutions, puisqu'elle est impossible. Une seule intersection demeure. C'est la position du point à localiser.

2.4 Intégration de données provenant de plusieurs capteurs

Bien que dans le présent travail, seul le système de positionnement ultrasonique est traité, l'objectif à plus long terme est d'utiliser le présent système conjointement avec les autres équi-

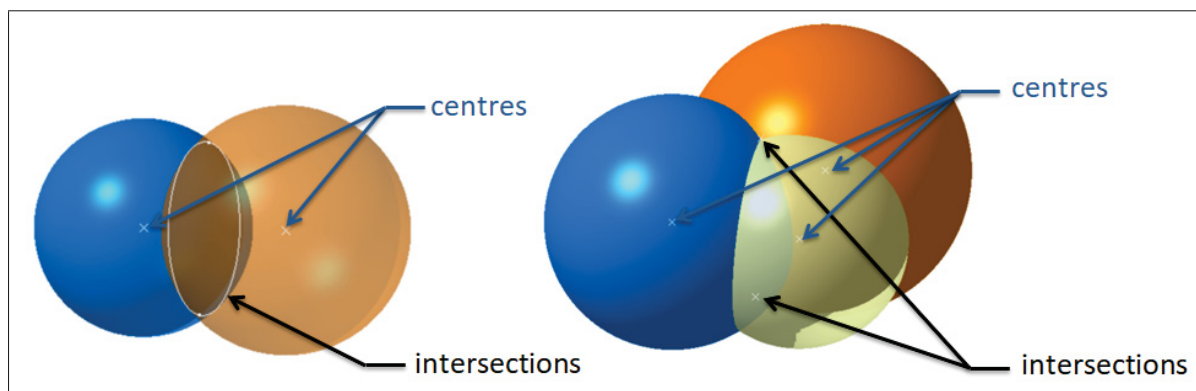


Figure 2.2 Zones d'intersection de deux sphères et de trois sphères

pements embarqués du sous-marin MASKI+. L'utilisation de données provenant d'autres types d'équipements permet d'améliorer grandement la qualité du positionnement (X. Wang et al., 2015). Cependant, la prédiction des performances de l'intégration de données provenant de différents appareils est parfois difficile à quantifier. Un outil permettant de prédire la performance de tels systèmes est présenté dans (Bingham, 2009). De plus, l'auteur donne de bonnes lignes de conduite pour l'utilisation d'un système LBL avec un DVL.

2.5 Sources d'erreurs possibles

Lorsqu'il est question de positionnement acoustique, certaines sources d'erreur sont inévitables et peuvent parfois rendre totalement inopérable un système de positionnement tellement ils influencent les résultats. Dans cette section sont présentées les principales sources d'erreurs susceptibles d'affecter les performances d'un système de positionnement acoustique lorsqu'elles ne sont pas mises en échec.

2.5.1 Rapport signal sur bruit

Une détérioration de la qualité des données peut en partie provenir de la présence importante de bruit dans l'environnement inspecté. Le rapport signal sur bruit (SNR), est un indice de la qualité du signal qu'il sera possible de capter. Plus la valeur est élevée, plus il sera facile de

distinguer le signal du bruit de fond. De nombreuses méthodes ont déjà été développées pour améliorer le ratio signal sur bruit.. Neuf de ces méthodes sont présentées et évaluées par (Moreaud, Courmontagne, Chaillan, & Mesquida, 2016). Bien que les auteurs mentionnent qu'il n'y a pas de méthode qui surpasse toutes les autres dans n'importe quelle circonstance, ils mentionnent que la méthode «Noncausal a Priori SNR Estimator» (NPSE) qui est basée sur les travaux de (Cohen, 2004) est en général plus performante que d'autres. Cette méthode présente un bon compromis en termes de temps de traitement par rapport à la performance dans des cas où il n'y a pas d'écoute par un humain requis comme le système de positionnement ultrasonique du présent travail. Tel que ce système de positionnement est conçu, il n'est pas possible de traiter le signal capté avant son interprétation par le logiciel du fabricant. Comme il sera présenté plus loin, ce dernier comporte cependant un contrôle du seuil minimum de puissance du signal traité. Cela représente une technique simple pour améliorer le SNR. Cependant, cette technique ne s'applique pas lorsque la puissance du bruit est trop élevée.

2.5.2 Vitesse du son dans l'eau

Un facteur commun à tous les systèmes acoustiques utilisés pour évaluer la distance est l'erreur associée à la variation de la vitesse du son dans l'eau. En effet, certains systèmes estiment que la vitesse du son est constante dans toute la zone de la mission. La vitesse du son dans l'eau est influencée par la variation de la pression, la température et le niveau de salinité. Il est acceptable de considérer que la vitesse du son est constante si l'ensemble de ces paramètres varie peu lors de la mission. Plus les distances entre les éléments acoustiques sont grandes, plus la zone de la mission a une grande plage de profondeur et plus la mission s'étend sur une longue période avec des conditions météorologiques changeantes, plus la vitesse du son présentera des variations importantes. Au contraire, une petite distance entre les éléments acoustiques avec une petite variation de profondeur pour une mission de courte durée donnera une vitesse du son plus stable.

La vitesse du son dans l'eau est un sujet de recherche toujours actif à travers le monde. En effet, il est très complexe de définir cette caractéristique lors du positionnement d'un véhicule

sous-marin. Le comportement de la vitesse du son dans l'eau est certes assez bien compris, mais c'est plutôt d'autres facteurs présents dans les grandes étendues d'eau qui sont difficiles à prédire précisément et cet aspect rend l'estimation de la vitesse du son dans l'eau très difficile. En effet, les courants, les marées et les vagues internes ne sont que quelques exemples de phénomènes qui font varier les paramètres influençant la vitesse du son dans l'eau.

2.5.2.1 Formules théoriques

Les paramètres influençant la vitesse du son dans l'eau sont principalement la température, la pression et la salinité de l'eau. Plusieurs formules sont utilisées pour calculer la vitesse du son dans l'eau en fonction de ces paramètres. (Mackenzie, 1981) et (Coppens, 1981) proposent chacun des formules simples.

Mackenzie propose la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 c(D, S, T) = & 1448,96 + 4,591T - 5,304T^2 \times 10^{-2} + 2,374T^3 \times 10^{-4} \\
 & + 1,340(S - 35) + 1,630D \times 10^{-2} + 1,675D^2 \times 10^{-7} \\
 & - 1,025T(S - 35) \times 10^{-2} - 7,139D^3T \times 10^{-13}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Où :

- D est la profondeur (m);
- S est la salinité en parties par millier (‰);
- T est la température (°C).

Cette formule n'est cependant valable que pour des valeurs de profondeur allant de 0 m à 8000 m, de salinité allant de 25 ‰ à 40 ‰ et de température allant de 2 °C à 30 °C.

Coppens propose plutôt les formules suivantes :

$$c(D, S, t) = c(0, S, t) + (16,23 + 0,253t)D + (0,213 - 0,1t)D^2 + [0,016 + 0,0002(S - 35)](S - 35)D \cdot t \quad (2.2)$$

et

$$c(0, S, t) = 1449,05 + 45,7t - 5,21t^2 + 0,23t^3 + (1,333 - 0,126t + 0,009t^2)(S - 35) \quad (2.3)$$

Où :

- D est la profondeur (km);
- S est la salinité (‰);
- t est la température (°C) divisée par 10.

Cette formule n'est cependant valable que pour des valeurs de profondeur allant de 0 km à 4 km, de salinité allant de 0 ‰ à 35 ‰ et de température allant de 0 °C à 35 °C. Les résultats des formules de Mackenzie et Coppens sont très semblables comme il sera montré plus tard. Le choix entre ces deux formules est principalement guidé par leur plage de validité.

Il existe des formules plus complexes qui prennent en compte plus de variables et qui font moins de simplifications. L'une d'elles est proposée par (Chen & Millero, 1977). Les auteurs y proposent un algorithme plus complexe pour trouver la vitesse du son dans l'eau. Cet algorithme utilise de nombreux coefficients. Pour alléger la présentation, ils sont présentés à l'ANNEXE I.

Chen & Millero proposent donc les formules suivantes :

$$c(S, T, P) = Cw(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{3/2} + D(T, P)S^2 \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} Cw(T, P) = & (C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5) + \\ & (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4)P + \\ & (C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4)P^2 + \\ & (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3 \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} A(T, P) = & (A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4) + \\ & (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4)P + \\ & (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3)P^2 + \\ & (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$B(T, P) = B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P \quad (2.7)$$

$$D(T, P) = D_{00} + D_{10}P \quad (2.8)$$

Où :

- S est la salinité (‰);
- T est la température (°C);
- P est la pression (bar).

Cette formule est valide pour des valeurs de température variant entre 0 et 40 °C, de salinité variant entre 0 ‰ et 40 ‰ et de pression variant entre 0 bar et 1000 bar.

En effet, contrairement aux deux formules précédentes, Chen et Millero utilisent une valeur de pression au lieu de la profondeur. Cet aspect permet d'utiliser une valeur plus exacte, puisqu'il est possible d'utiliser une valeur plus précise de la gravité terrestre en fonction de la latitude et d'introduire la valeur de la pression atmosphérique dans le calcul de la pression sous l'eau.

D'autres formules complexes comme celle de (Del Grosso, 1974) sont également utilisées par plusieurs chercheurs. Cependant, la plage de validité de la formule de Del Grosso est moins grande que celle de (Chen & Millero, 1977).

2.5.2.2 Influence des paramètres principaux

Les résultats des trois formules présentées permettent de visualiser l'influence des trois paramètres (température, salinité et profondeur/pression) sur la vitesse du son dans l'eau. Dans les trois cas, l'évolution de la vitesse du son est proportionnelle à l'évolution du paramètre. Les Figures 2.3, 2.4 et 2.5 présentent ces relations calculées avec la formule de Mackenzie, de Coppens et de Chen et Millero. Les intervalles utilisés sont les intervalles de validité de la formule la plus restreignante. Les résultats présentés sont donc tous à l'intérieur de la plage de validité des trois formules.

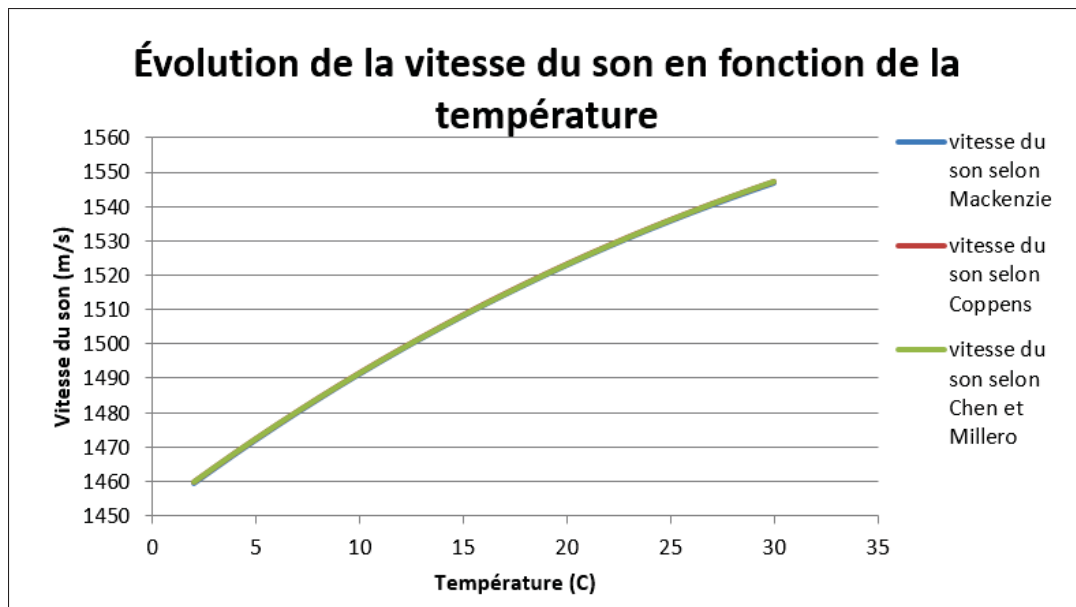


Figure 2.3 Évolution de la vitesse du son en fonction de la température (profondeur de 100 m, salinité de 35 ‰)

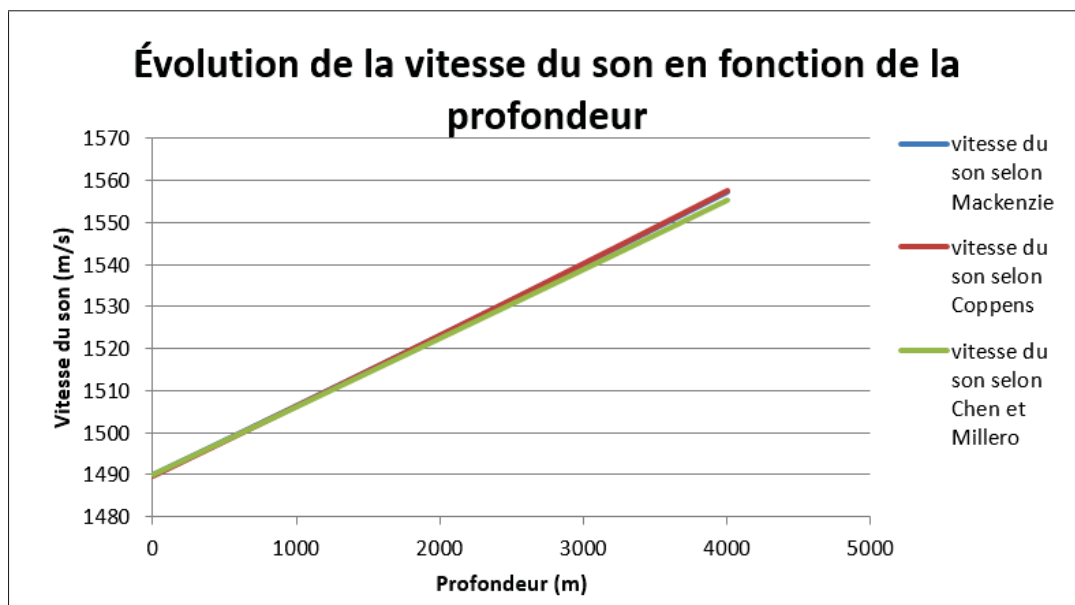


Figure 2.4 Évolution de la vitesse du son en fonction de la profondeur
(température de 10 °C, salinité de 35 ‰)

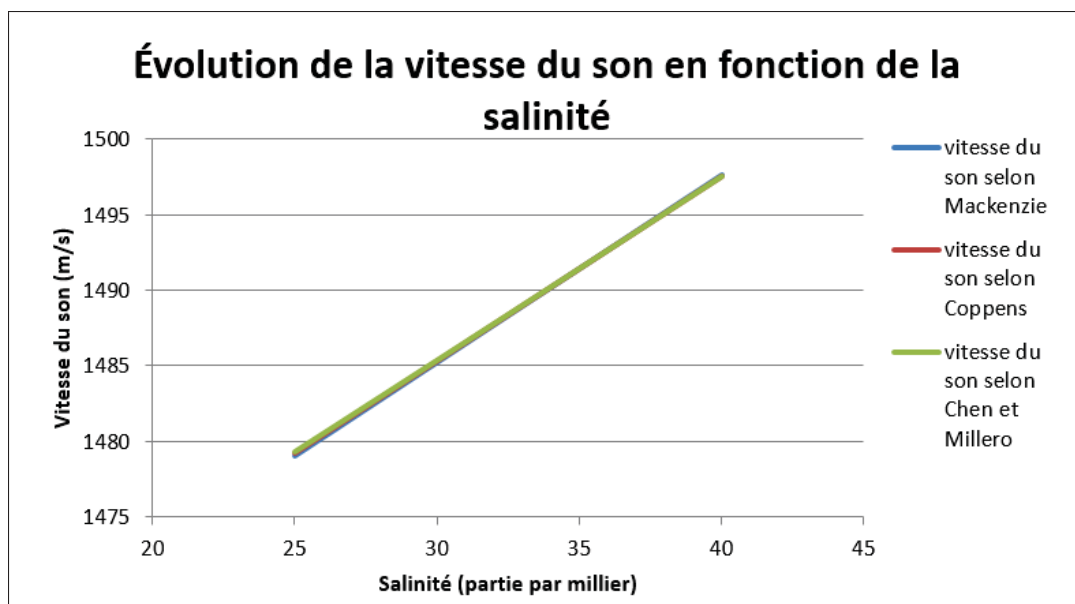


Figure 2.5 Évolution de la vitesse du son en fonction de la salinité
(température de 10 °C, profondeur de 100 m)

Pour les trois figures présentées, une simple conversion de la profondeur à la pression est utilisée pour le calcul des valeurs de Chen et Millero. Voici la formule utilisée pour la conversion :

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.9)$$

Où :

- ρ est la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3);
- g est l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$);
- h est la profondeur (m).

L'Équation (2.9) retire, par ces valeurs approximatives et autres simplifications, certains des avantages de la formule de Chen et Millero. Cela explique le peu de différences que l'on retrouve entre les résultats des formules simples et la formule de Chen et Millero. L'utilisation des valeurs d'un capteur de pression installé sur le sous-marin permet d'obtenir une estimation en temps réel de la vitesse du son autour de celui-ci en plus d'être une méthode efficace pour déduire la profondeur.

2.5.2.3 Profil de vitesse

Bien que la température, la pression et la salinité influencent la vitesse du son dans le même sens, ces paramètres n'évoluent pas eux-mêmes nécessairement dans le même sens. Par exemple, la température a tendance à diminuer lorsque la profondeur augmente. Des masses d'eau de différentes densités ont tendance à séparer les étendues d'eau en plusieurs couches. L'eau dense se retrouve au fond, alors que l'eau de faible densité se retrouve près de la surface. La densité de l'eau est la plus élevée à 4°C . Aussi, plus il y a de sel dissous dans l'eau, plus la densité de cette dernière augmente. L'eau ayant une salinité élevée se retrouve donc généralement à de plus grandes profondeurs. Un exemple de l'évolution de la vitesse du son dans l'eau est présenté à la Figure 2.6. Cette dernière présente les profils de vitesses (m/s sur les axes horizontales) médianes en fonction de la profondeur (m sur les axes verticales) selon le mois de

l'année. Les valeurs ont été recueillies pendant plusieurs années dans le bassin de Bedford. Les plages d'années sont indiquées entre parenthèses au-dessus de chaque graphique.

La forme particulière des courbes est expliquée principalement par les variations de température et de pression. C'est le soleil qui est en grande partie responsable de la différence de vitesse du son entre la surface jusqu'à 60 m de profondeur pour les mois de l'été. En effet, le soleil influence la température de l'eau seulement pendant les premiers mètres.

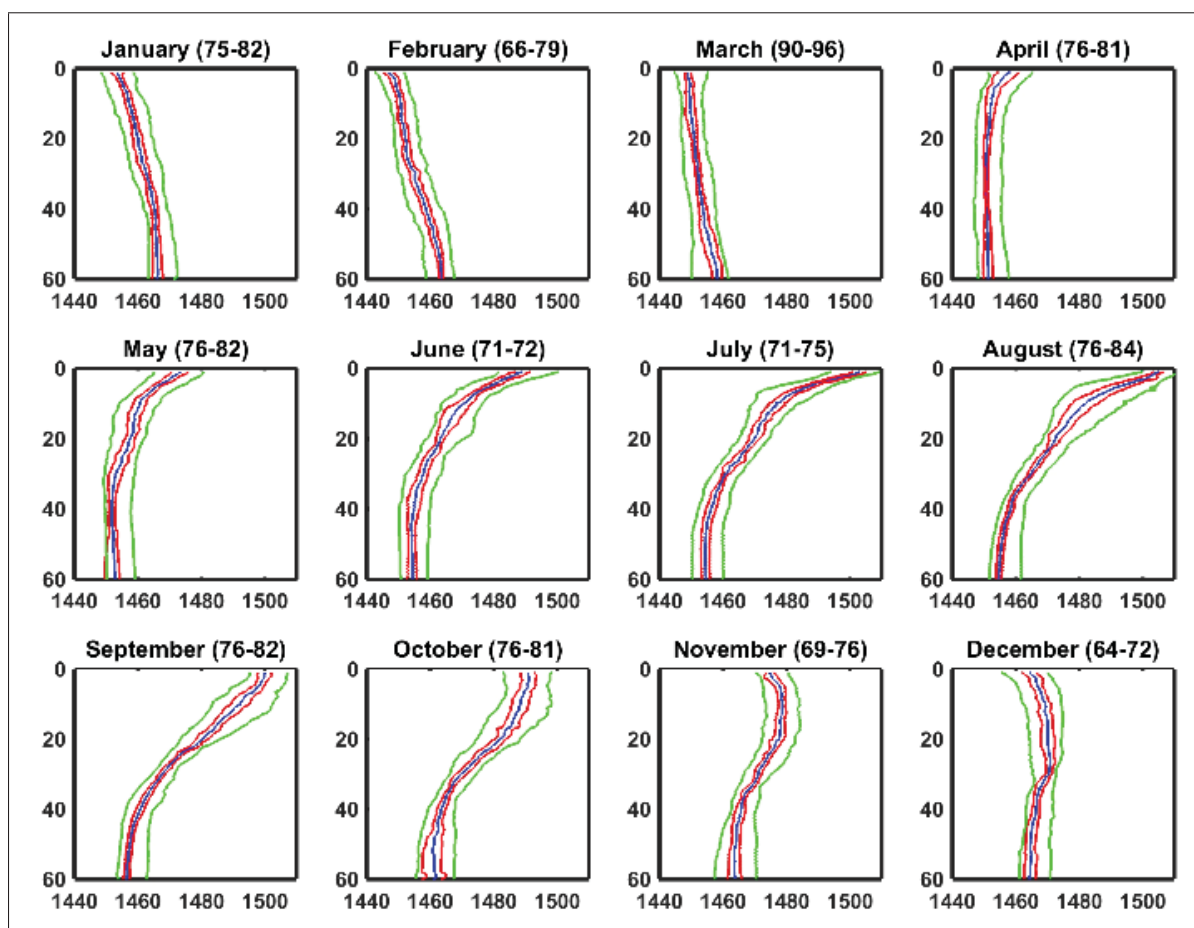


Figure 2.6 Exemple de variation de vitesse du son
Tirée de Blouin (2015, p.9)

Les profils de vitesse sont uniques à chaque endroit et changent de forme à l'intérieur d'une seule journée. Pour obtenir les meilleures performances possibles, plusieurs chercheurs proposent des méthodes pour prédire le comportement des ondes sonores en fonction des profils de vitesse. (Ramezani & Leus, 2012) présentent bien les différents comportements du son dans l'eau en fonction du profil de vitesse. De plus, ils présentent une nouvelle technique performante pour évaluer la distance entre un émetteur et un récepteur lorsque la profondeur est connue. Dans un cas où le profil de vitesse n'est pas connu, il est possible d'utiliser une approximation du profil de vitesse conjointement à un gradient de vitesse pour localiser une cible statique (Yang, Lu, Li, Han, & Zheng, 2011). (Casalino, Turetta, Simetti, & Caiti, 2010) présentent un exemple de technique de positionnement prenant en compte la propagation non linéaire des ondes dans l'eau.

Cependant, les effets de la propagation non linéaire sont proportionnels à la distance que l'onde doit parcourir. Il est donc acceptable de compenser les erreurs d'évaluation de distance causées par la propagation non linéaire de l'onde acoustique, mais seulement lorsque la zone de travail est de quelques km ou plus.

2.5.2.4 Eau douce

Bien que l'eau douce que l'on retrouve dans les lacs et rivières ne soit pas salée, il ne faut pas la considérer comme de l'eau pure. C'est du moins ce que (Chen & Millero, 1977) proposent. De plus, étant donné les profondeurs qu'il est possible de retrouver dans les lacs et les différents cours d'eau du Québec, il est acceptable d'utiliser les formules simples présentées précédemment. La formule la plus adaptée à cause de sa plage de validité est celle de Coppens. Cette dernière permet d'obtenir des valeurs pour un niveau de salinité de 0 ‰ à 35 ‰, d'une profondeur de 0 km à 4 km et d'une température de 0 °C à 40 °C. Cet intervalle de validité englobe bien l'ensemble des situations que l'on retrouve au Québec.

2.5.2.5 Réfraction

Une seconde source d'erreur, causée par la variation de la vitesse du son dans l'eau, est commune à tous les systèmes acoustiques. L'erreur survient si l'on considère que les chemins de propagation sonore sont en ligne droite entre la source et le récepteur. En effet, la réfraction des signaux acoustiques est très importante dans l'eau. Les chemins de propagations sont déviés en fonction de l'évolution du profil de vitesse du son dans l'eau. La distance déduite par le temps de voyage est donc affectée. La distance réelle est plus courte que la distance déduite, puisque la ligne droite est le chemin le plus court entre deux points. L'estimation de l'angle d'arrivée du signal est également modifiée, puisque le signal ne voyage pas en ligne droite entre le véhicule et les éléments acoustiques. Malgré le fait que certains systèmes la négligent, la variation de la vitesse dans l'eau et ses effets sur les chemins de propagation peut être considérée dans les calculs d'évaluation de la distance et autres calculs effectués par les algorithmes de traitement des systèmes acoustiques.

L'un des paramètres influençant les performances des systèmes USBL est la position de la cible par rapport au système. En effet, en général, plus la cible se rapproche des côtés du capteur, plus les résultats sont incertains. Pour les systèmes SBL, plus la distance entre les éléments acoustiques est grande, plus les valeurs sont précises. Les limites physiques de ce paramètre sont en général la taille de l'embarcation sur laquelle est déployé le système. Dans le cas des systèmes LBL, la fréquence utilisée affecte non seulement la portée du système, mais aussi sa précision. Le Tableau 2.3 montre l'influence de la bande de fréquence choisie sur la précision d'un système ultrasonique.

On remarque, lors de la sélection d'un système, qu'il faut choisir la fréquence utilisée en fonction des besoins de la mission à effectuer, puisque la portée évolue inversement à la précision.

Tableau 2.3 Précision des LBL en fonction de la fréquence
Tiré de Vickery (1998, p.12)

	Bande de fréquence (kHz)	Précision statique relative typique (m)
Basse fréquence (BF)	8 à 16	2 à 5
Moyenne fréquence (MF)	18 à 36	1.25 à 1
Haute fréquence (HF)	30 à 60	0.15 à 0.25
Très haute fréquence (THF)	50 à 110	< 0.05
Très très haute fréquence (TTHF)	200 à 300	< 0.01

2.5.3 Positionnement des éléments acoustiques

En général, l'objectif à considérer lorsque vient le temps de positionner les éléments acoustiques est de couvrir la plus large zone possible, afin d'obtenir une grande zone de travail pour le sous-marin. Cependant, il faut prendre en considération certains aspects avant de simplement augmenter la distance entre les éléments acoustiques vers la limite de la portée du système.

2.5.3.1 Vitesse du son dans l'eau

Comme mentionnée plus haut, l'erreur relative à la vitesse du son dans l'eau est en partie responsable de l'imprécision des positions obtenues lors de la résolution des équations de trilatération. Puisque les distances entre les éléments acoustiques sont calculées en multipliant le temps entre l'émission et la réception du signal acoustique par la vitesse du son dans l'eau, les effets de l'erreur sur la mesure de la vitesse du son dans l'eau sont proportionnels à la distance entre les éléments acoustiques.

2.5.3.2 Zones mortes

Afin d'obtenir une position acceptable, il est important qu'il y ait le moins d'obstacles possible entre la source d'émission et le capteur acoustique. La présence d'obstacles génère des zones mortes. C'est à dire, une zone où l'onde acoustique ne se propage pas ou s'y propage par des réflexions indésirables. Dans le premier cas, le manque de données pourrait rendre la

résolution des équations de positionnement impossible. Dans le deuxième cas, la résolution serait possible, mais les résultats seraient erronés. Le deuxième cas, plus difficile à détecter, est potentiellement dangereux dans certaines situations.

Des algorithmes ont été développés pour guider le choix du positionnement des balises afin de maximiser les performances (Génévé, Kermorgant, & Laroche, 2017) (Balac, Prevostini, & Malek, 2015).

Même si l'émetteur et le récepteur sont en ligne de vue l'un par rapport à l'autre, il est possible que la communication échoue. Comme il a déjà été mentionné, le son ne voyage pas toujours en ligne droite. S'il y a des variations dans le profil de vitesse, le son suivra un chemin courbe. En général, cette courbure sera soit vers le haut ou vers le bas, puisque la vitesse du son varie généralement selon l'axe vertical. Si, par exemple, le son courbe vers le haut, les deux éléments acoustiques sont proches du fond marin, et la distance est assez grande, les chemins de propagations qui ne sont pas absorbés par le fond marin pourraient ne pas être captés par l'élément acoustique récepteur. La Figure 2.7 présente un exemple schématisé du phénomène.

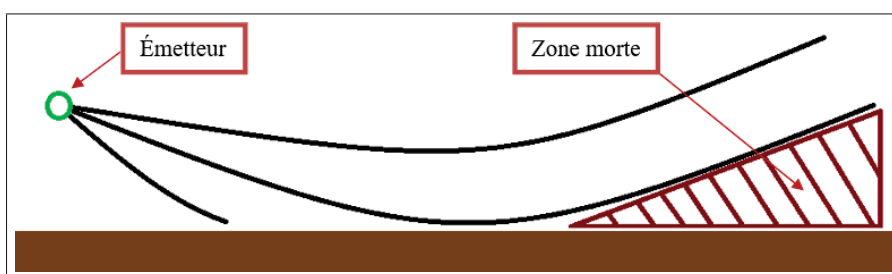


Figure 2.7 Zone morte causée par la courbure du chemin acoustique

Pour éviter la création de zone morte, il faut soit réduire la profondeur du récepteur pour qu'il sorte de la zone morte ou travailler plus proche des récepteurs. Pour couvrir la même zone, il faudra plus de récepteurs (Vickery, 1998). Il est possible d'obtenir un effet semblable lorsque les éléments acoustiques sont trop proches de la surface.

L'ensemble des aspects à considérer lors du positionnement des éléments acoustiques présentés ici suggère de limiter la distance entre ces derniers près de la zone de travail envisagée.

Cependant, comme précédemment mentionné, certaines configurations d'éléments acoustiques peuvent avoir une influence sur la précision de la résolution de la trilatération et même la rendre impossible.

2.5.3.3 Confondre un écho et le vrai signal

Cette source d'erreur est en fait une conséquence potentielle d'une zone morte et de la non-linéarité de la propagation de l'onde acoustique dans l'eau. En effet, lorsque deux éléments acoustiques ne sont pas en ligne de vue, le premier signal capté sera un écho. (Olson, Leonard, & Teller, 2006)

2.5.3.4 Déplacement des balises et mauvaise évaluation de leur position

Il n'y a pas que le choix de l'emplacement initial des éléments acoustiques qui est important. Bien qu'idéalement, les balises soient fixes, l'évaluation de leur position est également importante. Aussi, il est autant important que leur position tout au long de leur utilisation soit connue. Si l'évaluation de la position de départ, ou si une balise est déplacée pendant l'utilisation du système et que cette erreur ou ce déplacement est inconnu, il y aura des répercussions sur l'exactitude du positionnement. En effet, bien que l'évaluation de la distance demeure bonne, la position nominale de l'élément acoustique est utilisée dans le calcul de positionnement. Si l'élément acoustique s'est approché de l'élément à localiser, la solution du positionnement sera tirée vers l'élément déplacé et vice versa. Dans (Turetta, Casalino, Simetti, Sperindè, & Torelli, 2014), il est, entre autres, démontré que plus la distance entre les éléments acoustiques est grande, moins l'erreur de l'évaluation de la position de ces derniers aura une influence. Puisqu'en général, il est plus profitable de positionner les éléments acoustiques plus proches de la zone de travail, il est donc davantage important d'accorder une grande attention à l'exactitude du positionnement des éléments acoustiques. (Turetta et al., 2014)

CHAPITRE 3

SYSTÈME À L'ÉTUDE

3.1 Principe de fonctionnement

Le système utilisé est un produit fabriqué par Desert Star Systems inc. Cette compagnie offre le système de positionnement ultrasonique appelé SouthStar (Desert Star Systems, 2013). Il s'agit d'une évolution basée sur le système LBL.

Pour un système de positionnement LBL traditionnel, l'émetteur placé sur le véhicule mobile interroge les balises de référence et celles-ci répondent. Cela implique que les ondes acoustiques doivent voyager deux fois entre l'émetteur et chaque balise pour obtenir le temps entre l'émission et la réception qui permettront de calculer les distances.

Tel que schématisé à la Figure 3.1, le présent système élimine le deuxième voyage de l'onde et les erreurs qui pourraient y être associées.

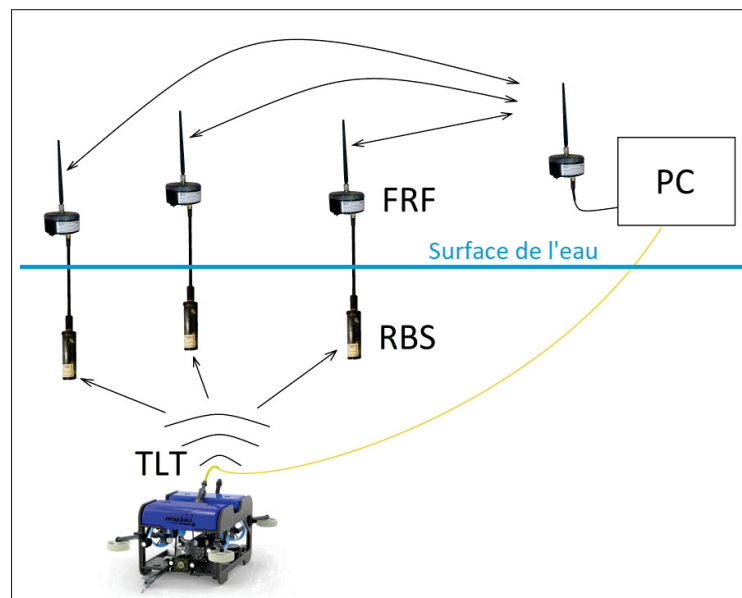


Figure 3.1 Schéma de communication du système SouthStar

En effet, dans le système SouthStar, l'onde envoyée par l'émetteur de la balise TLT est captée par chacune des balises RBS. Ces équipements sont présentés à la Figure 3.2.



Figure 3.2 Quatre balises RBS et une balise TLT

Les balises RBS sont reliées à une antenne GPS et à une antenne radio que l'on retrouve en dehors de l'eau dans le module de communication appelé module FRF. Cinq modules FRF sont présentés avec le chargeur à la Figure 3.3.

L'antenne GPS ne donne pas la position de la balise RBS, mais plutôt le moment précis auquel la balise RBS a reçu le signal émis par la balise TLT mobile. L'antenne radio, quant à elle, assure la communication entre les différentes balises et le module FRF des opérateurs qui est relié à un ordinateur de surface (FRF PC). L'ordinateur est responsable de calculer la position de la balise TLT en plus de gérer le fonctionnement général du système de positionnement.



Figure 3.3 Chargeur et cinq modules FRF

3.2 Matériel

Le système de positionnement comporte quatre balises RBS fixes, leur module FRF respectif, une balise TLT, dans ce cas placé sur le sous-marin, et le module d'opération FRF PC. Les modules FRF contiennent une antenne GPS pour assurer la précision des temps de réception et la synchronisation entre les différentes balises RBS. De plus, les modules FRF contiennent une batterie qui alimente ses propres fonctions en plus de celle des balises RBS, ainsi qu'une antenne pour permettre la communication des données par radiofréquence (RF) au poste d'opération.

Le système de positionnement SouthStar n'inclut pas de système de déploiement. En effet, seuls les capteurs acoustiques, l'équipement de communication par RF, ainsi que les logiciels SouthStar et DiveBase sont fournis par le fabricant du système. Un système de déploiement spécifiquement conçu pour l'utilisation du présent système de positionnement dans l'environnement décrit plus haut est présenté dans le Chapitre 4.

3.3 Interface logicielle

L'interface du logiciel d'opération SouthStar, présentée à la Figure 3.4, incorpore la totalité des fonctionnalités présentes pour l'utilisation du système, à l'exception du calcul de la position et de l'affichage graphique. Ces deux dernières fonctionnalités sont effectuées à l'aide du logiciel DiveBase dont l'interface est présentée à la Figure 3.5. Les valeurs de distances et de profondeur sont transmises du logiciel SouthStar à DiveBase à l'aide de ports séries virtuels. DiveBase n'ayant pas été conçu pour être utilisé uniquement pour cette tâche, la plupart de ses fonctionnalités sont bloquées.

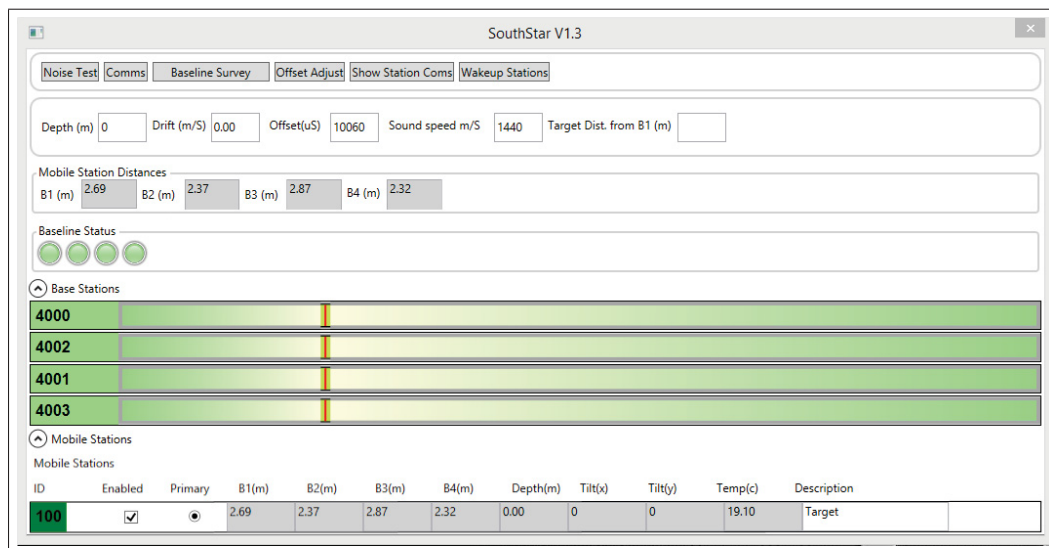


Figure 3.4 Interface du logiciel SouthStar
Tirée de SouthStar Operation Guide (p.2)

Le logiciel SouthStar permet entre autres :

- d'ajuster les seuils minimums de détection pour éviter de confondre un bruit avec une pulsation de l'émetteur ;
- de gérer les ports de communication avec le module FRF PC et avec DiveBase ;
- de détecter automatiquement les positions des balises RBS ;
- d'ajuster la valeur de compensation des délais associés à l'électronique ;
- d'inscrire manuellement la valeur de la vitesse du son dans l'eau utilisée pour les calculs.

Pour la présente application, plusieurs fonctionnalités de DiveBase ne sont pas utilisées, puisque SouthStar les remplace. Cependant, DiveBase est indispensable pour ce qui est de :

- choisir le nombre de balises RBS à utiliser pour le calcul du positionnement (2, 3 ou 4) ;
- l'utilisation ou non de la valeur de profondeur dans les calculs ;
- la représentation graphique de la position.

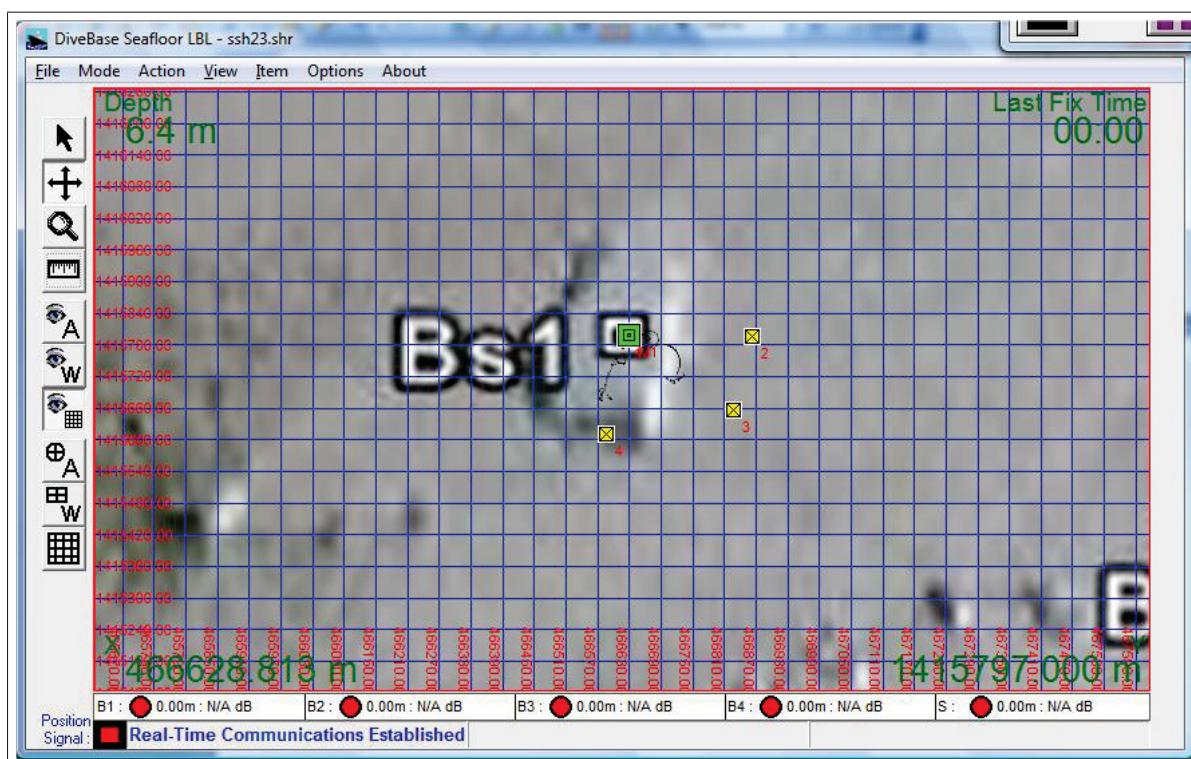


Figure 3.5 Interface du logiciel DiveBase
Tirée de Desert Star Systems (2013, p.12)

DiveBase est un outil fonctionnel. Cependant, plusieurs opportunités d'amélioration sont présentes. Pour commencer, le changement du nombre de balises RBS à utiliser pour le calcul de positionnement ne se fait pas automatiquement. Si, par exemple, seulement deux balises RBS sont capables de donner une valeur de distance, il n'y aura pas de solution de positionnement lorsque le logiciel n'est pas en mode deux balises RBS. Ensuite, il n'est pas possible d'utiliser les données provenant de capteurs externes autres que la profondeur provenant de la balise TLT. Cela limite donc les performances du système.

CHAPITRE 4

SYSTÈME DE DÉPLOIEMENT

4.1 Contraintes considérées

Le système de déploiement est constitué de l'ensemble des équipements nécessaires pour la mise à l'eau et l'utilisation générale du système de positionnement. Les contraintes et fonctionnalités à considérer lors de la conception d'un système de déploiement utilisé au large sont fondamentalement différentes des contraintes à considérer pour un système de déploiement utilisé le long des murs verticaux d'une digue ou d'un barrage.

4.1.1 Environnement

Pour commencer, au large, il n'y a pas de mur ou de surface autre que le fond pour stabiliser les éléments acoustiques du système de positionnement. Ensuite, bien que ce ne soit pas nécessairement une solution simple et applicable en toute circonstance, l'alimentation électrique des éléments acoustiques peut se faire à l'aide de câbles dans une application proche d'un barrage. Aussi, près des barrages, il y a des courants turbulents qui se dirigent vers les prises d'eau par lesquels l'eau s'écoule vers l'aval du barrage. Ces courants sont dangereux et présentent des risques même pour un ROV.

4.1.2 Système de déploiement

L'objectif est de permettre un déploiement du système de positionnement le plus simplement et rapidement possible, puisque la durée de l'interruption des turbines des barrages représente des pertes de revenus. De plus, une fois déployé, il faut que le système soit stable et performant. Il faut donc tenir compte des différentes étapes d'un déploiement lors de la conception du système de déploiement. Tout commence par le transport du système. Pour faciliter ce dernier, la taille du système doit être minimale ou doit pouvoir se réduire lors du transport. Les modifications

apportées pour le transport doivent cependant être rapidement réversibles pour ne pas nuire au temps d'installation du système.

Puisque l'équipe d'inspection est constituée de quelques personnes et que l'accès à des grues ou à d'autres équipements de levage est parfois difficile en région éloignée, cela implique que le poids du système doit être suffisamment faible pour qu'une ou deux personnes soient en mesure de le déployer. Il faut également écarter toutes les solutions pouvant introduire des agents polluants dans l'environnement, comme le plomb. De plus, il est préférable d'éviter des solutions demandant des modifications permanentes aux infrastructures déjà en place comme couler du béton et percer des trous pour des ancrages.

Pour finir, le fabricant du système de positionnement, Desert Star Systems, recommande de placer les balises RBS à au moins 2 m de la surface, du fond ou des murs.

4.2 Concept retenu

En considérant les contraintes de la présente problématique, le concept suivant a été retenu : un châssis roulant sur le mur permettant d'ajuster la profondeur du capteur dans l'eau tout en assurant une position stable. Le système est roulé jusqu'au bord du mur, puis descendu et ancré à l'aide de cordes. Les différentes versions sont présentées en commençant par la première à la Figure 4.1.

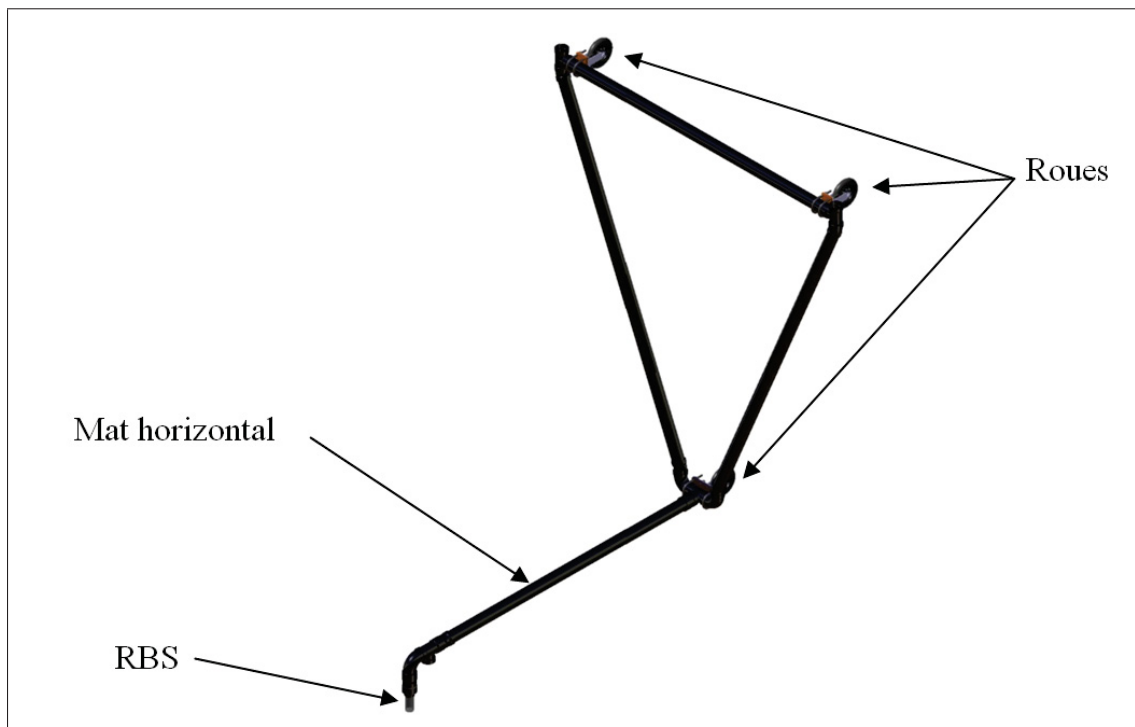


Figure 4.1 Système de déploiement V1

Voici les principales caractéristiques de la première version :

- très simple ;
- concept roulant sur le mur permettant d'ajuster la profondeur du capteur ;
- petites roues dures offrant peu d'adhérence ;
- certaines pièces sont faites sur mesure ;
- aucun ajustement de la distance du mur ;
- points de fixation n'offrant pas d'aide à l'adhérence au mur ;
- requier beaucoup d'ajustement du centre de gravité pour maintenir les trois roues en contact avec le mur ;
- ne permet pas le désassemblage autre que le mât horizontal ;
- les dimensions du triangle ne permettent pas à ce dernier d'entrer dans le camion de transport.

La Figure 4.2 présente visuellement l’évolution du concept de la deuxième à la sixième version.

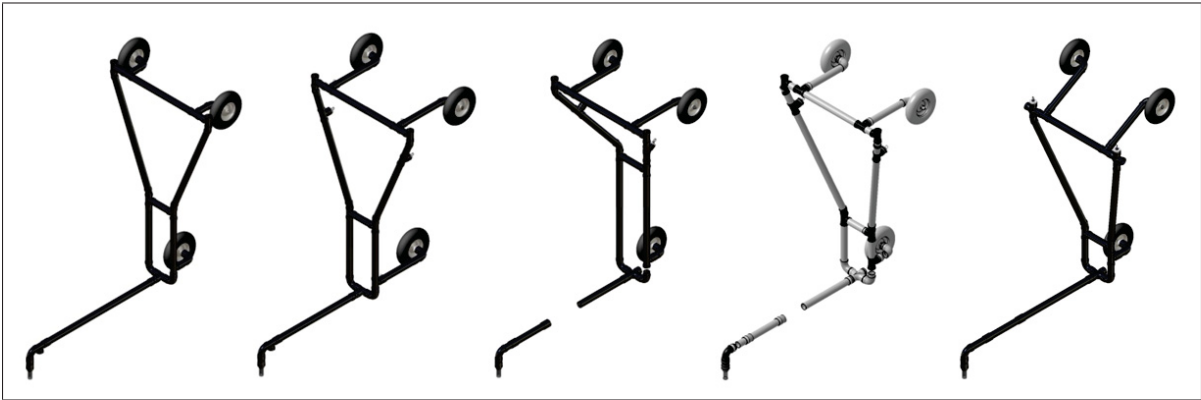


Figure 4.2 Système de déploiement V2 (à gauche) à V6 (à droite)

Les principales modifications d’une version à l’autre sont présentées au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Améliorations apportées au système de déploiement de la version V2 à V7

Version	Améliorations apportées
2	Les roues ont des pneus gonflés sur des jantes. Nouvelles formes de la structure verticale. Utilisation de pièces standards seulement.
3	Position des points d’ancrage favorisant l’adhésion et l’appui des trois roues. Possibilité de désassembler les roues et leurs bras.
4 et 5	Modification de la structure verticale pour permettre les bonnes configurations de longueur du mât horizontal.
6	Simplification de la structure verticale et repositionnement des ancrages.
7	Modification après fabrication de la V6 pour permettre l’utilisation au port (longueur des bras des roues et angle du mât horizontal par rapport au triangle) Voir à la Figure 4.3

L’utilisation des roues en caoutchouc gonflées pour augmenter l’adhérence au mur implique également que le centre de masse sera déplacé à cause de la poussée d’Archimède, lorsque la roue du bas est submergée.

Les longueurs des différentes configurations de mâts horizontaux sont basées sur les dimensions du MASKI+. En effet, bien que le fabricant du système de positionnement recommande

de placer les balises RBS à au moins 2 m des murs, de la surface et du fond, il est requis de réduire la distance par rapport aux murs et à la surface. Le sous-marin doit en effet inspecter les murs utilisés pour positionner les balises RBS, et cela jusqu'à la surface. De plus, pour inspecter un mur, le sous-marin doit être en contact avec ce dernier. L'objectif est de ne pas limiter les capacités du sous-marin et d'avoir un système de positionnement capable de fournir une position même si le nombre de balise RBS descend à deux (voir la Section 7.1.4.2). Pour cela, il faut que la distance de la surface soit la plus basse possible et que la distance du mur ne dépasse pas la moitié de la largeur du sous-marin (environ 0,5 m), puisque la balise TLT est fixée au dessus des flotteurs, à l'arrière, au centre de la largeur du sous-marin. Voici donc les caractéristiques principales de la version V7.

- entièrement fabriquée avec des éléments facilement remplaçables ;
- le mât horizontal, ainsi que les roues et leurs bras sont dévissables pour le transport ;
- les dimensions du triangle de la structure verticale lui permettent d'être transporté dans le camion de transport ;
- la masse totale incluant l'ensemble des mâts pour les tests est de 19 kg ;
- possibilité d'ajuster le centre de masse en fonction des configurations avec des poids ;
- la structure en tuyaux d'ABS offre un bon compromis poids/ rigidité ;
- l'ABS résiste à la moisissure et à la corrosion (chlore de la piscine) ;
- les pièces de métal sont en acier inoxydable lorsque possible ;
- les roues avec pneus en caoutchouc pour une plus grande adhésion à la surface ;
- les roues larges pour éviter de coincer dans les craques des murs ou entre les roches ;
- le mât horizontal modulaire permettant d'ajuster la distance du capteur par rapport au mur ;
- la position des points d'ancrage par rapport au mur et au centre de gravité permettant une plus grande adhérence au mur et une grande stabilité ;
- le coût en matériel est d'environ 400 dollars canadiens par cadres assemblés.

Une photo d'un des cadres installé pour les tests est présentée à la Figure 4.3.

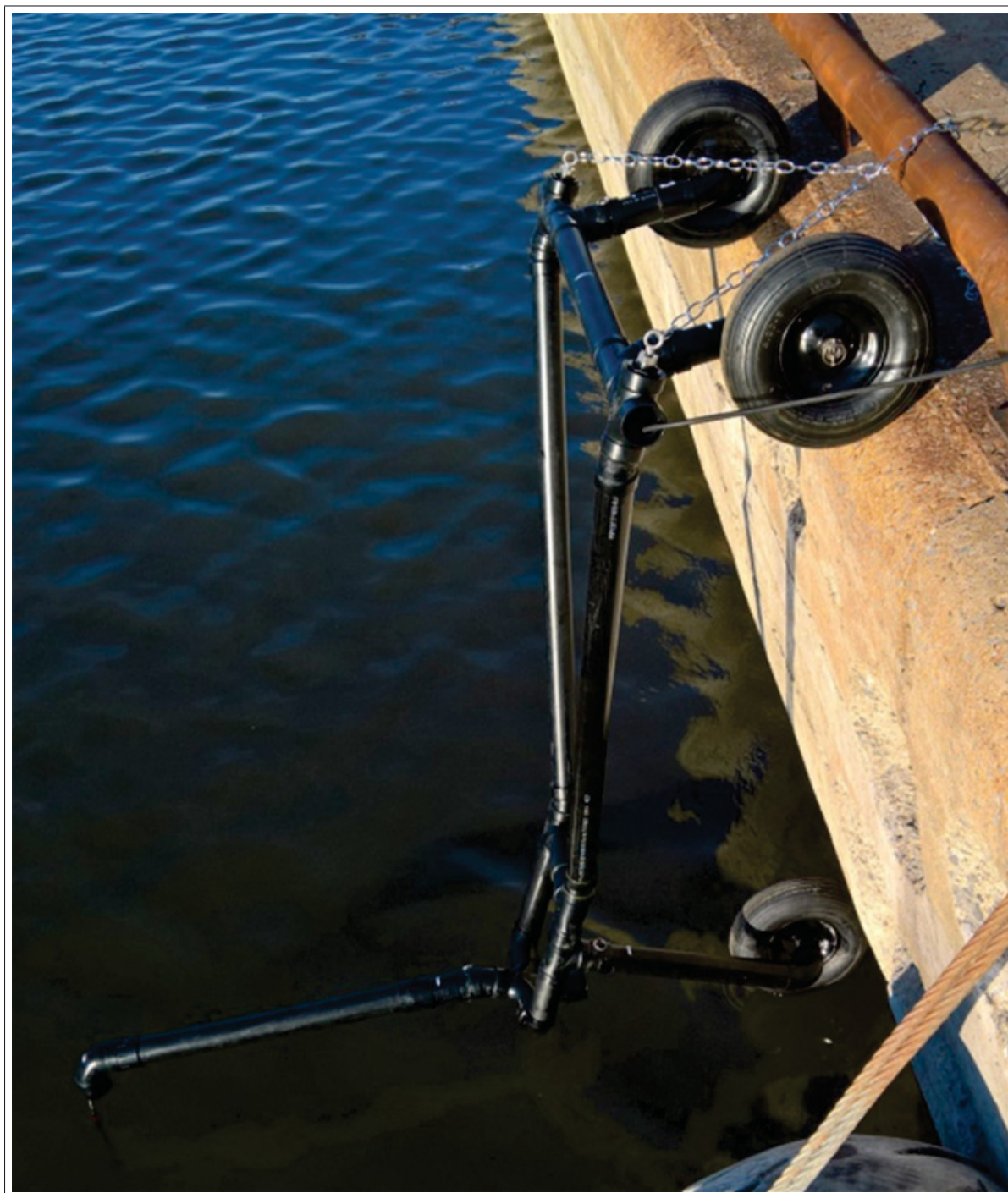


Figure 4.3 Système de déploiement V7

4.3 Autre concept

Voici un autre concept qui à été évalué : les balises RBS sont ancrées au fond et le module FRF est placée sur flotteurs. Bien que ce concept n'ait pas été retenu pour son utilisation dans le présent travail, il est possible qu'il soit nécessaire dans certains cas spécifiques, comme l'inspection de structures créant de grandes zones mortes pour le système de positionnement ultrasonique ou en endroit ne disposant pas de mur ou d'emplacement convenable pour le déploiement du châssis roulant. En effet, ce concept ne nécessite pas de support physique comme un mur.

Il serait potentiellement plus petit que le concept du châssis roulant. Cependant, cette technique nécessite l'utilisation d'une batterie pour l'alimentation et implique une autonomie limitée. Le déploiement est potentiellement complexe, car il faut avoir accès à un bateau pour placer les balises RBS dans des zones où les bateaux sont généralement interdits. Le sous-marin peut aussi être utilisé pour placer les balises RBS au fond. Dans les deux cas, la position des balises RBS sera approximative au mieux. Pour finir, puisque la balise RBS flotte, elle est à la merci du courant. L'emplacement de la balise RBS est donc susceptible de changer durant les inspections. Sauf s'il n'y a pas d'alternative, les balises RBS ancrées au fond sont moins avantageuses que le concept de châssis appuyé sur un mur.

CHAPITRE 5

MÉTHODOLOGIE DES TESTS

5.1 Évaluation des performances du système

Étant donné les particularités qu'implique l'utilisation du système de positionnement dans un contexte d'inspection d'installations immergées comme des barrages hydroélectriques ou des digues, il est nécessaire de valider ses performances. Cette évaluation s'effectue via des essais dans diverses mises en situation ici appelées cas de figure. Ces cas de figure représentent des utilisations typiques qu'il est possible de retrouver durant l'utilisation réelle du système. Ils permettront d'observer le comportement général face à certaines situations potentiellement problématiques en plus d'évaluer l'exactitude du positionnement selon les divers cas.

Avant de valider les performances durant les différents cas de figure, il est important de commencer par valider le fonctionnement du système dans son ensemble. Cette validation est réalisée en environnement contrôlé afin de réduire au minimum les intrants incontrôlés. L'IREQ est doté d'une piscine intérieure construite spécifiquement pour les tests d'équipements sous-marins. Son utilisation principale est de fournir un milieu stable et accessible en tout temps pour les différents tests du sous-marin MASKI+ et autres équipements sous-marins de l'IREQ.

La section suivante présentera donc la validation du fonctionnement du système par des tests en piscine. Par la suite, les tests en environnement réel seront présentés.

5.2 Test en piscine

L'objectif principal des tests en piscine est de valider le bon fonctionnement du système dans son ensemble dans un environnement contrôlé.

La piscine utilisée pour les tests est située à l'intérieur du Laboratoire d'Expérimentation (LE) de l'IREQ. Cette piscine, présentée à la Figure 5.1, est composée d'une cuve de 6 m de diamètres par 5 m de profondeur. Ses murs et son fond sont recouverts de tapis de caoutchouc d'un pouce d'épaisseur. Ces derniers sont présents pour réduire les échos des différents systèmes acoustiques du sous-marin.

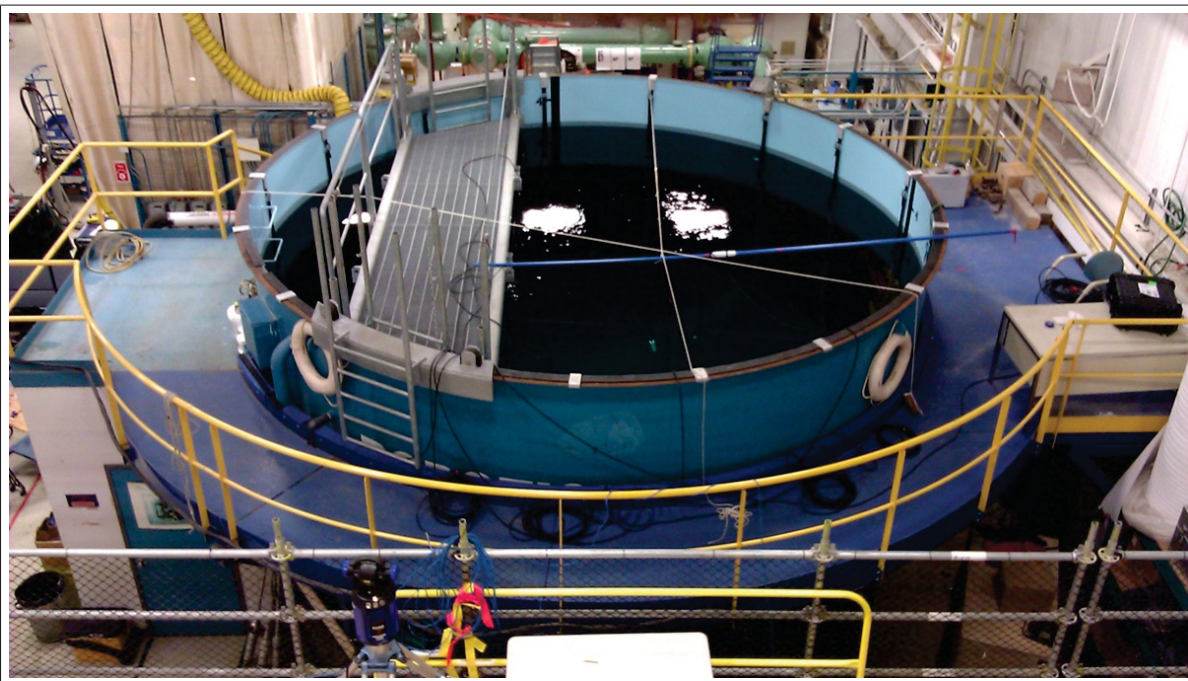


Figure 5.1 Piscine de tests du LE

5.2.1 Le démarrage du système

La première étape consiste à démarrer le système. Cette étape peut sembler triviale. Cependant, la complexité du système impose une certaine courbe d'apprentissage. Plusieurs sources de dysfonctionnements potentiels existent et sont difficiles à identifier. Une communication RF inexistante ou intermittente, des problèmes de synchronisation avec les satellites GPS, des valeurs de positions et de profondeurs incohérentes, ainsi que de nombreuses erreurs logicielles ne sont que quelques exemples de problèmes observés. À cela s'ajoute le fait qu'il est très difficile de diagnostiquer les sources des problèmes. Certains moyens de diagnostics sont cependant présents. Par exemple, une lumière rouge clignote si la batterie interne des modules FRF baisse en dessous d'un certain voltage. Malheureusement, comme il a été observé, ces modules arrêtent de communiquer avant que la lumière rouge ne clignote. Cela n'est qu'un petit exemple qui représente bien toute l'ampleur qu'implique la simple validation du fonctionnement du système de Desert Star Systems. De nombreux symptômes sont présents en même temps et leurs sources respectives sont difficilement identifiables.

5.2.2 Modification apportée au système

Puisque les batteries des modules FRF ne maintenaient pas leur charge sur une longue période, une alimentation externe par câbles a dû être ajoutée aux boîtiers de ces modules. Cela a contribué à complexifier l'utilisation du système lors des tests, surtout en environnement réel où les balises RBS sont grandement espacées.

5.2.3 Ce qu'il faut retenir des tests en piscine

Pour donner suite au démarrage du système, il a été possible d'observer des résultats acceptables témoignant du fonctionnement de base du système de positionnement. Cependant, ce dernier émet des pulsations trop puissantes pour la piscine. En effet, c'est seulement lorsqu'une très petite partie de la balise TLT est en contact avec l'eau que le système a été en mesure de fournir un positionnement qui n'était pas aberrant à première vue. Il n'est pas possible d'ajuster la puissance du pulse. Pour finir, les valeurs de profondeur fournies par le capteur de profondeur intégré à la balise TLT sont des valeurs erronées de plusieurs centaines de mètres. Cette erreur provient d'un problème logiciel puisque c'est toujours la balise TLT qui est en première position dans l'interface qui affiche de telles erreurs. Pour finir, l'ordre dans lequel les balises RBS sont placées dans l'interface affecte les résultats du calcul de position. En effet, il faut que les balises RBS soient inscrites dans l'ordre dans lequel elles sont rencontrées lorsqu'on tourne dans le sens antihoraire vu des airs. DiveBase en mode à trois balises fixes n'est pas fonctionnel. Même si trois balises RBS sont utilisées, il faut utiliser le mode à quatre balises RBS.

5.3 Tests en environnement réel

Cette section est divisée en trois parties. La première partie décrit les équipements spécifiquement conçus et utilisés pour la réalisation des présents tests. Bien que ces tests se veulent représentatifs de l'utilisation réelle du système, certains éléments ne sont pas nécessairement les mêmes qui seraient utilisés lors de l'inspection d'un barrage. La deuxième partie présente l'emplacement choisi pour la réalisation des tests. Enfin, la troisième partie décrira les différents cas de figure qui seront présentés.

5.3.1 Équipements spécifiques aux tests

Les tests en environnement réel permettent d'observer les performances du système dans des conditions représentatives de l'utilisation finale de ce dernier. Cependant, pour des raisons logistiques, le sous-marin n'est pas utilisé pour ces tests. La balise TLT normalement installée sur le sous-marin est plutôt installée sur une bouée et reliée à un module FRF. Cette dernière est alimentée en électricité par une batterie externe. La bouée est entraînée par plusieurs cordes le long des trajectoires prévues selon le cas de figure.

L'utilisation d'une bouée permet du même coup de valider la position réelle de la balise TLT, puisque la profondeur du capteur demeurera fixe et qu'il y a en permanence un repère visuel à la surface.

La Figure 5.2 présente la bouée utilisée lors des tests. La partie immergée de cette dernière est constituée de plusieurs sections qui permettent de modifier la profondeur de la balise TLT. La rotation de la croix des flotteurs est libre. Cela permet à la partie immergée de demeurer verticale malgré les vagues de surface. Des ancrages sont fixés aux extrémités de la croix des flotteurs. Cela permet de manœuvrer la bouée avec le plus de stabilité possible.

Les autres modules FRF qui sont reliés aux balises RBS sont alimentés par une alimentation externe.

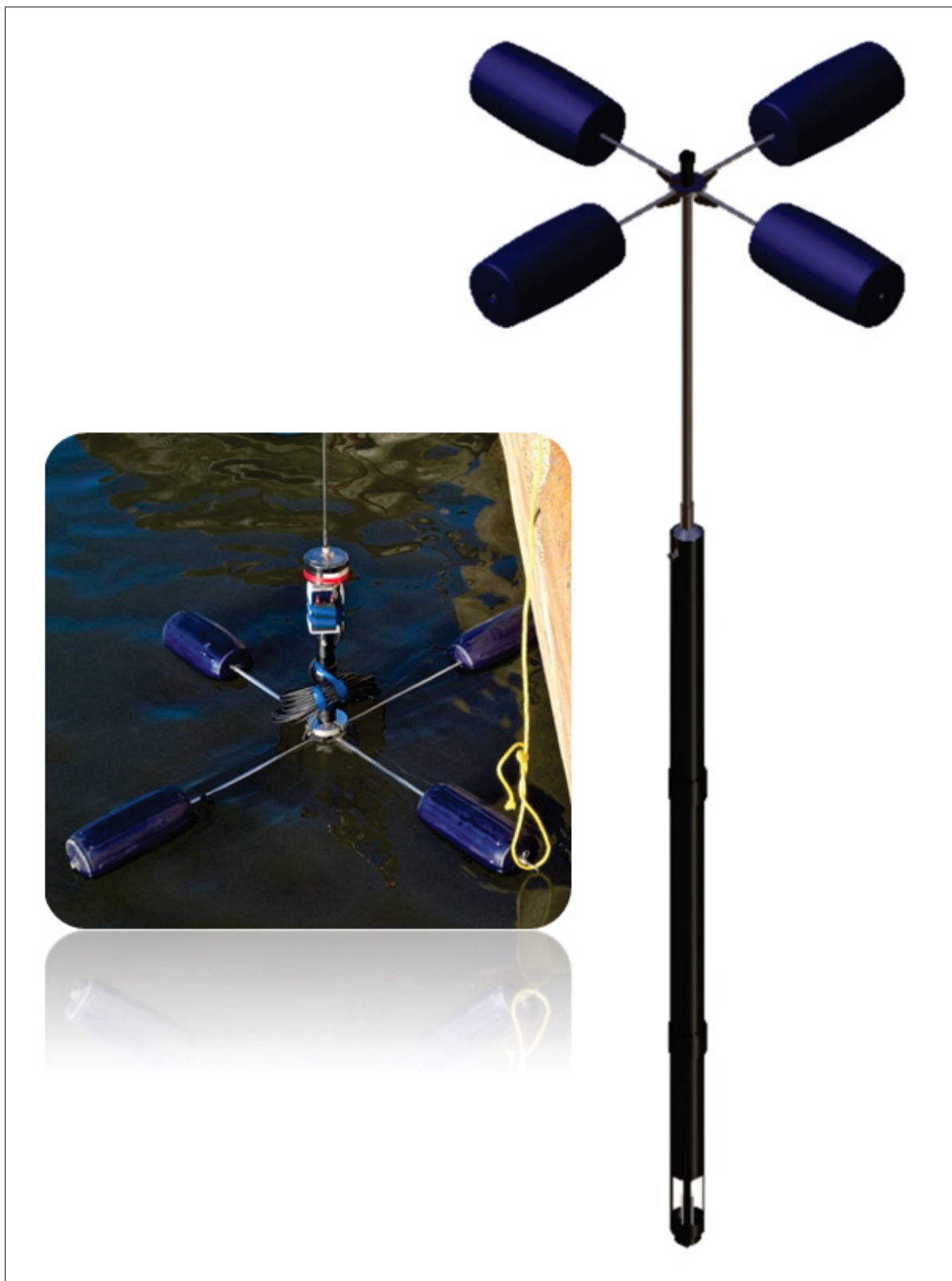


Figure 5.2 Bouée mobile de la balise TLT

5.3.2 Lieux des tests

L'emplacement choisi devait être représentatif d'un environnement d'inspection pour le sous-marin. L'emplacement choisi fut le Port de Montréal; plus précisément le bassin Bickerdike. Ce dernier présente plusieurs caractéristiques similaires à celles qu'il est possible de rencontrer lors de l'inspection de barrage. Pour commencer, le bassin est en fait un quai composé de trois murs verticaux de béton. Ensuite, comme présenté à la Figure 5.3, la profondeur est suffisamment grande pour permettre les tests. Pour finir, bien que cet emplacement reste représentatif d'une inspection possible par le sous-marin, il ne représente pas une situation idéale. En effet, comme il est possible de voir à la Figure 5.4, c'est un endroit fréquenté par des bateaux. Ces derniers génèrent du bruit important. Cela permet de discerner de potentiels problèmes ou de faire ressortir des comportements qu'il ne serait pas possible d'observer dans des circonstances idéales.

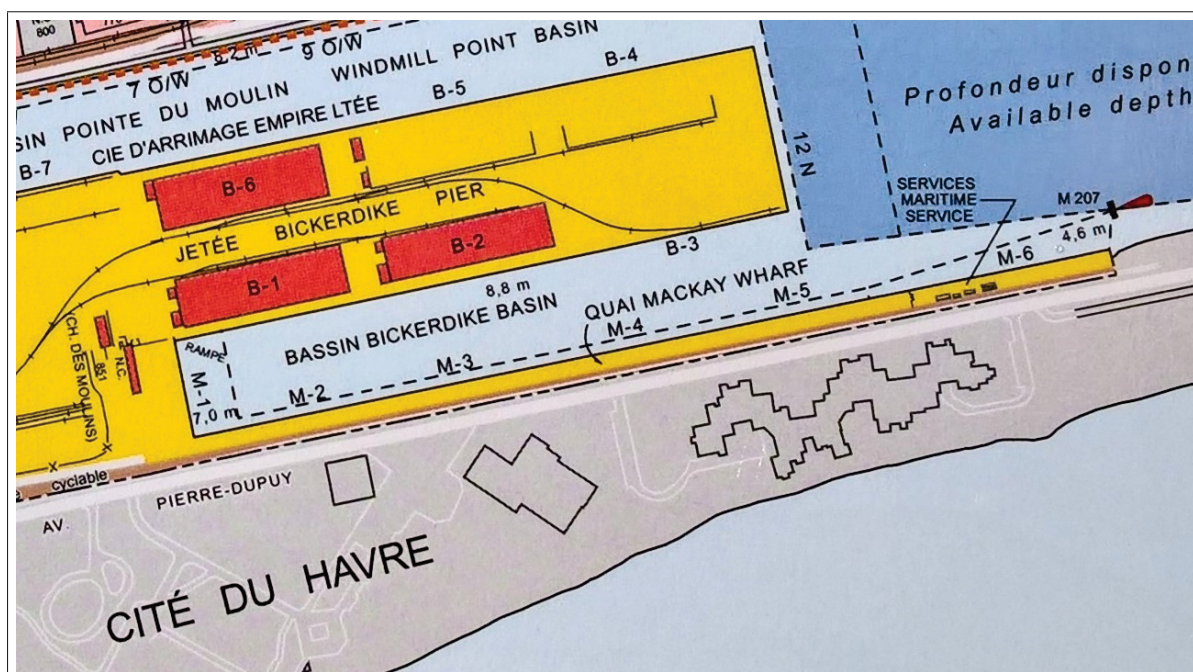


Figure 5.3 Carte avec profondeur du Bassin Bickerdike
Tirée du Port de Montréal (2018)



Figure 5.4 Photo satellite du Bassin Bickerdike
Tirée de Google Map (2017)

5.3.3 Positionnement des balises RBS

Le logiciel SouthStar permet d'utiliser la fonction "Baseline Survey" qui retourne la position relative des balises RBS. Les balises RBS s'interrogent à tour de rôle par ultrasons pour obtenir ces positions. Cela est utile lorsqu'il n'y a pas d'autre moyen de connaître les positions. Cependant, les positions des balises RBS sont affectées par les mêmes sources d'erreurs que le positionnement de la balise TLT. Puisque les balises RBS sont ici déployées le long des murs, il est possible d'obtenir leurs positions plus exactement. Les positions des balises RBS pour les tests ont été mesurées à l'aide d'un ruban de mesure d'arpenteur. Les mesures ont été répétées à plusieurs reprises pour valider les résultats.

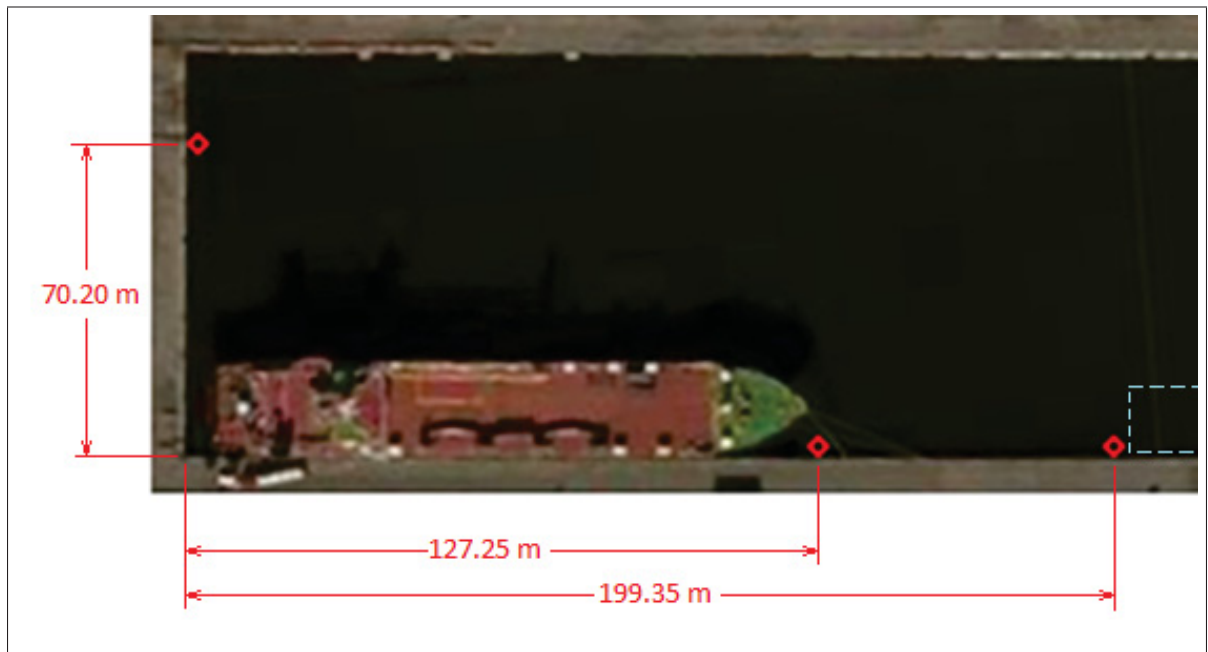


Figure 5.5 Positions des balises RBS pour le test en environnement réel

Les balises RBS ont été placées sur les lieux des essais de telle sorte qu'il y a une balise RBS qui est le plus loin possible de la ligne formée par les deux autres. La Figure 5.5 présente la position de chacune des balises RBS. La position verticale (axe Y) de la balise RBS de gauche est limitée par une descente pour bateau. La balise RBS du centre est placée à la position la plus à gauche permettant une ligne de vue avec la balise RBS de gauche. La forme de la coque du

bateau fait en sorte qu'il est possible de placer la balise RBS plus à gauche que ce que la forme du bateau vue de haut semble le permettre. La balise RBS de droite est limitée par la présence d'une barge. Cette dernière n'est pas visible sur la photo satellite. En effet, le jour des tests, le lieu des tests était utilisé pour stationner des barges utilisées pour la construction du nouveau Pont Champlain. Cela a imposé des modifications aux emplacements prévus pour les balises RBS. Ces dernières auraient idéalement dû couvrir une plus grande zone pour permettre aux tests d'être toujours compris entre les balises RBS.

5.3.4 Cas de figure

Le sous-marin est, entre autres, voué à l'inspection de mur de bétons et à la cartographie des fonds marins. La plupart du temps, ces murs seront le seul endroit où il sera possible d'installer le système de déploiement. Cela implique que le sous-marin fera des allers et retours entre les balises RBS près de la surface du mur durant son inspection. Cela cause certains inconvénients.

Pour commencer, lorsque seulement deux balises RBS sont en mesure de donner une valeur de distance, il est important de spécifier de quel côté de la ligne séparant deux balises RBS, ce qu'on appelle la «baseline» les solutions de trilatération sont possibles. Cela implique qu'il faut que le sous-marin demeure toujours du même côté de la «baseline» reliant les deux balises RBS. Pour cela, il faut que les balises RBS soient plus près du mur que l'émetteur du sous-marin. Cette distance entre le mur et l'émetteur est de 0,5 m. Afin de laisser une marge de manœuvre pour les murs imparfaits, la distance du mur pour le système de déploiement sera configurable entre 0,3 m et 2 m. Puisque cette dernière distance ne respecte pas les recommandations du fabricant, il faut valider l'effet que cela peut avoir sur les performances du système.

Ensuite, le sous-marin doit être en mesure d'inspecter le mur verticalement jusqu'à la surface. Tout comme la distance des balises RBS par rapport au mur, il faut réduire la profondeur de ces dernières en dessous des recommandations du fabricant. Le système de déploiement permettra donc de placer les balises RBS à des profondeurs ajustables entre 0,2 m et 2 m. Cette der-

nière valeur correspond à la profondeur minimale à laquelle le capteur RBS est complètement immergé.

En considérant ces informations, les tests en environnement réels ont été divisés en sept cas de figure.

5.3.4.1 Cas 1 : Test de référence

Ce premier cas représente le déplacement en ligne droite le long d'un mur entre deux balises RBS. La Figure 5.6 présente un schéma du parcours en vert. La barge est représentée par une ligne pointillée bleue. La profondeur des balises RBS est de 2 m et leur distance du mur est de 2m .Dans le cas de la balise à proximité de la barge, la distance de la barge est de 2 m. La balise TLT est à 3 m de la surface. Ce test simple fournira une référence pour les autres cas de figure qui incorporeront une section à gauche de la barge identique à ce cas de figure. De plus, il permettra de valider les recommandations du fabricant (distance de 2 m minimum de la surface, du fond ou des murs), l'exactitude des résultats lorsque l'on se trouve sur la «baseline» et lorsqu'on s'approche des balises RBS.

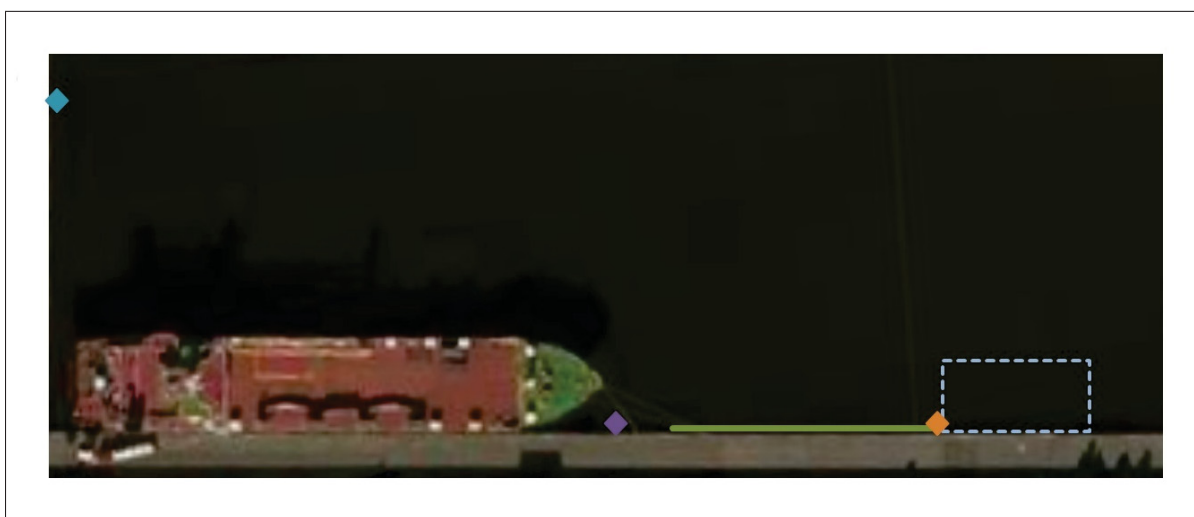


Figure 5.6 Schéma de la trajectoire du cas de figure 1

5.3.4.2 Cas 2 : Test de base

Ce deuxième cas représente le déplacement selon des lignes droites le long du mur et du contour de la barge avec la même configuration que le cas de figure 1. La Figure 5.7 présente un schéma du parcours. La portion en ligne droite le long du mur permet d'évaluer la répétabilité du système. La portion du test où la balise TLT fait le tour de la barge permettra d'évaluer les performances lorsque la balise TLT ne se trouve pas entre deux balises RBS.

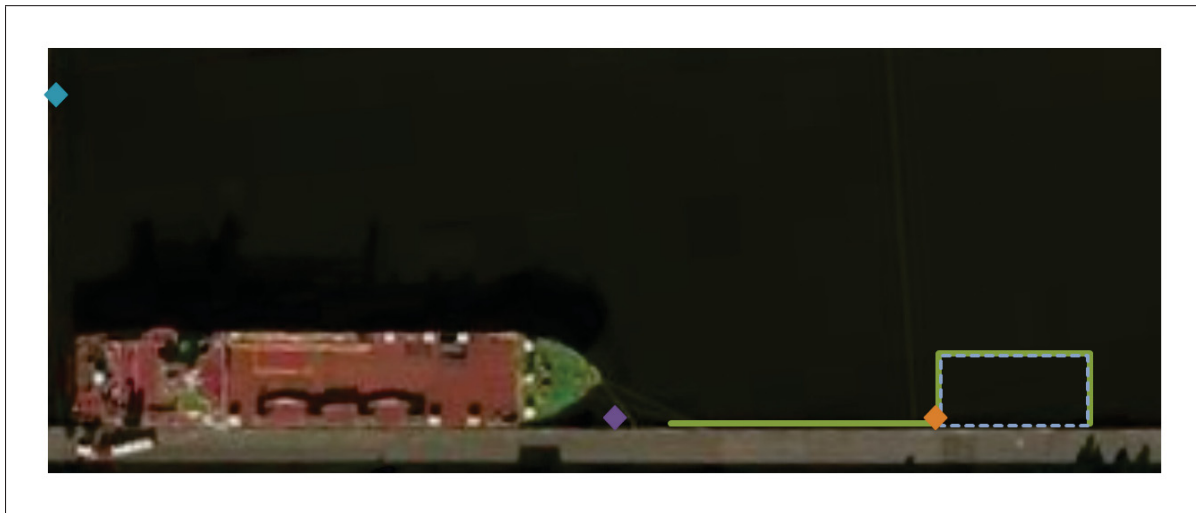


Figure 5.7 Schéma de la trajectoire du cas de figure 2

5.3.4.3 Cas 3 : Distance du mur des RBS

Ce troisième cas utilise le même trajet que le cas de figure 2, mais la distance entre les balises RBS et le mur est réduite à 0,3 m. Cette distance est la distance minimale que la balise TLT peut avoir avec le mur lorsque ce dernier est installé sur le sous-marin. La Figure 5.8 présente un schéma du parcours. Ce cas de figure permet d'observer les effets de la réduction de la distance par rapport au mur en dessous des recommandations du fabricant pour accommoder son utilisation avec le sous-marin.

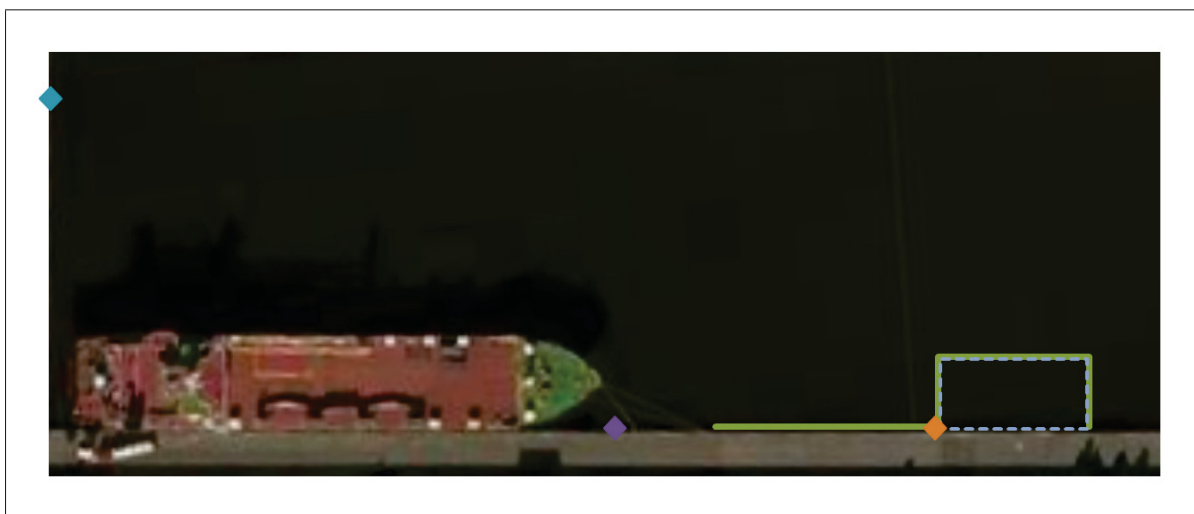


Figure 5.8 Schéma de la trajectoire du cas de figure 3

5.3.4.4 Cas 4 : Profondeur des RBS

Pour ce quatrième cas, le trajet reste principalement inchangé par rapport à ce qui a été fait pendant les cas de figure 2 et 3. Une portion le long du mur du côté droit de la barge est cependant ajoutée. Ce qui distingue ce cas de figure des cas de figure 2 et 3 est la modification de la profondeur des balises RBS qui est réduite à 0,2 m. Cela correspond à la profondeur requise pour immerger les balises RBS, mais sans plus. La Figure 5.9 présente un schéma du parcours. Ce cas de figure permet d'observer les effets de la réduction de la profondeur des balises RBS en dessous des recommandations du fabricant pour accommoder son utilisation avec le sous-marin. En effet, celui-ci doit inspecter les murs des installations immergées jusqu'à la surface. Réduire la profondeur des balises RBS permet d'éviter que la balise TLT se retrouve à la fois plus haute et plus basse que le plan formé par les balises RBS durant une même inspection. Cela permet d'utiliser des critères de discriminations simples et d'utiliser un nombre de balises RBS réduit.

L'ajout de la portion du côté droit de la barge permet d'observer les performances en fonction de la distance des balises RBS.

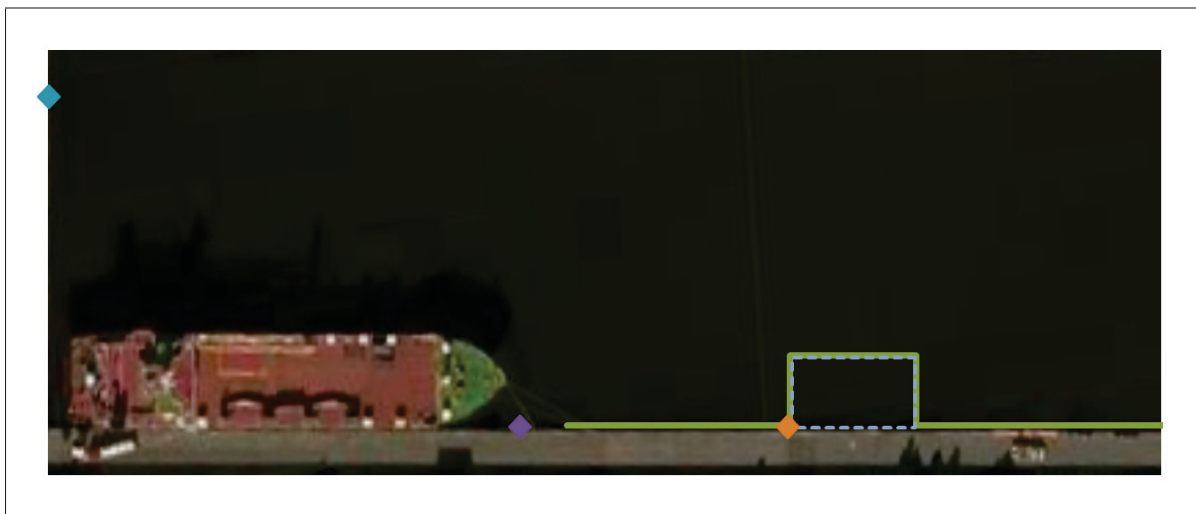


Figure 5.9 Schéma de la trajectoire du cas de figure 4

5.3.4.5 Cas 5 : Delta de profondeur TLT vs RBS

Le trajet et les profondeurs des balises RBS du cas de figure 5 sont les mêmes que ceux du cas de figure 4. Cependant, la profondeur de la balise TLT est réduite à 1,75 m pour observer les effets de la réduction de la profondeur de la balise TLT. Cela réduit le delta de profondeur entre les balises RBS et la balise TLT qui est normalement sur le sous-marin. Comme le cas de figure 4, cela correspond à ce qui se produit lorsque le sous-marin inspecte jusqu'à la surface. La Figure 5.10 présente un schéma du parcours.

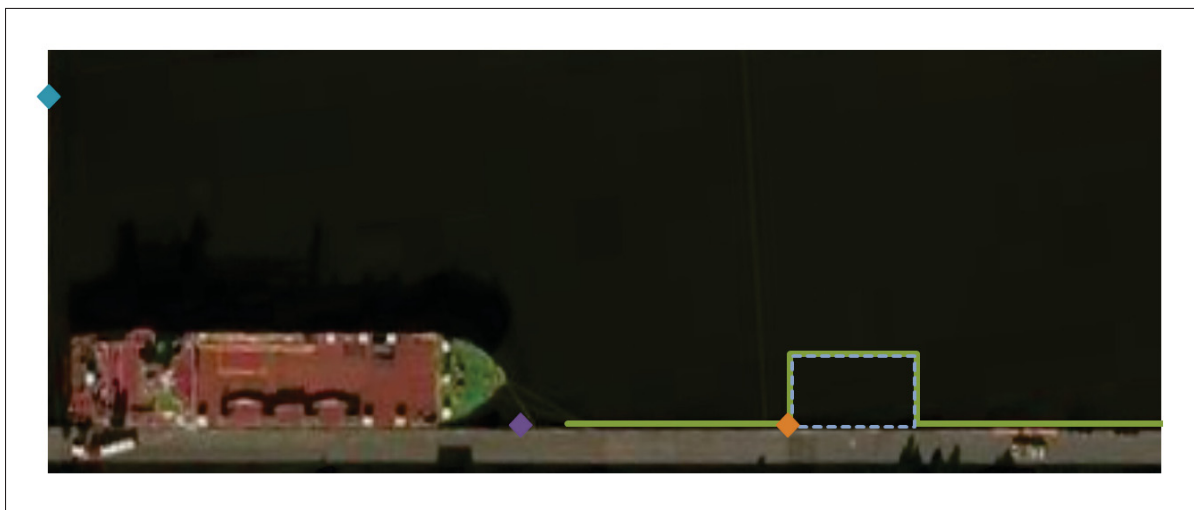


Figure 5.10 Schéma de la trajectoire du cas de figure 5

5.3.4.6 Cas 6 : Perte d'une balise RBS

Le cas de figure 6 partage la même trajectoire que les cas de figure 4 et 5 et les configurations de profondeur du cas de figure 5. Cependant, la balise RBS #1 est retiré de l'eau pendant quelques secondes de façon aléatoire. Cela permet d'observer le comportement du système face à cette situation problématique. L'impact de la perte d'une balise RBS est plus important lorsque la vitesse de déplacement est plus élevée, puisque la distance parcourue pendant la perte de cette balise sera plus grande. Pour cette raison, le cas de figure a été réalisé en déplaçant la balise TLT plus rapidement que pour les cas de figure précédents. L'augmentation de la vitesse a imposé une trajectoire différente qui coupe les coins là où la barge approche du mur. La Figure 5.11 présente un schéma du parcours.

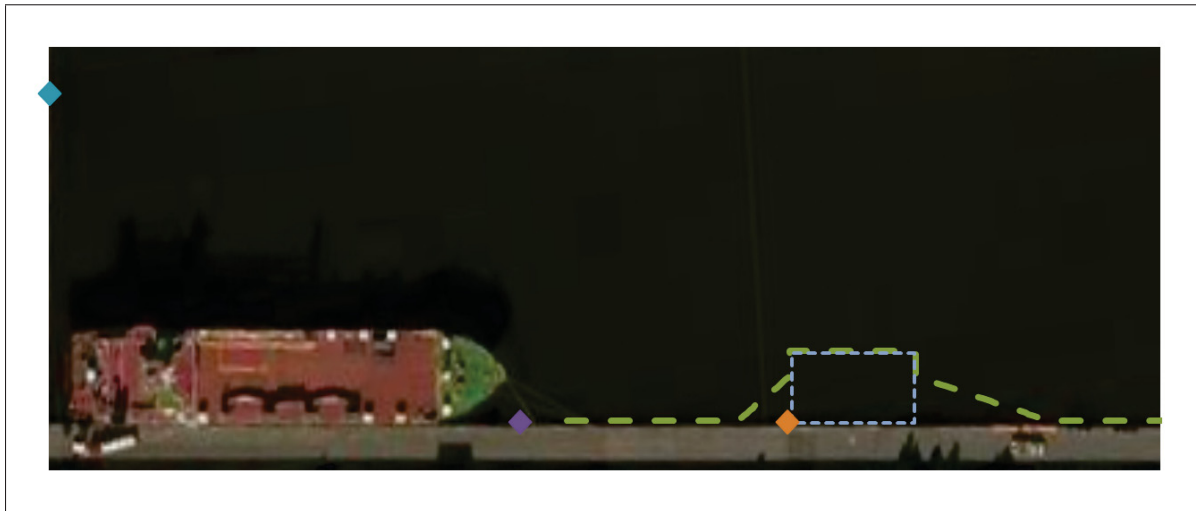


Figure 5.11 Schéma de la trajectoire du cas de figure 6

5.3.4.7 Cas 7 : Vitesse plus élevée

Le cas de figure 7 a les mêmes configurations de profondeur que les cas de figure 5 et 6. Comme pour le cas de figure 6, sa trajectoire, présentée à la Figure 5.12, est modifiée à cause de la vitesse de déplacement de la balise TLT. La trajectoire ne longe plus les deux côtés de la barge. Cependant, il n'y a pas de coupure de balise RBS comme au cas de figure 6. Cela permet d'observer si l'intervalle d'une seconde entre chaque pulsation est une source de problème possible. La vitesse de déplacement est variable et est limitée par ce qu'il a été possible d'atteindre avec la force d'un homme.

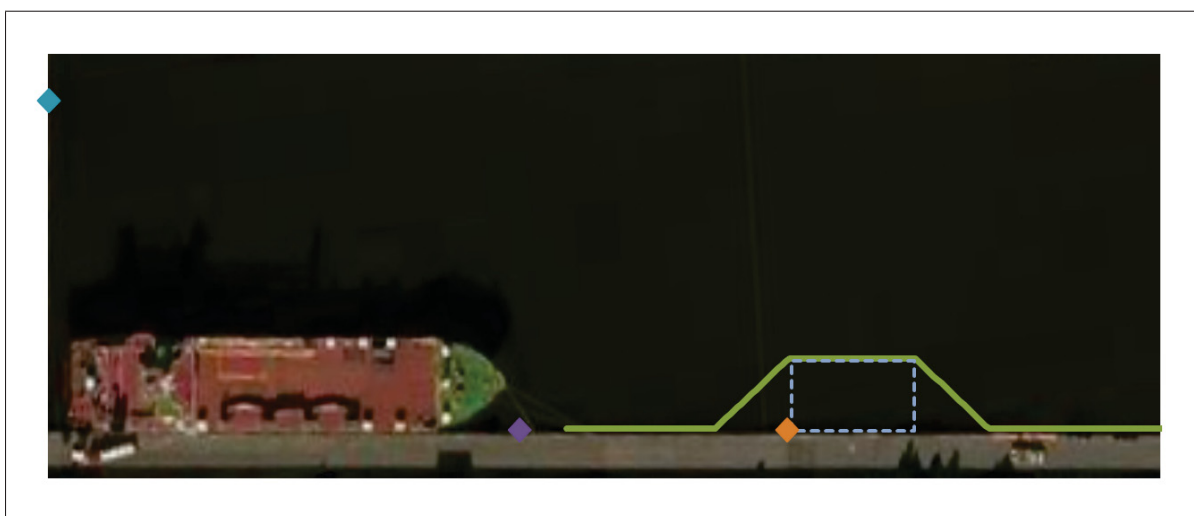


Figure 5.12 Schéma de la trajectoire de cas de figure 7

CHAPITRE 6

RÉSULTATS DES TESTS EN ENVIRONNEMENT RÉEL

6.1 Présentation des résultats

Les positions obtenues pour chacun des cas de figure peuvent être présentées sous forme 2D, puisque la profondeur ne varie pas à l'intérieur d'un test.

Dans les sections qui suivent, les résultats de chacun des cas de figure seront présentés, puis analysés. On pourra identifier les éléments suivants :

- la position des trois balises RBS (légende B1, B2 et B3);
- la position du mur de béton (légende Mur);
- la position de la barge (légende Barge);
- le trajet théorique (légende Théorique);
- le trajet résultant par le calcul de trilatération du logiciel DiveBase (légende DiveBase).

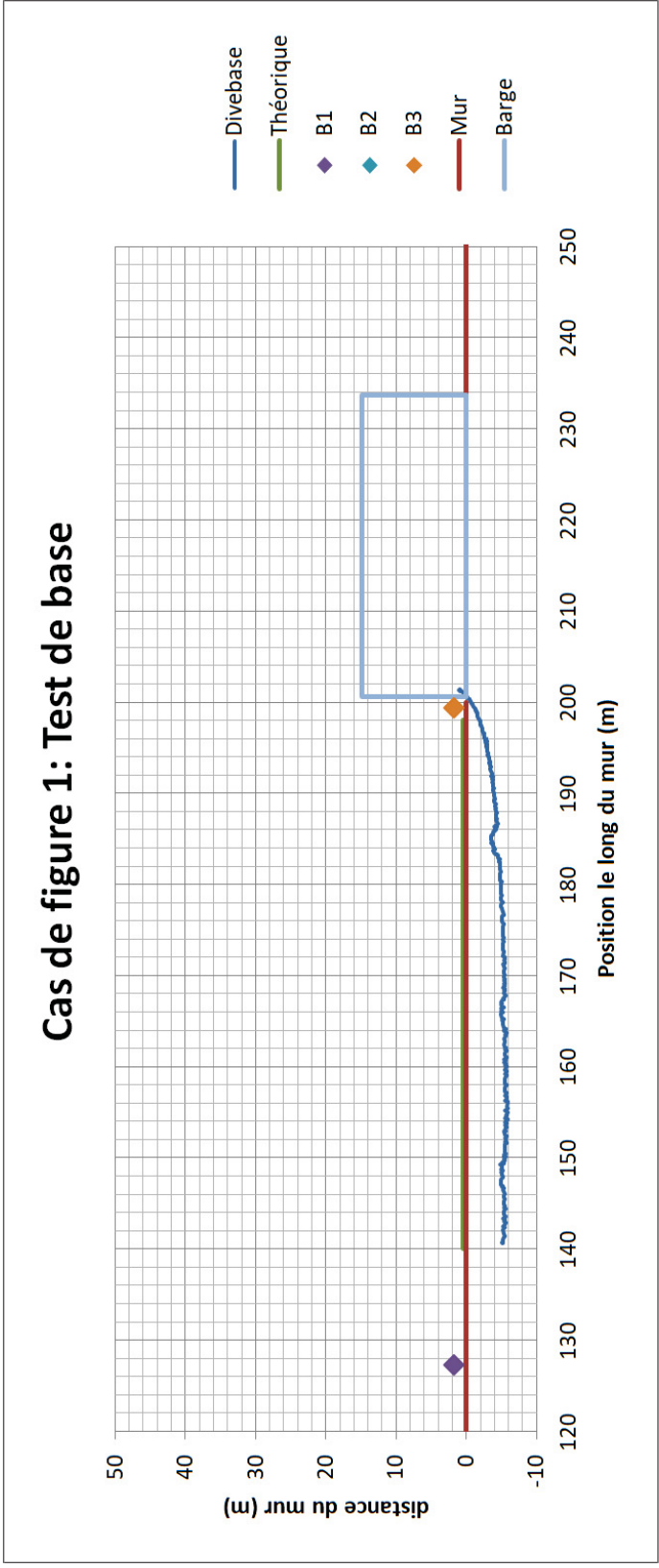


Figure 6.1 Résultats du cas de figure 1

La Figure 6.1 présente une déformation de la trajectoire produite par le logiciel DiveBase. Lorsque la balise TLT est entre les balises RBS, il y a un décalage vers le mur et lorsque la balise TLT approche d'une balise RBS, ce décalage est réduit, mais on observe un décalage vers la droite. Une mauvaise vitesse du son ou un délai associé aux équipements est une cause possible de ce comportement. Cependant, les équations utilisées par DiveBase sont inconnues. Il est donc impossible d'identifier avec certitude la source de ce comportement. Plus d'analyses seront présentées au Chapitre 7. Les trois bosses observables sur la trajectoire correspondent aux pneus placés le long du mur pour protéger les coques de bateaux. Ces pneus risquent d'être contournés différemment à chaque essai chacun des essais, mais ils permettent d'ajouter du contenu à la trajectoire dans l'axe Y.

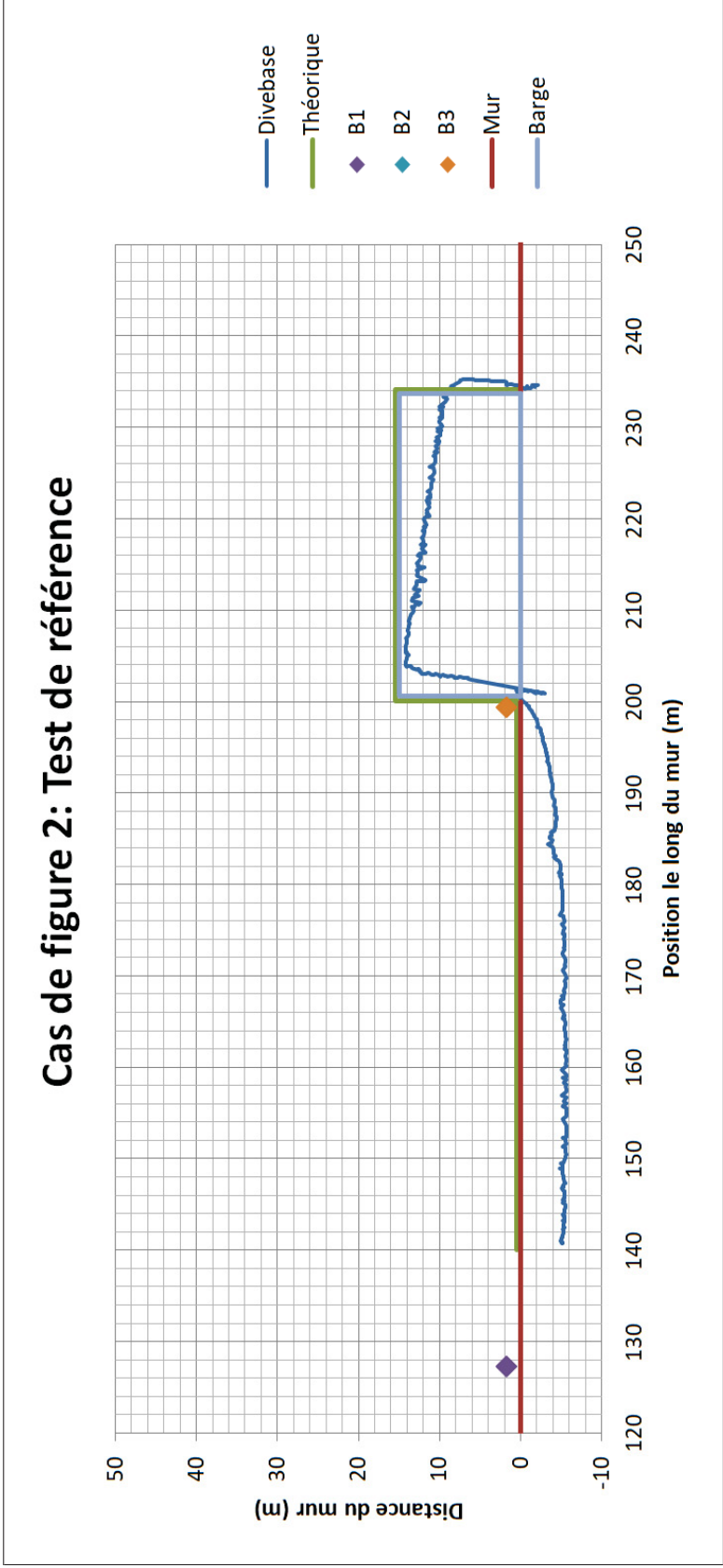


Figure 6.2 Résultats du cas de figure 2

À la Figure 6.2, on peut constater que la section du trajet qui est une répétition du cas de figure 1 est identique au résultat du cas de figure 2. Il est donc possible de dire que le système est en mesure de répéter les mêmes résultats d'un essai à l'autre lorsque les conditions ne sont pas changées. Pour ce qui est de la section autour de la barge, la rotation observée est possiblement causée par le même aspect qui cause la déformation entre les deux balises RBS, comme mentionné au cas de figure 1.

Cas de figure 3: Distance du mur des RBS

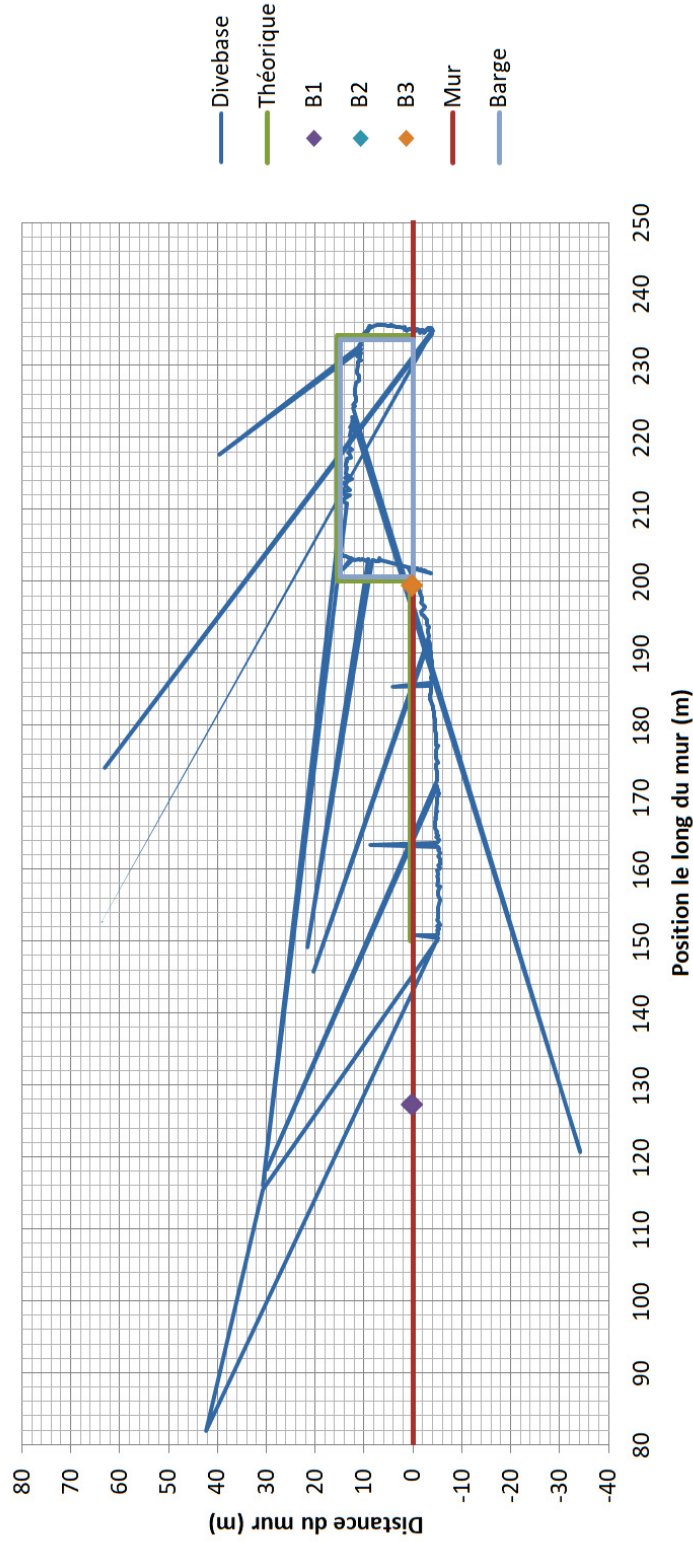


Figure 6.3 Résultats du cas de figure 3

Comme il est possible de voir à la Figure 6.3, la réduction de la distance des balises RBS du mur à 0,3 m a causé l'apparition de positions erronées. La majorité des positions restent cependant proche de ce qui était observé dans le cas de figure 2. Il n'y a pas de changement au niveau de la déformation ou du décalage de la trajectoire. La réduction de la distance du mur est donc acceptable, si la discrimination des positions erronées est possible.

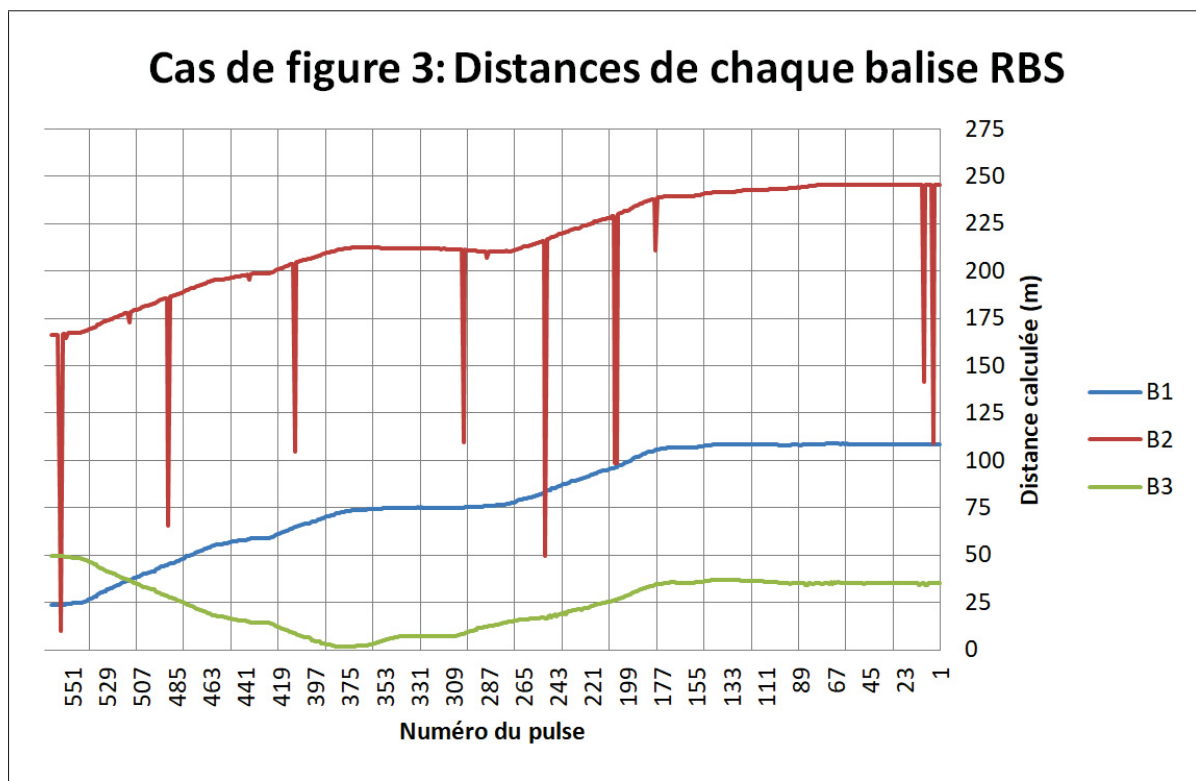


Figure 6.4 Positions individuelles de chaque balise du cas de figure 3

La Figure 6.4 présente les distances individuelles de chacune des balises RBS pour chaque pulse émis par la balise TLT lors de l'essai. L'ordre des pulsations est inversé pour faciliter la comparaison avec la Figure 6.3. Le départ du trajet se trouve à droite de la barge et se termine proche de la balise RBS 1. Chaque pic de la distance de la balise 2 correspond à une position aberrante de la Figure 6.3. La balise RBS 2 est la balise la plus éloignée de la balise TLT. Il est possible que ce facteur soit responsable de l'apparition des pics uniquement pour cette balise. La distance du mur des balises RBS aurait donc une influence sur la portée maximale du système. Il faudrait donc réduire la distance entre le mur et une balise RBS seulement, pour éviter que le sous-marin ne traverse la «baseline» entre deux balises RBS. Cependant, la balise RBS 2 est proche d'un coin. Il est possible que cela entraîne des effets acoustiques non désirés.

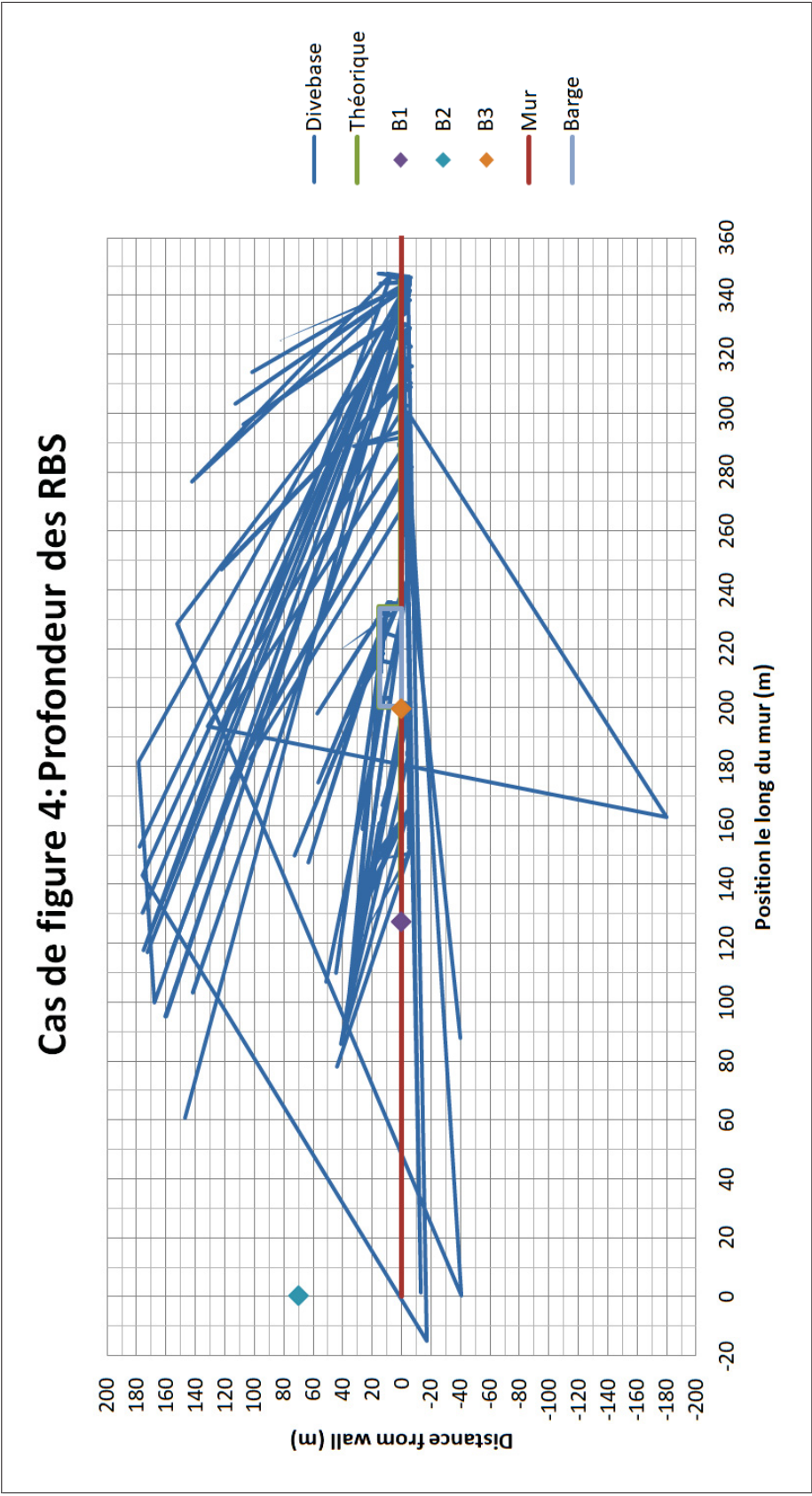


Figure 6.5 Résultats du cas de figure 4

La Figure 6.5 présente une forte augmentation de positions aberrantes. Les positions qui ne sont pas fortement erronées sont proches de ce qui était observé dans le cas de figure 2 et 3. Il n'y a pas de changement au niveau de la déformation ou du décalage de la trajectoire.

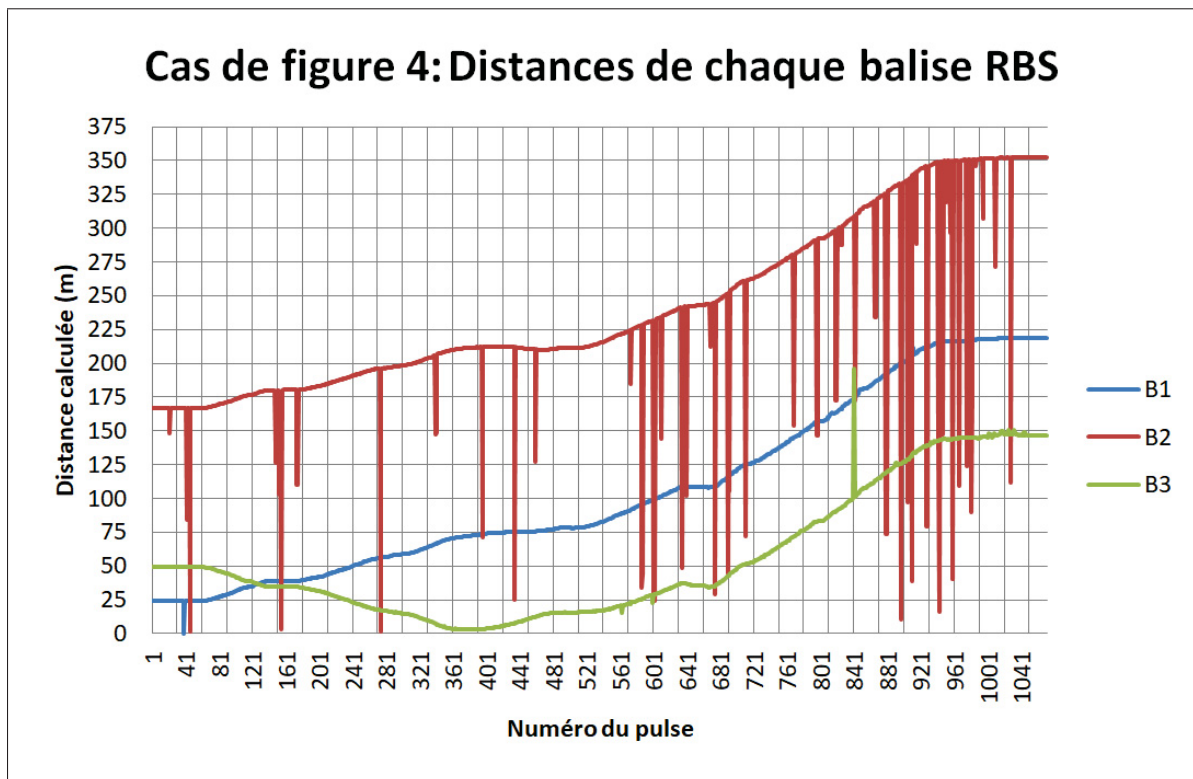


Figure 6.6 Position individuelles de chaque balise du cas de figure 4

La Figure 6.6 montre qu'il y a une concentration de distances erronées pour la balise RBS 2 plus la distance augmente. Il y a également une valeur erronée pour la balise RBS 3 proche de la 840e pulsation. La distance réelle est d'environ 100 m. La balise RBS 1 présente également une seule distance significativement erronée autour de la 40e pulsation du test. Dans le cas de la balise RBS 1, l'erreur s'est produite avec une distance réelle d'environ 25 m. Cela porte à croire que la distance n'est pas le seul facteur pouvant causer l'apparition de distances erronées. L'hypothèse la plus plausible dans le cas présent est qu'un écho aurait été utilisé pour le calcul de distance. L'environnement de test est effectivement très propice à la génération d'échos. Les murs parallèles en béton et la profondeur relativement faible sont tous des facteurs favorisant les rebonds de pulsations. Il est donc possible de dire que la réduction de la profondeur des balises RBS a un effet négatif sur les performances du système en le rendant plus susceptible aux échos.

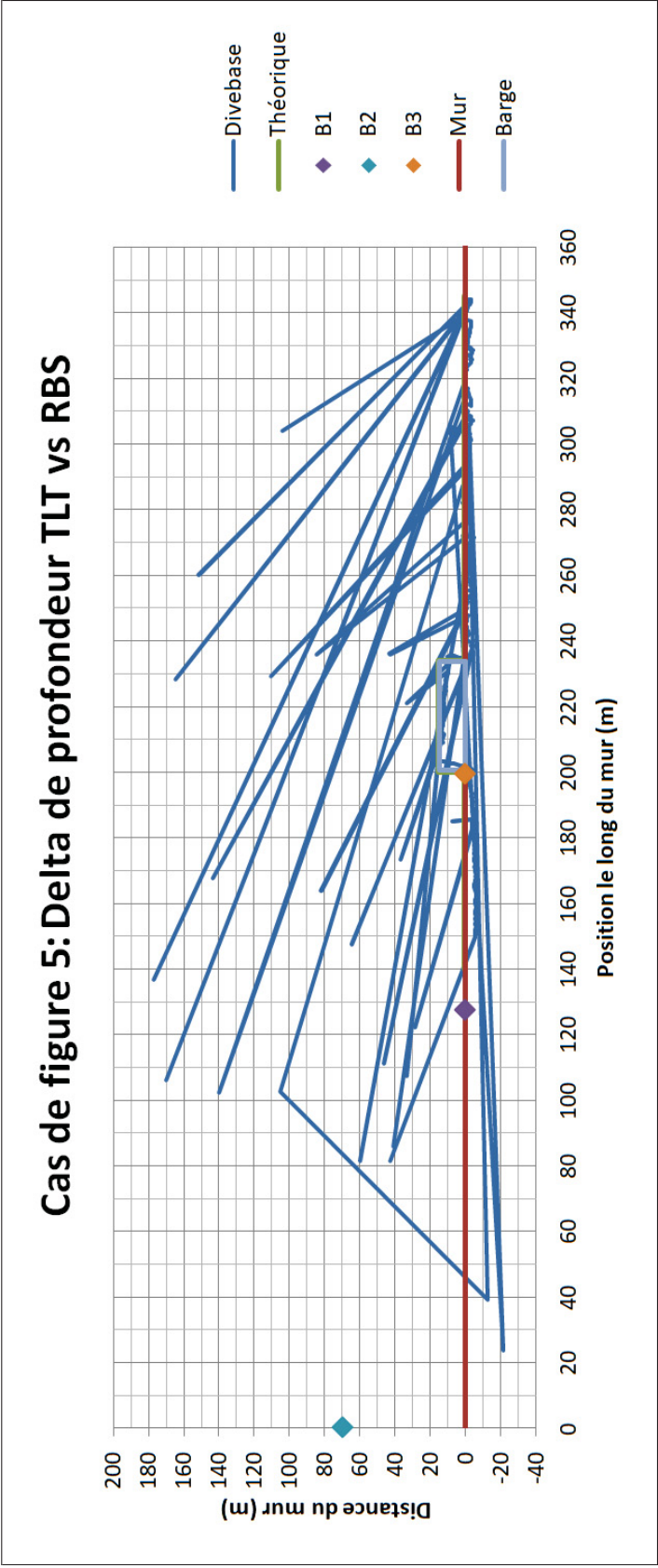


Figure 6.7 Résultats du cas de figure 5

Les résultats du cas de figure 5 montrés à la Figure 6.7 présentent moins de positions aberrantes que le cas de figure 4. Pourtant, les cas de figure 4 et 5 partagent les mêmes paramètres, excepté le delta de profondeur entre les balises RBS et la balise TLT. Cela porte à croire que la réduction de la profondeur de la balise TLT est responsable de la diminution des positions erronées. Cette réduction de profondeur augmente la distance du fond et réduit la distance entre la balise TLT et le plan formé par les balises RBS. Pour distinguer hors de tout doute lequel de ces facteurs a eu le plus d'effet sur les performances, il faudrait répéter les tests dans un environnement plus profond.

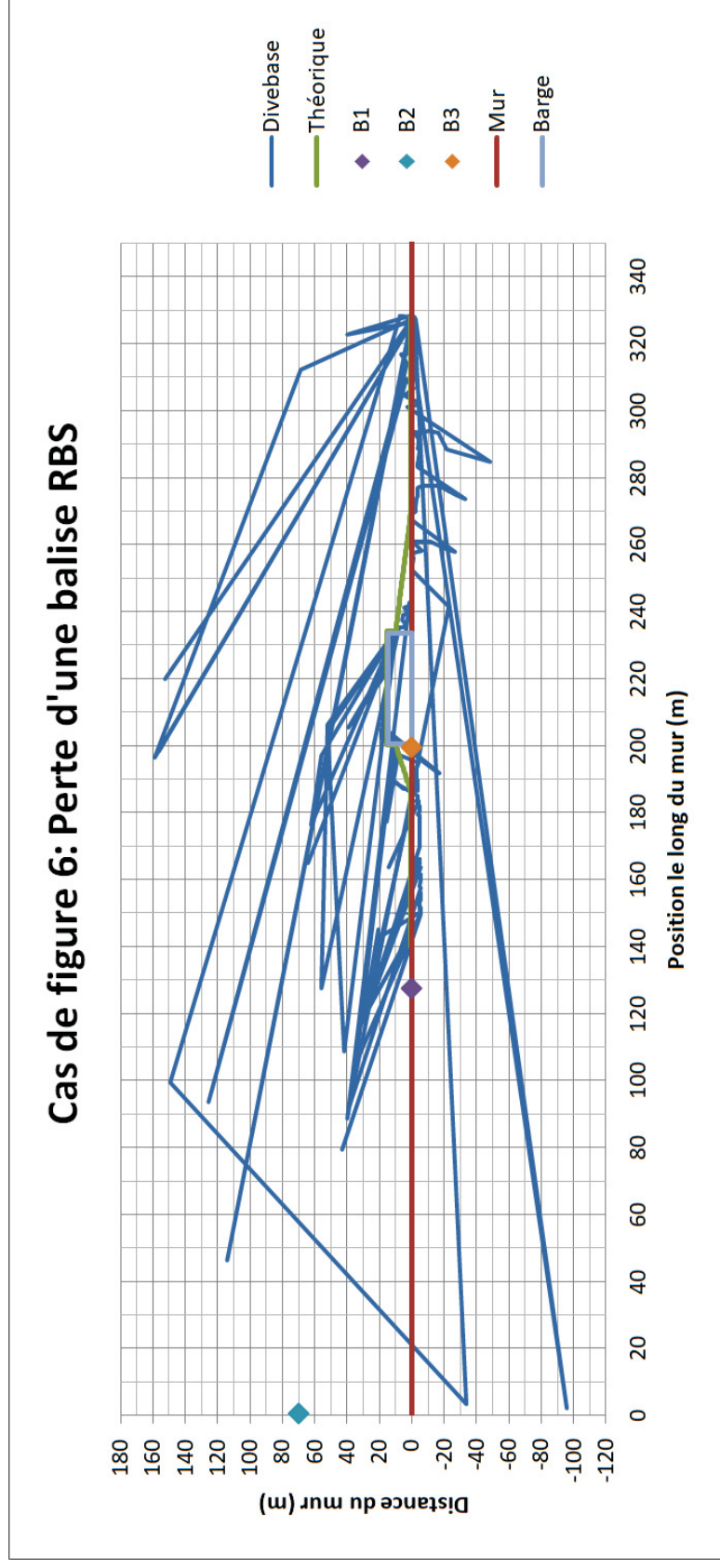


Figure 6.8 Résultats du cas de figure 6

La Figure 6.8 présente les résultats du cas de figure 6. Ce dernier ne comporte pas significativement plus de positions aberrantes que le cas de figure 5. Cependant, les valeurs aberrantes sont généralement moins éloignées de la vraie valeur. De plus, il y a une plus grande quantité de valeurs aberrantes qui se trouvent de l'autre côté du mur dans la portion du trajet à droite de la barge. Les deux phénomènes pourraient s'expliquer par le fait que la balise RBS était retirée de l'eau. En effet, en retirant la balise de l'eau, il est possible que la balise capte une pulsation entre sa position finale dans l'eau et lorsqu'elle est totalement sortie de celle-ci.

Comme il a été observé dans le cas de figure 4, la réduction de la profondeur a un effet négatif sur les performances. Ce n'est donc pas la perte d'une balise qui a un impact sur la quantité ou l'importance des positions aberrantes ; c'est plutôt la méthode employée pour retirer la balise qui a eu cet effet.

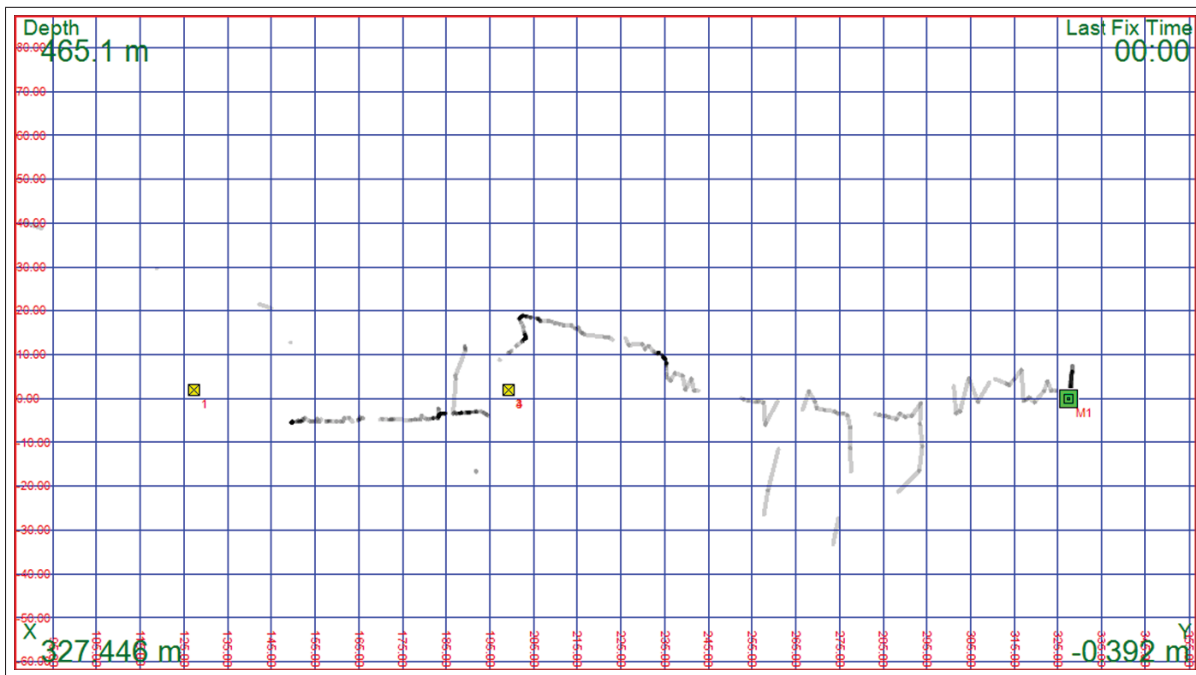


Figure 6.9 Interface du logiciel DiveBase pour le cas de figure 6

La Figure 6.9 est une capture d'écran du logiciel DiveBase pour le cas de figure 6. Il est possible de voir des trous dans la trajectoire lorsque le système n'a pas été en mesure de fournir une position quand la balise RBS 1 était sortie de l'eau. Cela démontre que le logiciel n'est pas en mesure de modifier sa méthode de calcul automatiquement en fonction du nombre de balises RBS qui ont capté le pulse. Le dégradé de gris à noir représente la superposition de plusieurs résultats de calcul de position.

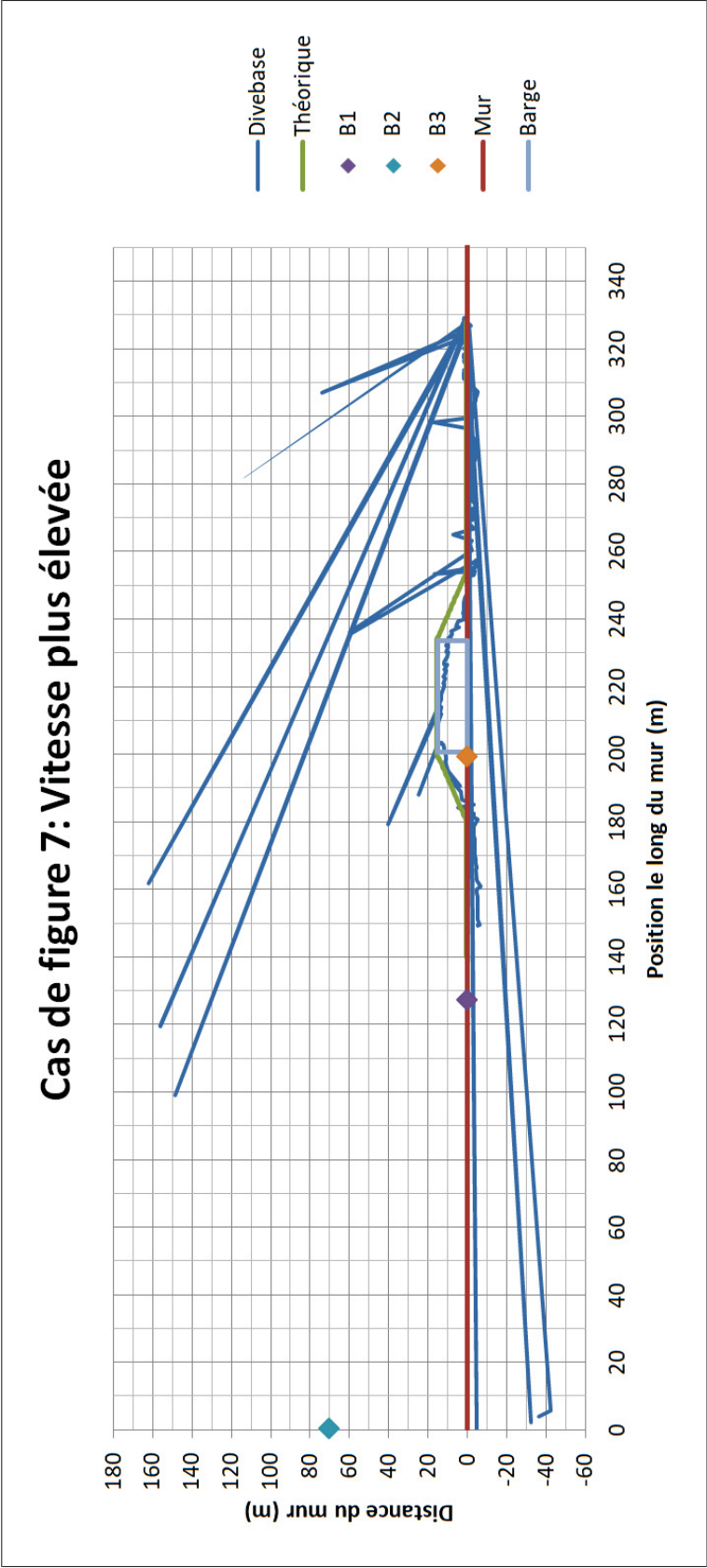


Figure 6.10 Résultats du cas de figure 7

La Figure 6.10 présente des positions comparables à ce qui est présenté à la Figure 6.7 pour les parties du trajet qui est commun aux deux cas de figure. Il est donc possible de dire que les vitesses utilisées lors de cet essai n’ont pas eu d’impact majeur sur les performances du système. Cependant, le cas de figure 7 ne contient pas autant de positions aberrantes que le cas de figure 5. Il est possible que ce soit dû au fait que le cas de figure 7 a eu une durée moins grande. Cela a laissé moins d’opportunité au système de capter des échos.

6.2 Conclusion partielle

Les tests en environnement réel ont permis de mieux comprendre les effets que les différents paramètres de déploiement peuvent avoir sur les performances du système de positionnement. Voici donc ce que les différents cas de figures ont permis de mettre en lumière.

La distance du mur des balises RBS a une influence sur la portée maximale du système. Il faudrait donc réduire la distance entre le mur et seulement une balise RBS pour éviter que le sous-marin ne traverse la «baseline» entre deux balises RBS. Toutes les autres balises déployées sur un mur non inspecté devrait respecter la distance recommandée de 2 m du mur.

La réduction de la profondeur des balises RBS a un effet négatif sur les performances du système en le rendant plus susceptible aux échos. Il est préférable d'éviter de réduire la profondeur des balises RBS en dessous de la valeur recommandée de 2 m lorsque le sous-marin ne doit pas inspecter plus haut que cette profondeur.

La réduction de la profondeur de la balise TLT a permis d'améliorer la performance du système. Cependant, il est difficile de dire avec certitude quel paramètre a le plus eu d'influence entre la distance du fond et le delta de profondeur entre la balise TLT et les balises RBS.

Le système de positionnement tel qu'il est vendu par le fabricant ne permet pas de changer automatiquement de méthode de calcul lorsque des balises RBS ne captent pas les pulsations. Il n'y a pas de résolution de calcul de positionnement jusqu'à ce que toutes les balises RBS captent la pulsation.

L'augmentation de vitesse n'a pas eu d'effet notable durant l'essai. Cependant, les vitesses atteignables par le sous-marin sont plus importantes. Pour pouvoir conclure correctement si la vitesse de déplacement a un impact sur les performances, davantage de tests sont requis.

Les conclusions ici présentées permettent, entre autres, d'optimiser le déploiement du système pour maximiser les performances du système de positionnement lorsqu'utilisé seul. Cependant, il est possible d'améliorer les résultats du positionnement malgré un déploiement imparfait. Le Chapitre 7 présente quelques pistes d'amélioration du positionnement en traitant les données.

CHAPITRE 7

TRAITEMENT ET ANALYSE DES RÉSULTATS

7.1 Pistes d'amélioration

Afin d'améliorer les performances du présent système de positionnement, plusieurs pistes ont été abordées.

7.1.1 Calibration

Pour chacun des cas de figure, une calibration fut effectuée avant le début du test. La balise TLT fut placée à un endroit connu. Un facteur multiplicatif à appliquer à la vitesse du son dans l'eau pour chacune des balises RBS a été déduit afin d'obtenir la distance réelle de chacune des balises RBS. Ce facteur permettait donc de non seulement corriger une mauvaise évaluation de la vitesse du son dans l'eau, mais aussi de compenser pour les autres sources d'erreur systématique. Pour bénéficier des effets de cette méthode, il faut faire la calibration à une position qui est le plus près possible de la zone de travail prévue. Il est également pertinent de refaire la calibration lorsque la température de l'eau change au cours de la journée.

7.1.2 Élimination des valeurs aberrantes

Cette section englobe les deux méthodes utilisées pour enlever les valeurs aberrantes. La première méthode se base sur la vitesse maximale atteignable pour retirer les valeurs aberrantes. Chaque position est comparée à la dernière. Si la distance qui les sépare est plus grande que la distance maximale possible, en se basant sur le temps entre les pulsations et un critère de vitesse maximale, la position est considérée comme aberrante. Cette dernière sera donc rejetée. La deuxième méthode se base sur la connaissance des lieux du test pour limiter les solutions impossibles. Par exemple, lorsqu'il y a un mur, il est impossible que les positions se trouvent de l'autre côté. Pour ce faire, les valeurs qui sont en dehors des limites physiques sont ramenées à la limite.

La méthode basée sur la connaissance des lieux du test a un impact moins important que la méthode basée sur la vitesse maximale. En effet, la vitesse maximale limite les erreurs dans toutes les directions, et cela peu importe la position dans l'environnement du test. La méthode basée sur la connaissance des lieux a un impact seulement lorsque les valeurs sortent des limites physiques de l'environnement. Lorsque le trajet réel est loin des limites, les valeurs qui sortent sont placées aux limites, mais ne seront pas forcément proche de la vraie position. Cependant, la méthode basée sur les limites physiques permet, lorsqu'utilisée conjointement avec la méthode de vitesse maximale, de réduire l'imprécision du système lorsque le trajet est proche des limites.

7.1.3 Moyenne mobile

Calculer une moyenne mobile peut avoir un intérêt certain pour la génération de rapports d'inspections. En effet, puisque la moyenne mobile lisse le parcours, elle permet de réduire les variations subites. Cela se fait cependant au prix de la réduction de la finesse du parcours. Lorsque le trajet est en ligne droite, comme lors de l'inspection de mur, la moyenne mobile permet de réduire l'importance des variations autour du trajet réel.

7.1.4 Algorithmes pour la localisation avec une quantité de balises de référence différente de trois

Comme présenté dans la section 2.3, la trilatération de base utilise trois positions de référence et les distances séparant ces trois positions de l'objet à localiser pour résoudre les équations de positionnement. Dans le cas présent, les positions de référence sont les positions des balises RBS et l'objet à localiser est la balise TLT. Cependant, il est possible de localiser un objet lorsqu'il n'y a pas exactement trois distances disponibles. En effet, la présente section aborde des pistes de solution dans les cas où il n'y a pas au moins trois balises de référence qui captent la pulsation.

7.1.4.1 Solution possible à une balise de référence

Une balise de référence RBS, à elle seule n'est pas suffisante pour obtenir une position. L'infinité de positions satisfaisant le seul critère imposé par la valeur d'une seule distance prend la forme d'une sphère dont le rayon est la distance entre la balise RBS et l'émetteur, la balise TLT.

L'utilisation d'une seule balise RBS pour obtenir une position est possible lorsque la distance obtenue est jumelée à d'autres informations provenant d'autres sources comme une centrale inertielle ou un DVL. Cette façon de faire qui est proposée dans (Scherbatyuk, 1995) permet d'obtenir un système hybride joignant la précision généralement inférieure, mais relativement stable des systèmes acoustiques LBL et la généralement grande précision à court terme des systèmes comme les centrales inertielles et les DVLs. En effet, la précision de ces derniers se détériore avec le temps, puisque les erreurs s'accumulent d'un estimé de position à l'autre. La précision à court terme permet d'éliminer les mauvaises estimations du système LBL.

(LaPointe, 2006) utilise également une seule balise de référence et un DVL. Cependant, l'auteur utilise une transformation géométrique au lieu d'un « Extended Kalman Filter ». Une analyse des économies associées à l'utilisation d'une seule balise de référence comparativement à un système LBL traditionnel est aussi présentée. Il est aussi à noter que la solution présentée dans (LaPointe, 2006), peut être utilisée avec plus d'une balise de référence afin d'assurer de la redondance. Cependant, l'avantage principal de la solution présentée, soit l'économie de coût d'opération, est inversement proportionnel au nombre de balises de référence déployées. De plus, l'auteur mentionne que sa solution pourrait être utilisée dans un algorithme pour LBL traditionnel, mais qui fait face à une situation dans laquelle une seule distance est disponible pour le calcul de position.

7.1.4.2 Solution possible à deux balises de référence

Il est possible de résoudre les équations de trilatération avec seulement deux balises de référence si des contraintes sont utilisées pour limiter les solutions possibles à une seule solution. Un capteur de profondeur permet de réduire le nombre d'inconnues à deux au lieu de trois. Lorsque les balises RBS sont placées le long d'un mur, il est possible de rejeter les solutions qui sont impossibles. Pour finir, même si les balises RBS ne sont pas placées le long d'un mur, si on limite la zone de travail d'un seul côté de la «baseline» reliant les deux balises RBS, il est possible de rejeter les solutions se trouvant de l'autre côté.

7.1.5 Méthode de trilatération utilisée

Puisqu'une partie des erreurs de positionnement peut être attribuée à la méthode de calcul, les positions obtenues à l'aide du logiciel DiveBase sont ici comparées aux positions obtenues à l'aide d'un algorithme de trilatération séparée, nommé ci-après Algorithme de Trilatération de l'IREQ (ATI). L'utilisation d'un calcul de trilatération séparé de DiveBase permettra également une plus grande flexibilité lorsque le système de positionnement ultrasonique sera incorporé avec les autres systèmes de positionnement du sous-marin. Voici donc la présentation du développement mathématique utilisé pour l'ATI.

La méthode est basée sur l'intersection de trois sphères comme présenté à la Section 2.3. Afin de simplifier les équations des sphères, l'origine du système de coordonnées est placée à la position d'une première balise RBS. Une ligne reliant cette première balise à une deuxième forme l'axe X . La position de la troisième balise RBS est utilisée pour former le plan $z = 0$. En fonction de ces simplifications, les équations simplifiées des trois sphères peuvent être exprimées comme les Équations (7.1), (7.2) et (7.3).

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (7.1)$$

$$r_2^2 = (x - D_{1-2})^2 + y^2 + z^2 \quad (7.2)$$

$$r_3^2 = (x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2 \quad (7.3)$$

Où :

- x, y et z sont respectivement les positions selon l'axe X, Y et Z ;
- D_{1-2} est la distance entre la première et la deuxième balise RBS ;
- r_1, r_2 et r_3 sont les distances entre la balise TLT et chaque balise RBS ;
- i et j sont respectivement les positions selon l'axe X et Y de la troisième balise RBS dans le système de coordonnées du calcul de trilatération.

Lorsqu'on isole x, y et z , les Équations (7.4), (7.5) et (7.6) sont obtenues.

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + D_{1-2}^2}{2 \cdot D_{1-2}} \quad (7.4)$$

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2 \cdot j} - \frac{i \cdot x}{j} \quad (7.5)$$

$$z = \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (7.6)$$

Il est possible que les balises RBS soient placées dans un système de coordonnées qui ne correspond pas à celui utilisé pour les simplifications des équations des sphères. C'est à dire que la première balise RBS n'est pas à l'origine et l'axe X ne passe pas par la deuxième balise RBS. Afin de résoudre ces équations, il est préférable d'utiliser une forme vectorielle.

Chaque position de balise RBS est représentée par un vecteur. Les positions des balises RBS 1, 2 et 3 ont respectivement les vecteurs V_1, V_2 et V_3 . Ces coordonnées sont basées sur le système de coordonnées de la zone de travail. Dans le cas des tests en environnement réel, chaque vecteur contient donc des coordonnées selon les directions Est, Nord et Profondeur comme présenté aux Équations (7.7), (7.8) et (7.9).

$$V_1 = (Est_1, Nord_1, Profondeur_1) \quad (7.7)$$

$$V_2 = (Est_2, Nord_2, Profondeur_2) \quad (7.8)$$

$$V_3 = (Est_3, Nord_3, Profondeur_3) \quad (7.9)$$

La distance D_{1-2} est donc la norme du vecteur V_{1-2} qui relie la balise RBS 1 à la balise RBS 2. Ce vecteur est obtenu en effectuant la soustraction vectorielle entre les vecteur V_2 et V_1 comme présenté à l'Équation (7.10).

$$D_{1-2} = ||V_{1-2}|| = ||V_2 - V_1|| \quad (7.10)$$

Comme présenté à l'Équation (7.11), i correspond à la composante en X du vecteur V_{1-3} qui relie la balise RBS 1 à la balise RBS 3. Il est possible d'obtenir cette valeur en effectuant le produit scalaire de V_{1-3} et du vecteur unitaire de l'axe X, \hat{V}_x .

$$i = V_{1-3} \cdot \hat{V}_x \quad (7.11)$$

Puisque l'axe X est défini comme l'axe qui passe par la balise RBS 1 et la balise RBS 2, le vecteur unitaire de l'axe X est le vecteur unitaire de V_{1-2} . Cette relation est présentée à l'Équation (7.12).

$$\hat{V}_x = \hat{V}_{1-2} = \frac{V_{1-2}}{||V_{1-2}||} = \frac{V_2 - V_1}{||V_2 - V_1||} \quad (7.12)$$

V_{1-3} est le vecteur qui commence à la balise RBS 1 et qui finit à la balise RBS 3. Il est donc égal à la soustraction vectorielle entre le vecteur V_3 et V_1 . Cette relation est exprimée à l'Équation (7.13).

$$V_{1-3} = V_3 - V_1 \quad (7.13)$$

Si on remplace les termes de l'Équation (7.11) par les Équations (7.12) et (7.13), on trouve l'Équation (7.14).

$$i = (V_3 - V_1) \cdot \frac{V_2 - V_1}{||V_2 - V_1||} \quad (7.14)$$

De façon semblable à i , j correspond à la composante en y du vecteur V_{1-3} qui relie la balise RBS 1 à la balise RBS 3. Il est possible d'obtenir cette valeur en effectuant le produit scalaire de V_{1-3} et du vecteur unitaire de l'axe Y , \hat{V}_y . Cette relation correspond à l'Équation (7.15).

$$j = V_{1-3} \cdot \hat{V}_y \quad (7.15)$$

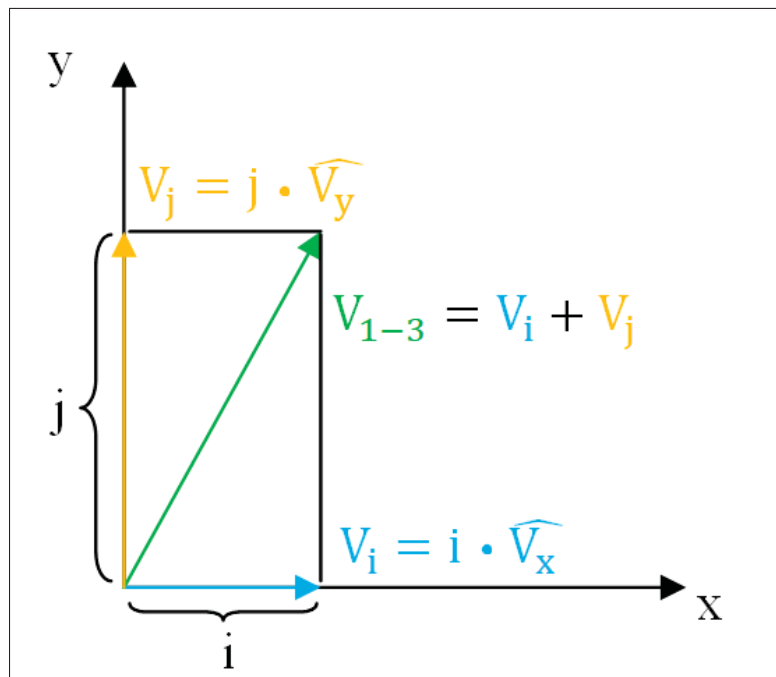


Figure 7.1 Représentation graphique de V_{1-3} , i et j

Puisque i et j sont respectivement les composantes en X et Y de V_{1-3} , comme présenté graphiquement à la Figure 7.1, V_{1-3} peut être décomposé comme à l'Équation (7.16). Pour la même raison, V_i peut être exprimé comme à l'Équation (7.17). Si on isole V_j dans l'Équation (7.16) et qu'on remplace l'Équation (7.17) dans cette dernière, on obtient l'Équation (7.18).

$$V_{1-3} = V_i + V_j \quad (7.16)$$

$$V_i = i \cdot \hat{V}_x \quad (7.17)$$

$$V_j = i \cdot \hat{V}_x - V_{1-3} \quad (7.18)$$

Puisque V_j et V_y sont des vecteurs sur l'axe Y, leur vecteur unitaire est identique. Cette relation est exprimée à l'Équation (7.19).

$$\hat{V}_y = \hat{V}_j = \frac{V_j}{\|V_j\|} \quad (7.19)$$

Si on utilise les Équations (7.13), (7.14), (7.18) et (7.19) pour décomposer complètement l'Équation (7.15), on obtient l'Équation (7.20).

$$j = (V_3 - V_1) \cdot \frac{i \cdot \frac{V_2 - V_1}{\|V_2 - V_1\|} - (V_3 - V_1)}{\|i \cdot \frac{V_2 - V_1}{\|V_2 - V_1\|} - (V_3 - V_1)\|} \quad (7.20)$$

En utilisant les Équations (7.10), (7.14) et (7.20) dans les Équations (7.4) et (7.5), il est possible de résoudre les Équations (7.4), (7.5) et (7.6). Seules les valeurs de V_1 , V_2 , V_3 , r_1 , r_2 et r_3 sont requises. Dans le cas de V_1 , V_2 et V_3 , ce sont les positions des balises RBS qui sont des constantes connues. Pour les distances r_1 , r_2 et r_3 , elles sont les variables de l'équation. Leurs valeurs sont fournies par le système de positionnement.

La Figure 7.2 présente donc en exemple les résultats du cas de figure 3 calculés par DiveBase et par l'ATI.

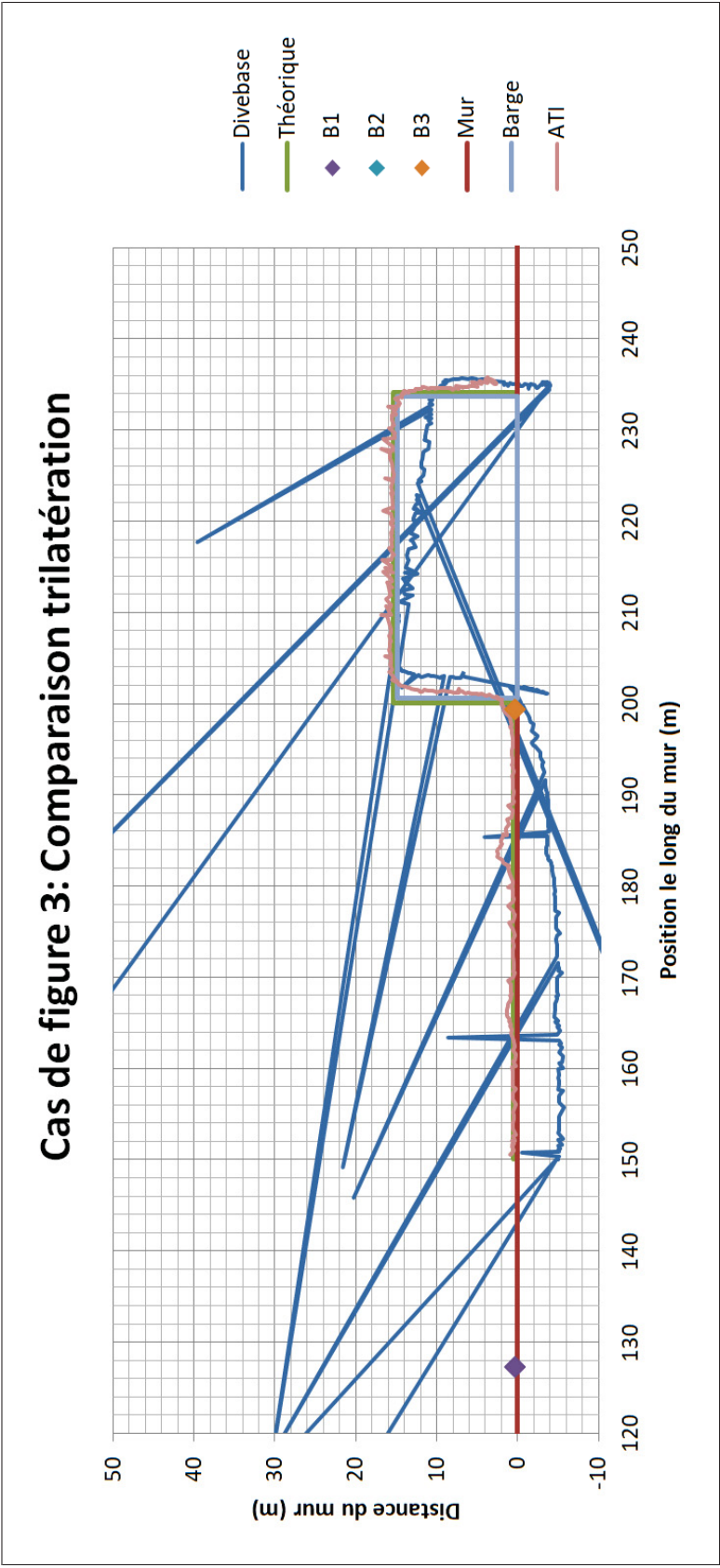


Figure 7.2 Comparaison des méthodes de calcul de position

Les déformations et les translations du trajet observées avec les résultats de DiveBase sont toujours présentes avec le calcul de positions avec l'ATI. Cependant, elles sont de moins grande importance. De plus, les valeurs aberrantes sont également présentes. Comme il en a été question à la Figure 6.4, les positions aberrantes sont causées par des valeurs de distances aberrantes. Puisque ces valeurs de distances sont également utilisées pour le calcul de position externe, il est normal que des positions aberrantes soient encore présentes. Les positions aberrantes obtenues grâce au calcul ATI sont pratiquement uniquement selon l'axe Y. Les positions aberrantes de DiveBase sont selon les deux axes. Puisqu'aucune information n'est disponible sur la méthode de calcul de position de DiveBase, il est impossible de cibler exactement la source de ces deux phénomènes. Ceci rappelle qu'un système commercial, malgré son prix, n'est pas parfait et qu'il est possible d'améliorer les résultats. C'est donc ces résultats de l'ATI qui sont utilisés pour évaluer l'impact des pistes d'améliorations.

7.2 Impact des pistes d'améliorations

Dans cette section sont présentés individuellement les effets de chaque piste d'amélioration à l'aide du cas de figure 5. Voici donc à la Figure 7.3 une comparaison des résultats de DiveBase avec les résultats obtenus à l'ATI.

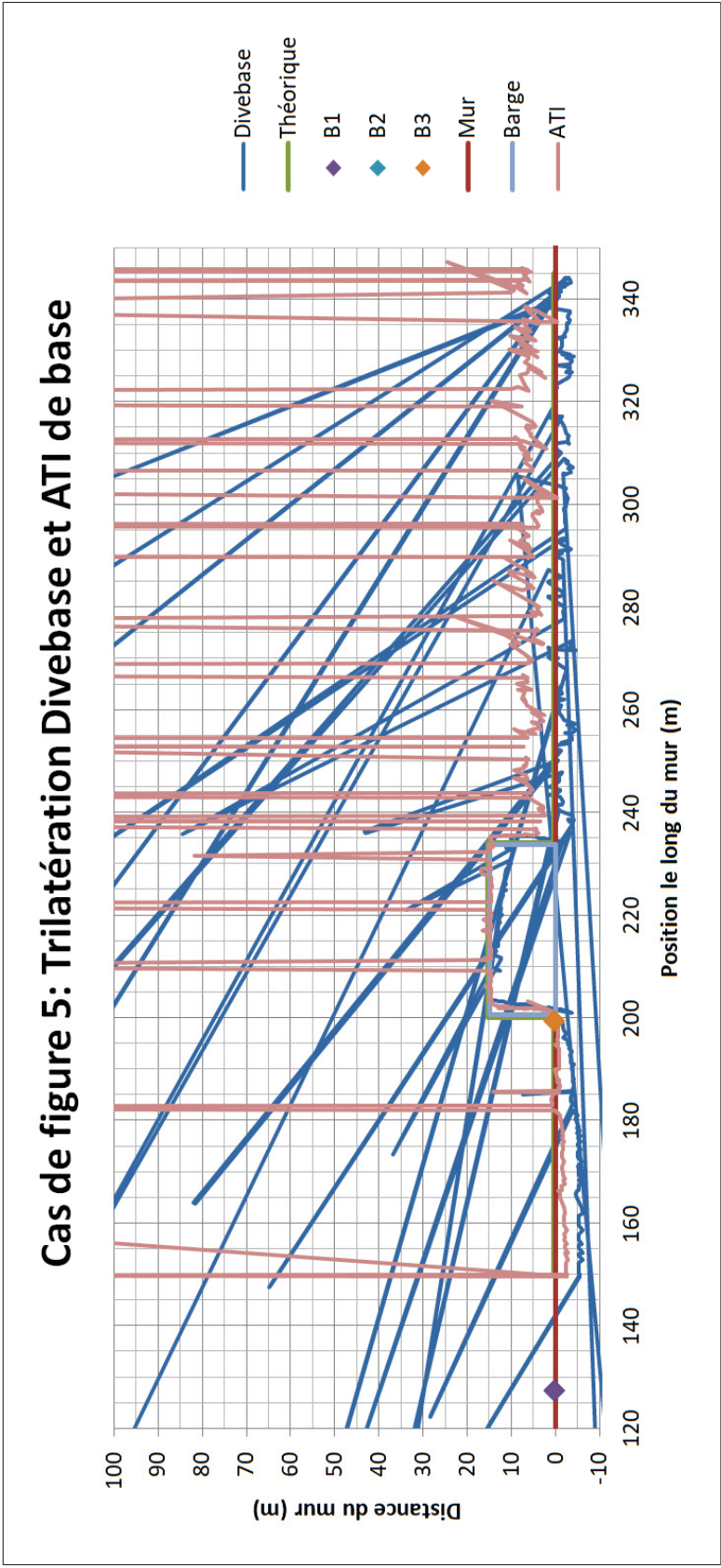


Figure 7.3 Comparaison des résultats de trilatération de DiveBase vs ATI

7.2.1 Calibration

Les résultats présentés à la Figure 7.4 sont significativement plus proche des positions théoriques surtout à gauche et autour de la barge. Un aspect important est que le facteur de correction des balises RBS n'est pas le même. En effet, les balises B1, B2 et B3 ont respectivement 0,987, 0,994 et 0,983 comme facteurs de correction. Cela implique que l'environnement n'est pas identique entre les différentes balises RBS et la balise mobile TLT, ce qui introduit des délais différents. De plus, les facteurs obtenus pour la calibration des autres cas de figures sont également variables. Cela démontre l'importance de refaire une calibration lorsque les conditions changent.

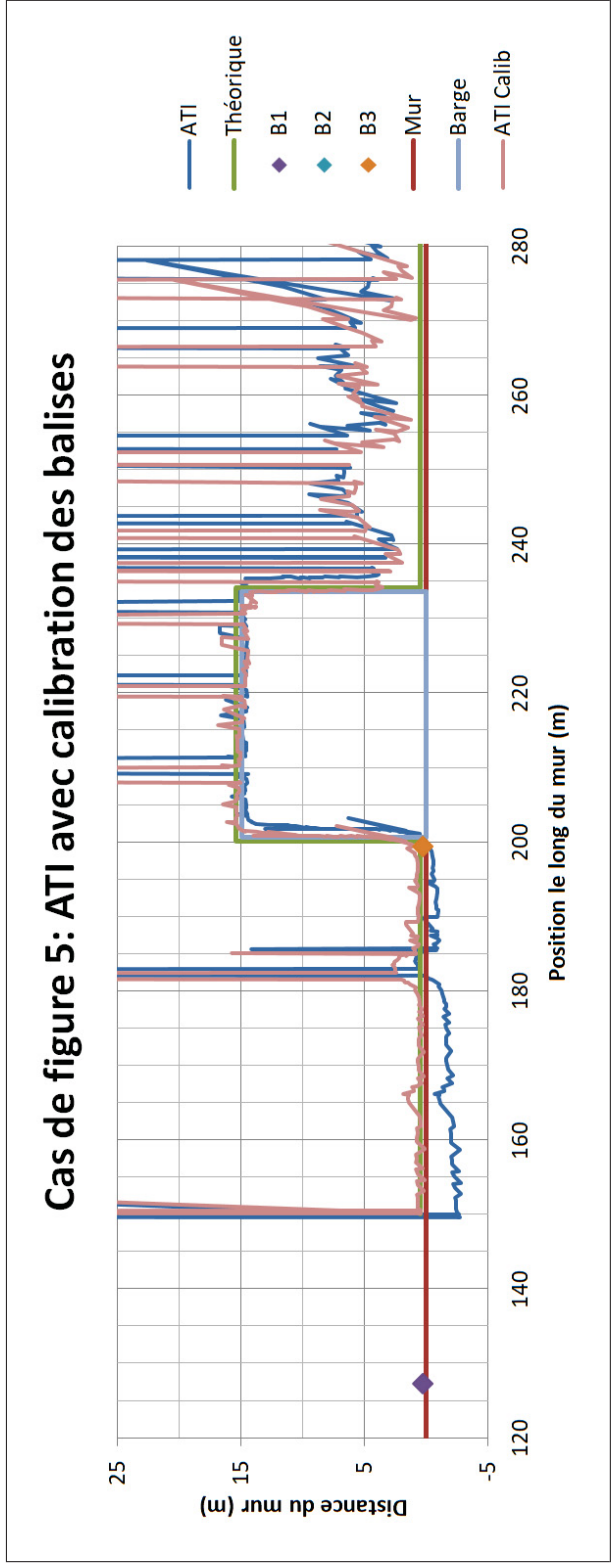


Figure 7.4 Impact de la calibration des balises fixes

7.2.2 Élimination des positions aberrantes basée sur la vitesse maximale

À la Figure 7.5, il est possible d'observer l'effet de l'élimination des positions qui ne respectent pas une vitesse de déplacement maximale de 3 m/s. La courbe de positions calculées est superposée, les positions aberrantes en moins, aux résultats de la trilatération externe. La valeur limite de 3 m/s est ici basée sur la vitesse approximative maximale selon les conditions du test.

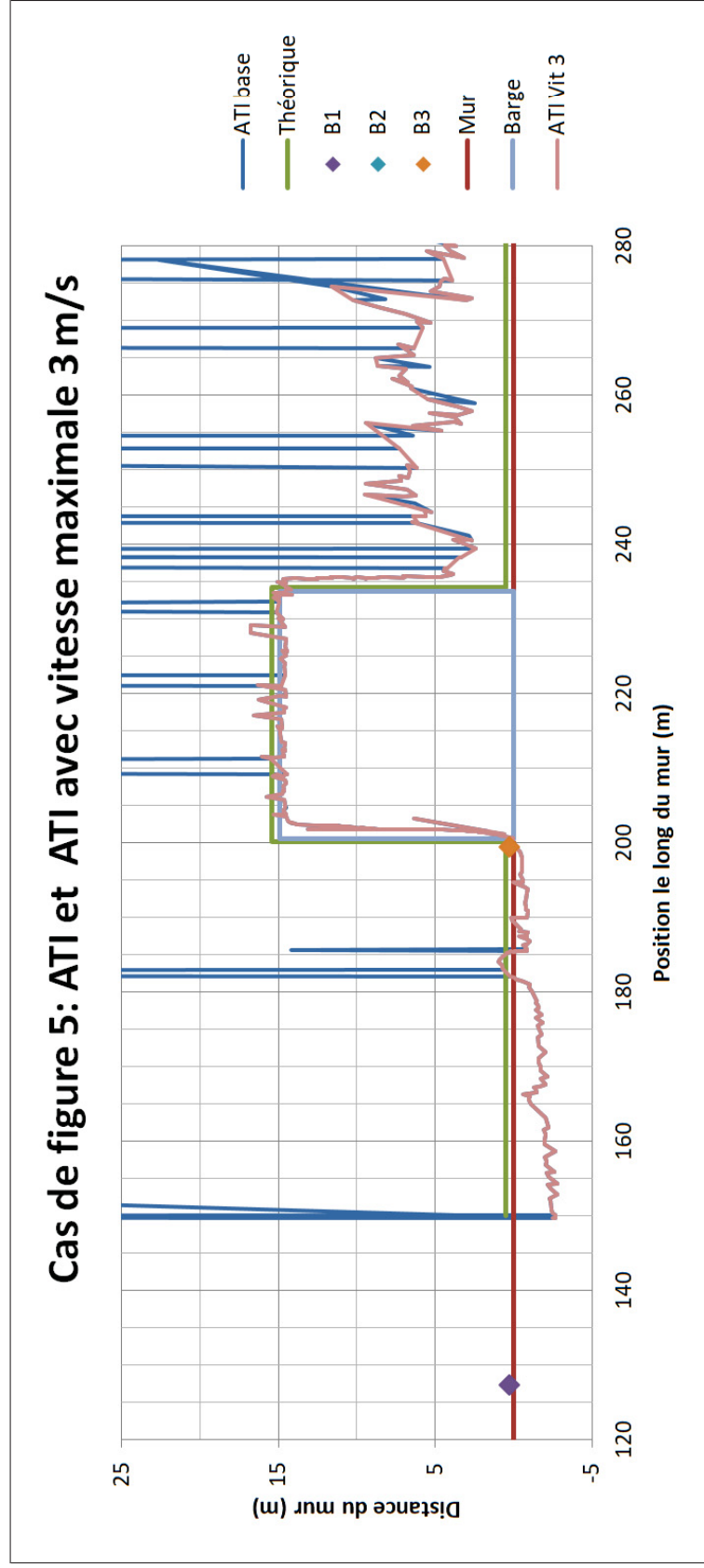


Figure 7.5 Élimination des positions aberrantes basée sur la vitesse maximale de 3 m/s

La Figure 7.6 présente les résultats obtenus en limitant les composants en Y à 0, Comme mentionné à la Section 7.2.2, la modification des positions en se basant sur les limites physiques a eu un impact seulement sur les positions qui étaient proches du mur. Considérant l'impact que la calibration et l'élimination des positions aberrantes basée sur la vitesse maximale, la modification des positions basée sur les limites physiques pourrait être négligeable. Cependant, certaines positions seront quand même améliorées lorsque le sous-marin est le long des murs. Pour cette raison, l'utilisation des limites physiques demeure pertinente.

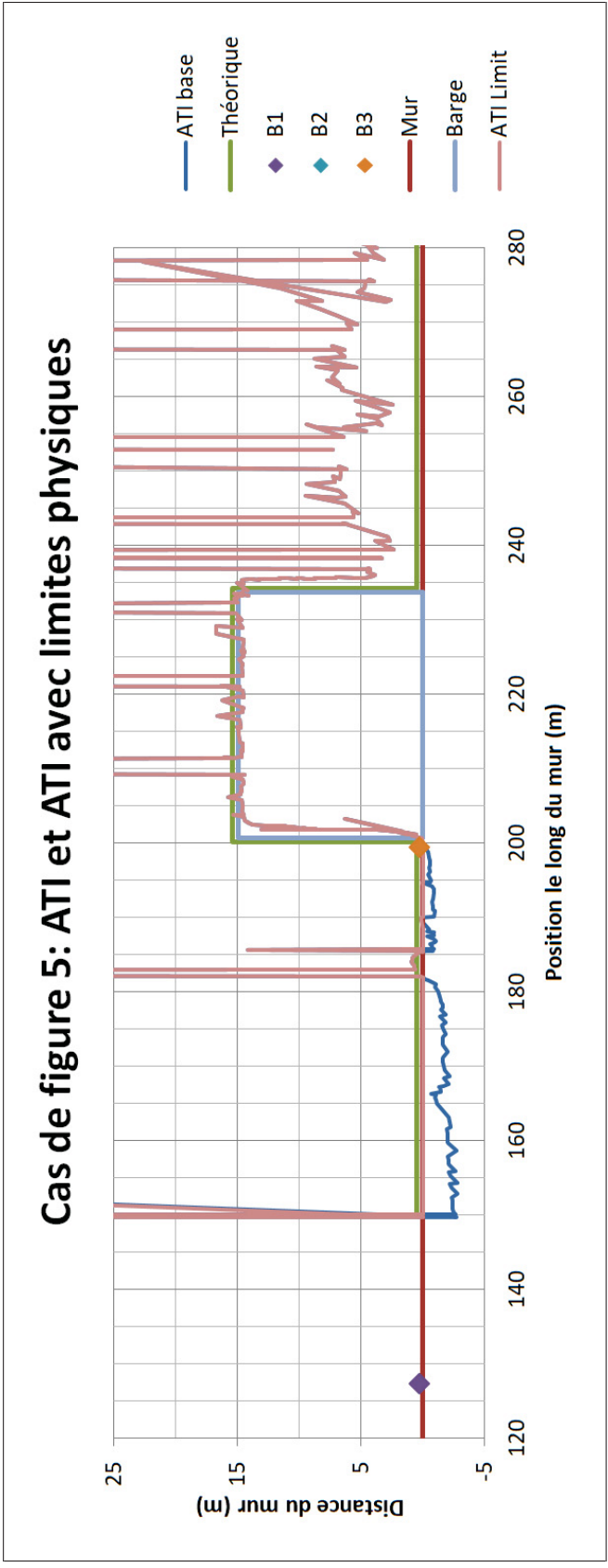


Figure 7.6 Correction des positions basée sur les limites physiques

7.2.4 Moyenne mobile

Pour la Figure 7.7, afin de mieux observer les effets de la moyenne mobile, les résultats de référence sont les positions suite à la trilatération ATI, à la calibration et l'utilisation d'une vitesse maximale de 3 m/s. Lorsque les trois dernières positions sont utilisées, seuls les pics très spontanés sont lissés. Il n'y a pratiquement pas de dégradation de la finesse du trajet.

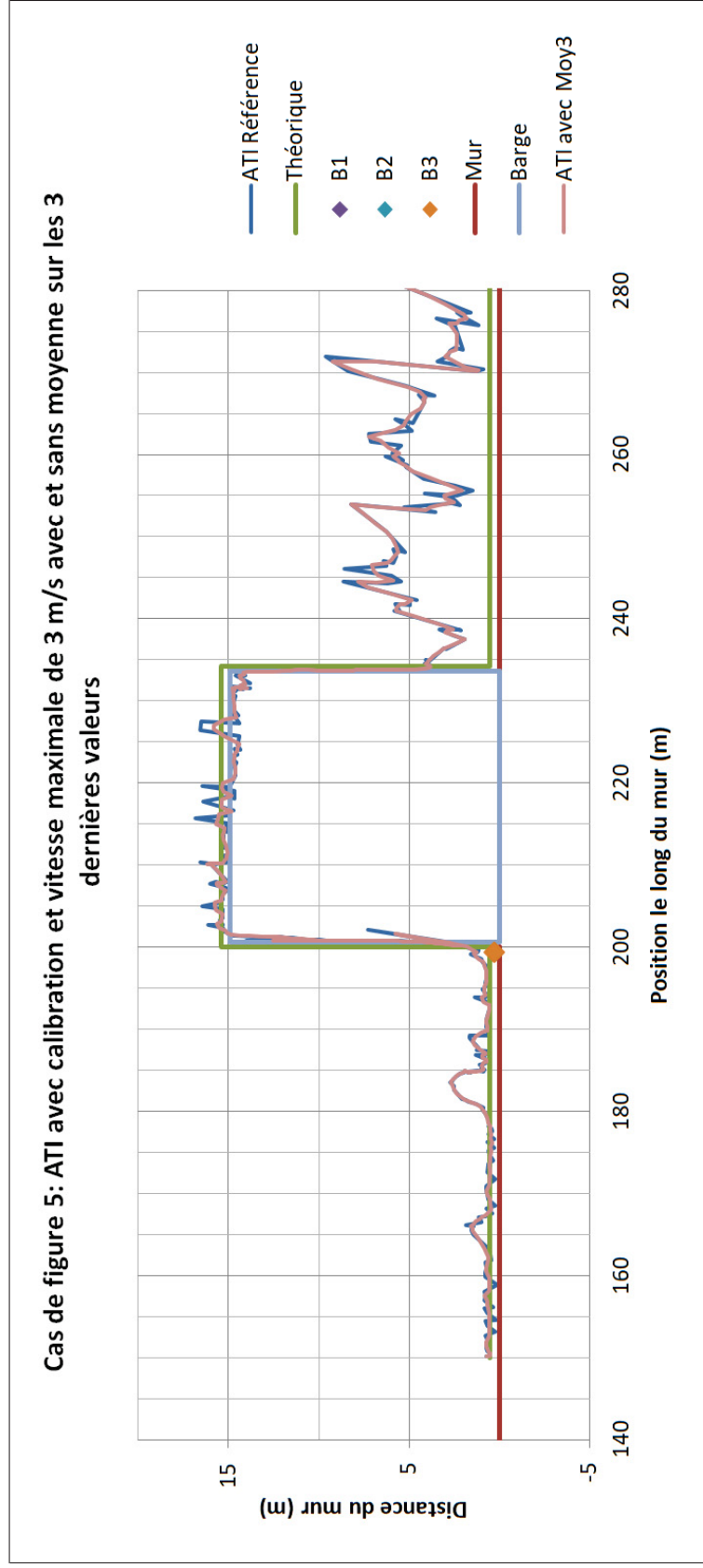


Figure 7.7 Moyenne mobile basée sur des valeurs antérieures

La Figure 7.8 présente l'impact que peut avoir l'augmentation du nombre de positions antérieures pour le calcul de la moyenne mobile. Entre trois et dix positions, le trajet reste relativement fidèle au trajet de référence. Il y a une amélioration notable à droite de la barge, là où les résultats sont en dents de scie. Avec l'utilisation des vingt dernières positions, le trajet est significativement altéré. Par exemple, les coins de la barge sont coupés. L'utilisation de dix positions antérieures ou moins est donc acceptable.

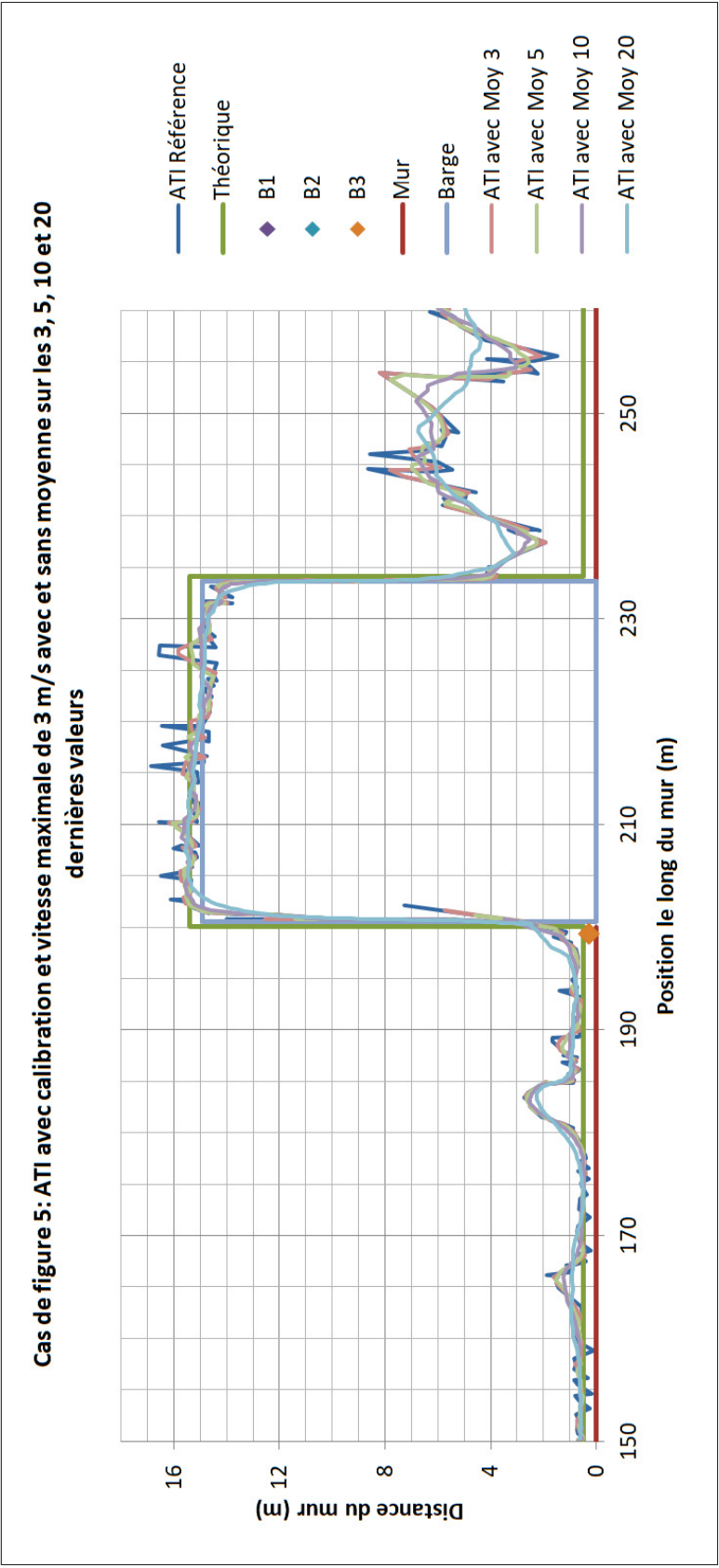


Figure 7.8 Comparaison du nombre d'échantillons des moyennes mobiles

7.2.5 Résultats des cas de figures suite aux corrections

Cette section présente les cas de figure 1, 2 et 3 avec les différentes pistes d'améliorations présentés aux Sections 7.1.1, 7.1.2 et 7.1.3. Une calibration des balises RBS a été faite avant le test. La vitesse maximale de 3 m/s est utilisée pour éliminer les positions aberrantes. Une moyenne mobile basée sur les dix dernières positions est utilisée. La limite physique du mur est également utilisée, mais n'a eu aucun impact puisque l'ensemble des positions pour ces trois cas de figure étaient à l'intérieur de la limite. Les trois cas de figures 1, 2 et 3 sont présentés respectivement aux Figures 7.9, 7.10 et 7.11. Dans les trois cas, il y a une nette amélioration des performances des résultats (légende ATI+). Les déformations du trajet sont éliminées par la calibration des balises RBS. Les trajets sont également à l'intérieurs des limites physiques. La limitation par les limites physiques n'a pas été utile dans ces cas. La calibration des balises a elle seule était suffisante. Les valeurs aberrantes sont éliminées basé sur la vitesse maximale de 3 m/s. Les petites oscillations le long du trajet sont réduites par la moyenne mobile. La section du trajet entre les deux balises RBS à gauche de la barge présente 3 déviations du trajet théorique. Ces déviations sont causées par la présence de pneus disposés le long du mur.

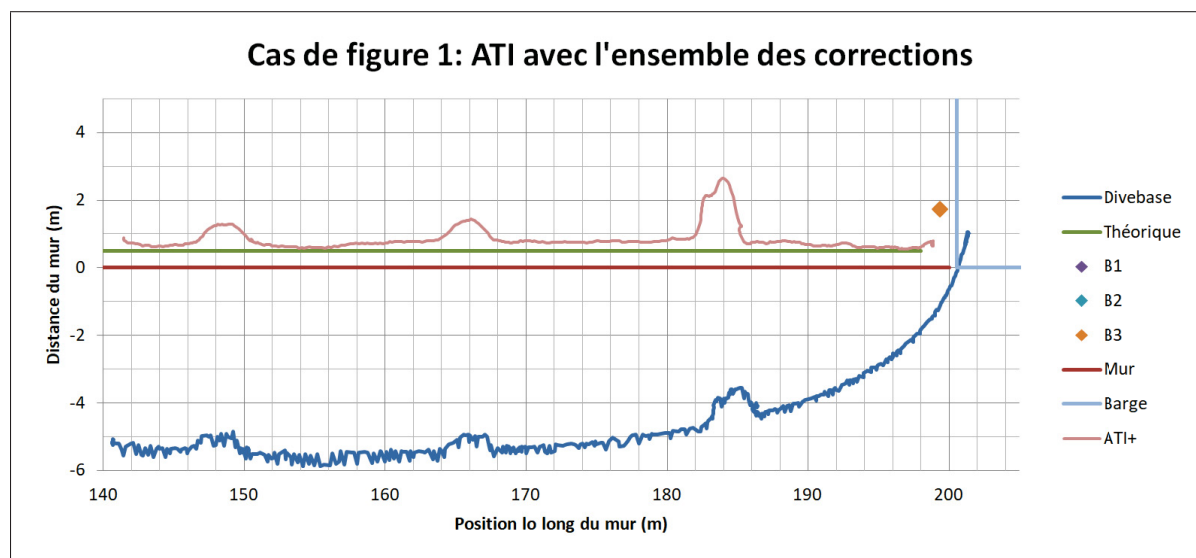


Figure 7.9 Cas de figure 1 avec correctifs

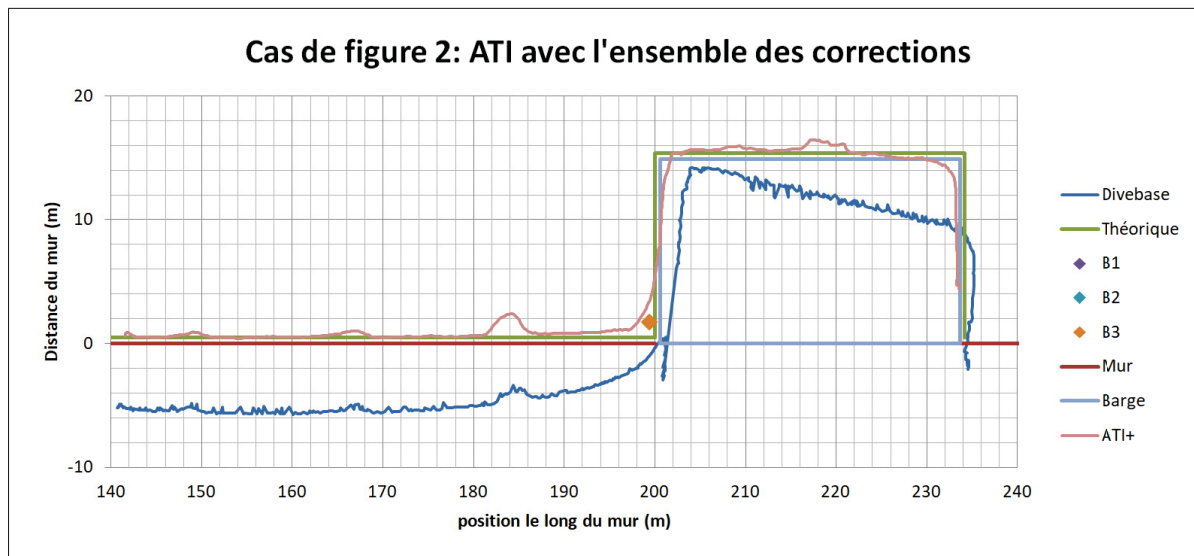


Figure 7.10 Cas de figure 2 avec correctifs

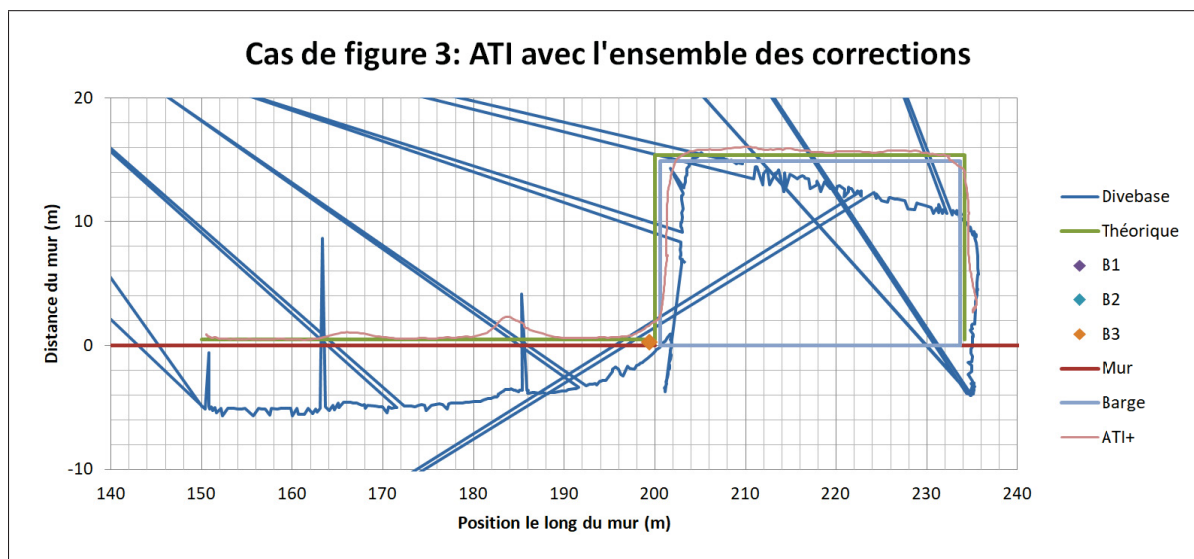


Figure 7.11 Cas de figure 3 avec correctifs

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le présent travail avait pour objectif d'améliorer les performances du système de positionnement ultrasonique SouthStar lorsqu'utilisé pour positionner le sous-marin MASKI+ dans son environnement d'utilisation typique, qui est principalement autour des installations immergées d'Hydro-Québec. Les installations immergées sont principalement des barrages hydroélectriques et des digues de rétention pour les réservoirs. L'environnement où est principalement utilisé le MASKI+ est donc en eau douce et à des profondeurs inférieures à 300 m.

Afin de bien comprendre le contexte d'utilisation du système, une présentation des DVLs et des centrales inertielles a été faite. Cette présentation a permis de mettre en lumière les avantages et les inconvénients des technologies de positionnement relatif. Les avantages et les inconvénients principaux sont respectivement leurs grande précision d'une position à l'autre et l'accumulation des erreurs dans le temps. En général, pour les systèmes de positionnement ultrasonique, les caractéristiques inverses sont présentes. En effet, les systèmes de positionnement ultrasonique sont des systèmes de positionnement absolu. Les nouvelles positions ne dépendent donc pas des positions antérieures. Il n'y a ainsi pas d'accumulation d'erreur. Il y a donc un avantage à utiliser les deux types de systèmes de positionnement conjointement.

Les différents types de systèmes de positionnement ultrasonique, LBL, SBL et USBL ont par la suite été présentés plus en détails. Les différents facteurs qui peuvent affecter les performances d'un système de positionnement ultrasonique sont la vitesse du son dans l'eau et le positionnement des balises de référence. Pour la vitesse du son dans l'eau, c'est plus spécifiquement sa variation et les effets que cela peut avoir sur la propagation des pulsations ultrasoniques qui a de l'importance.

Le système SouthStar a par la suite été présenté. En termes de principe de fonctionnement, ce qui le différencie d'un système LBL standard est l'utilisation d'une source de pulsation unique pour réaliser le positionnement. En effet, seule la balise à localiser émet des pulsations

ultrasoniques. Les balises de référence ne répondent pas à la balise qu'il faut localiser. L'avantage de cette méthode de fonctionnement est d'éviter l'accumulation d'imprécisions liées à la propagation des pulsations ultrasoniques pour la réponse des balises de référence.

Afin de positionner les balises de référence pour maintenir une position stable, un système de déploiement a été conçu pour optimiser la performance du système de positionnement. La conception du système de déploiement a dû tenir compte des multiples contraintes associées à l'utilisation du système de positionnement dans l'environnement typique du sous-marin. Le concept choisi fut un cadre monté sur roues qui s'appuient sur les murs des installations immergées et qui est ancré au sommet de ces derniers. Le cadre était assez léger pour être déplacé par une ou deux personnes. De plus il permettait de modifier la profondeur des balises de référence en plus de la distance qui les séparaient des murs. Enfin, le système de déploiement fut conçu pour être désassemblé afin de faciliter son transport d'un site d'inspection à l'autre.

Avant de tester le système de déploiement et d'évaluer les performances du système dans un environnement réel, des tests en piscine ont été réalisés afin de valider le bon fonctionnement du système de positionnement. Ces tests ont permis de faire ressortir les faiblesses du système vendu par Desert Star Systems, comme des problèmes logiciels et des limitations de modifications de paramètres importants. Tel qu'il est présentement, le système de positionnement est trop puissant pour être utilisé dans une piscine de test. En effet, afin de permettre son utilisation dans une piscine, il faudrait pouvoir réduire la puissance d'émission des pulsations. Les modules FRF ont dû être modifiées pour permettre une alimentation externe. L'autonomie des batteries était insuffisante et variait d'une balise à l'autre. De plus, l'avertissement en cas de batterie faible survenait après la perte de fonctionnalité des balises. Pour ce qui est de la partie logicielle du système, les logiciels DiveBase et SouthStar sont fonctionnels, mais sans plus. Il y avait de nombreuses erreurs logicielles, et ce autant au niveau de l'affichage que du fonctionnement des logiciels eux-mêmes.

Pour donner suite à la validation du fonctionnement de base du système de positionnement, des tests en environnement réel ont été réalisés au Port de Montréal. Ils ont permis de valider l'influence de certains paramètres de déploiement comme la distance entre les murs et les balises de référence, la profondeur de ces dernières et le comportement du système lorsqu'une balise de référence rencontre des problèmes. Pour ce qui est des distances des murs et de la profondeur, il a été observé qu'il est préférable d'utiliser les distances recommandées par le fabricant. Cependant, lorsque requis, des dimensions plus petites pourraient être utilisées lorsque le traitement des données est utilisé et que des systèmes de positionnements externes sont utilisés conjointement avec le système de positionnement ultrasonique. Des tests supplémentaires sont requis pour statuer hors de tout doute sur les effets de la distance des capteurs par rapport au fond. Il en va de même pour la vitesse de déplacement de la balise TLT.

Différentes méthodes de traitement des données brutes ont été élaborées et implémentées avec succès pour améliorer les performances du système. Les données provenant des tests en environnement réel ont donc été ajustées en utilisant les facteurs de correction obtenus à la suite de la calibration de chaque balise RBS. Ces mêmes données brutes ont également été filtrées pour retirer les valeurs aberrantes en utilisant un critère de vitesse maximale de déplacement. Les oscillations et les déformations du trajet sont des aspects qui ont également été améliorés. Il a été démontré que les performances du système de positionnement sont significativement améliorées à la suite des efforts déployés dans le cadre du présent travail comparativement au système commercial original.

Pour conclure, un système de déploiement a spécialement été conçu spécifiquement pour l'utilisation du système de positionnement ultrasonique dans l'environnement typique d'utilisation du sous-marin MASKI+. Les paramètres d'utilisation de ce système de déploiement ont été établis grâce à des tests en environnement réel. De plus, des pistes de solution pour l'optimisation des performances du positionnement ont été testées avec succès avec les données

recueillies pendant les tests en environnement réel. L'hypothèse qu'il est possible d'améliorer les performance d'un système de positionnement commercial est validée.

ANNEXE I

COEFFICIENTS UTILISÉS AVEC LA FORMULE DE CHEN ET MILLERO

Voici la table des coefficients utilisés avec la formule de Chen et Millero.

Tableau-A I-1 Coefficients utilisés avec la formule de Chen et Millero
Valeurs tirées de (Chen & Millero, 1977).

Coefficients	Valeurs numériques	Coefficients	Valeurs numériques
C00	1402,388	A02	7,166E-5
C01	5,03830	A03	2,008E-6
C02	-5,81090E-2	A04	-3,21E-8
C03	3,3432E-4	A10	9,4742E-5
C04	-1,47797E-6	A11	-1,2583E-5
C05	3,1419E-9	A12	-6,4928E-8
C10	0,153563	A13	1,0515E-8
C11	6,8999E-4	A14	-2,0142E-10
C12	-8,1829E-6	A20	-3,9064E-7
C13	1,3632E-7	A21	9,1061E-9
C14	-6,1260E-10	A22	-1,6009E-10
C20	3,1260E-5	A23	7,994E-12
C21	-1,7111E-6	A30	1,100E-10
C22	2,5986E-8	A31	6,651E-12
C23	-2,5353E-10	A32	-3,391E-13
C24	1,0415E-12	B00	-1,922E-2
C30	-9,7729E-9	B01	-4,42E-5
C31	3,8513E-10	B10	7,3637E-5
C32	-2,3654E-12	B11	1,7950E-7
A00	1,389	D00	1,727E-3
A01	-1,262E-2	D10	-7,9836E-6

BIBLIOGRAPHIE

- Balac, K., M. Prevostini, et M. Malek. Nov 2015. « Optimizing Sensor Nodes Placement for Fault-Tolerant Trilateration-Based Localization ». In *2015 IEEE 21st Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC)*. p. 109-118.
- Beaudry, J., L. Provencher, P. Richard, S. Gendron, D. Thuot, et M. Blain. Oct 2010. « Robotic rectification of underwater structural elements in power dams ». In *2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*. p. 1-7.
- Bingham, B. Oct 2009. « Predicting the navigation performance of underwater vehicles ». In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. p. 261-266.
- Blouin, S. Novembre 2015. *Bedford basin sound speed profiles*. Report.
- Casalino, G., A. Turetta, E. Simetti, et A. Caiti. May 2010. « RT2 : A Real-Time Ray-Tracing method for acoustic distance evaluations among cooperating AUVs ». In *OCEANS'10 IEEE SYDNEY*. p. 1-8.
- Chen, C.-T. et F. J. Millero. 1977. « Speed of sound in seawater at high pressures ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, n° 5, p. 1129-1135.
- Cohen, I. Sep. 2004. « Speech enhancement using a noncausal a priori SNR estimator ». *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 11, n° 9, p. 725-728.
- Coppens, A. B. 1981. « Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 69, n° 3, p. 862-863.
- Del Grosso, V. A. 1974. « New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations) ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 56, n° 4, p. 1084-1091.
- Desert Star Systems. 2013. Southstar seafloor operator's manual. <<http://www.desertstar.com/southstar.html>>.
- Diamant, R. et L. Lampe. 2013. « Underwater Localization with Time-Synchronization and Propagation Speed Uncertainties ». *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, n° 7, p. 1257-1269.
- Génévé, L., O. Kermorgant, et É. Laroche. 2017. « Limits of trilateration-based sensor placement algorithms ». In *2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. p. 1-6.
- GoogleMap. 2017. « Bickerdike Satellite image ».
- International Hydropower Association. 2017. « Limits of trilateration-based sensor placement algorithms ». <<https://www.hydropower.org/country-profiles/china>>.

- Khalajmehrabadi, A., D. Akopian, et D. Pack. April 2016. « Range-based trilateration using multipurpose cost function optimization with Lagrangian multipliers ». In *2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. p. 118-121.
- LaPointe, C. E. 2006. *Virtual long baseline (vlbl) autonomous underwater vehicle navigation using a single transponder*. Report.
- Li, Z., S. E. Dosso, et D. Sun. Oct 2015. « Compensation of vehicle motion influence in a long baseline system field trial ». In *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*. p. 1-5.
- Liu, K., Y. Huang, Y. Zhao, S. Cui, X. Wang, et G. Wang. Oct 2015. « Research on error correction methods for the integrated navigation system of deep-sea human occupied vehicles ». In *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*. p. 1-5.
- Mackenzie, K. V. 1981. « Nine-term equation for sound speed in the oceans ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70, n° 3, p. 807-812.
- Monteiro, L. S., T. Moore, et C. Hill. 2005. « What is the accuracy of DGPS? ». *Journal of Navigation*, vol. 58, n° 2, p. 207-225.
- Moreaud, U., P. Courmontagne, F. Chaillan, et J. R. Mesquida. 2016. « Performance assessment of noise reduction methods applied to underwater acoustic signals ». In *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*. p. 1-15.
- National Coordination Office for Space-Based Positioning Navigation and Timing. Juin 2014. « Augmentation Systems ». <<http://www.gps.gov/systems/augmentations/>>.
- Olson, E., J. J. Leonard, et S. Teller. 2006. « Robust Range-Only Beacon Localization ». *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 31, n° 4, p. 949-958.
- Paull, L., S. Saeedi, M. Seto, et H. Li. 2014. « AUV Navigation and Localization : A Review ». *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, n° 1, p. 131-149.
- Provencher, L. et S. Sarraillon. 2016. « The MASKI+ underwater inspection robot : A new generation ahead ». In *2016 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI)*. p. 1-6.
- Provencher, L., S. Sarraillon, et M. Montfrond. 2015. « Robot sous-marin d'inspection MASKI+ : une technologie d'Hydro-Québec ».
- Ramezani, H. et G. Leus. 2012. « Ranging in an Underwater Medium with Multiple Isogradient Sound Speed Profile Layers ». *Sensors*, vol. 12, n° 3, p. 2996-3017.
- Scherbatyuk, A. P. 1995. « The AUV positioning using ranges from one transponder LBL ». In *OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings*. p. 1620-1623 vol.3.

- Seaton, K. L. 2013. « Acoustic tracking of an unmanned underwater vehicle using a passive ultrashort baseline array and a single long baseline beacon ». M.s., Florida Atlantic University. <<http://search.proquest.com/docview/1418021515?accountid=27231>>.
- Sun, C., D. Mao, T. Zhao, X. Shang, Y. Wang, et M. Duan. 2015. « Investigate Deepwater Pipeline Oil Spill Emergency Repair Methods ». *Aquatic Procedia*, vol. 3, p. 191-196.
- Teledyne RD Instruments. 2008. « Navigation Product Selection Guide ». <http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/nav_ps_guide_lr.pdf>.
- Tobe, F. 2013. « Ship hull cleaning & inspection ideal for robots ». <<https://www.therobotreport.com/ship-hull-cleaning-inspection-ideal-for-robots/>>.
- Turetta, A., G. Casalino, E. Simetti, A. Sperindè, et S. Torelli. 2014. « Analysis of the accuracy of a LBL-based underwater localization procedure ». In *2014 Oceans - St. John's*. p. 1-7.
- Vickery, K. 1998. « Acoustic positioning systems. A practical overview of current systems ». In *Autonomous Underwater Vehicles, 1998. AUV'98. Proceedings of the 1998 Workshop*. p. 5-17.
- Walker, B. et L. Qin. 2015. « China's shift from coal to hydro comes at a heavy price ». <<https://thediplomat.com/2015/07/the-hidden-costs-of-chinas-shift-to-hydropower/>>.
- Wang, X., K. Liu, Y. Lin, B. Liu, Y. Zhao, S. Cui, et X. Feng. 2015. « Iterated square root unscented Kalman filter and its application in deep sea vehicle navigation ». In *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*. p. 4880-4885.
- Wang, Y., Q. Li, J. Fu, et G. Liang. Jan 2016a. « Resolving range ambiguity in long baseline synchronous acoustic positioning ». In *2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA)*. p. 1-5.
- Wang, Y., C. Xu, H. Xu, H. Zhao, et J. Liu. Dec 2016b. « An integrated navigation algorithm for AUV based on Pseudo-range measurements and error estimation ». In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. p. 1625-1630.
- Yang, F., X. Lu, J. Li, L. Han, et Z. Zheng. 2011. « Precise Positioning of Underwater Static Objects without Sound Speed Profile ». *Marine Geodesy*, vol. 34, n° 2, p. 138-151.