



HAL
open science

Coopération de flotte de planeurs sous-marins à des fins de GHOM et LSM

Aurélien Merci

► **To cite this version:**

Aurélien Merci. Coopération de flotte de planeurs sous-marins à des fins de GHOM et LSM. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Toulon (UTLN), La Garde, FRA., 2023. Français. NNT : . tel-04354255

HAL Id: tel-04354255

<https://hal.science/tel-04354255>

Submitted on 19 Dec 2023

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

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



THÈSE / UNIVERSITÉ DE TOULON

pour le grade de **DOCTEUR** en Automatique, Signal, Productique,
Robotique

École doctorale 548 Mer et Science

présentée par

Aurélien MERCI

préparée aux laboratoires COSMER & LIS (UMR CNRS 7020)
COncception de Systèmes Mécaniques et Robotiques & Laboratoire
d'Informatique et Systèmes

Coopération de flotte de planeurs sous-marins à des fins de GHOM et LSM

Thèse soutenue à Toulon
le 15 décembre 2023

devant le jury composé de :

Olivier Simonin

Professeur à l'INSA Lyon / *Rapporteur*

Lionel Lapierre

Professeur à l'ENSTA Bretagne / *Rapporteur*

Gérard Poisson

Professeur à l'Université d'Orléans / *Examineur*

Guillaume Allibert

Professeur des Universités à l'Université Côte d'Azur / *Examineur*

Yann Le Page

ALSEAMAR - ALCEN / *Invité*

Cyrille Vuilmet

Tuteur DGA / *Invité*

Florian Imperadori

Tuteur DGA / *Invité*

Cédric Anthierens

Maître de conférences HDR à l'Université de Toulon / *Directeur de thèse*

Nadège Thirion-Moreau

Professeur à l'Université de Toulon / *Directrice de thèse*

C'est sur ces dernières lignes que s'achèvent mes travaux de thèse. Ce fût une aventure incroyable, riche en émotions et en rencontres, que je ne pensais pas réalisable il y a encore quelques années.

Je suis persuadé que ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans le soutien inconditionnel d'un grand nombre de personnes dans mon entourage dont la générosité, la bonne humeur et la confiance m'ont permis de progresser et d'en arriver là aujourd'hui.

Je tiens à remercier tout particulièrement Cédric ANTHIERENS et Nadège THIRION-MOREAU pour m'avoir encadré de manière formidablement complémentaire. J'admire la confiance que vous avez su me donner, la motivation que vous transmettez et les nombreux défis que nous avons réussi à résoudre sur ces quelques années de thèse passées ensemble. Je ne saurais vous remercier assez pour toute la disponibilité et le temps que vous avez su m'accorder sur ces dernières années.

Je remercie Yann LE PAGE et ALSEAMAR pour la confiance ainsi que le soutien financier qui a rendu possible ce projet de thèse. Je nous revois encore, Yann, à définir le sujet de cette thèse sur un coin de table à la fin de mon stage de fin d'étude. Je suis fier du chemin parcouru au sein de cette entreprise dans laquelle j'ai eu la chance de côtoyer des gens chaleureux et réellement passionnés par leurs travaux. Une petite pensée pour mes collègues grimpeurs avec qui c'était un réel plaisir d'échanger chaque jour.

Je tiens à remercier l'Agence Innovation de Défense pour leur soutien financier dans le cadre de cette thèse. Je tiens également à remercier la Direction Générale de l'Armement et mes deux tuteurs, Cyrille VUILMET et Florian IMPERADORI, pour leur appui et leur suivi sur ces années de thèse. Un immense merci à mon équipe au sein de la DGA-TN pour leur accueil et leur soutien en cette fin de thèse.

Je souhaite remercier les membres de mon jury d'avoir accepté de relire mes travaux. J'ai été particulièrement honoré que messieurs Olivier SIMONIN et Lionel LAPIERRE acceptent d'en être les rapporteurs, monsieur Gérard POISSON d'en avoir présidé le jury et monsieur Guillaume ALLIBERT d'en avoir été l'examineur. J'ai particulièrement apprécié la qualité des échanges et des remarques.

Je remercie mes compagnons de recherche, docteurs et futurs qui m'ont accompagné tout au long de ces années et qui ont fait de la salle des doctorants du bâtiment M ainsi que le bâtiment X (petite pensée pour le MAPIEM) un lieu de vie à part entière.

Merci à Charly pour ces années passées à travailler ensemble, pour ces moments de fous rires inarrêtables, ces moments d'intenses réflexions sur nos sujets de thèse respectifs et ces heures passées à grimper.

Je ne remercierai jamais assez mes amis : Cyril, Elliot, Quentin, Céline, William, Luka, Maxime L., Yann, Maxime D., Alexis, Bastien, Thibaud ... qui ont su répondre présent dans les bons moments comme dans les moments difficiles.

Je remercie également tous les membres de ma famille pour leurs encouragements.

À titre personnel, je tiens à remercier Iftian, l'élue de mon cœur, pour son soutien inconditionnel et pour avoir partagé avec moi ce doctorat.

Et enfin, je tiens à remercier mes parents de m'avoir soutenu toutes ces années et qui ont fait de mon bonheur leur raison de vivre et qui ont sacrifié tant pour que j'en sois là aujourd'hui.

Table des matières

Table des matières	1
Table des figures	3
Glossaire	7
Introduction	11
Contexte scientifique et industriel	12
Organisation du mémoire	15
Valorisation des travaux	16
1 État de l’art en robotique sous-marine	17
1.1 Les missions en robotique sous-marine	17
1.2 Catégories d’engins sous-marins	23
1.3 Le planeur sous-marin SeaExplorer	35
1.4 Problématiques détaillées	45
2 Simulateur de mission	49
2.1 Intérêt d’un simulateur	49
2.2 Développement du simulateur	52
2.3 Validation expérimentale et discussion	64
2.4 Conclusion	70
3 Planification de trajectoire	71
3.1 État de l’art des algorithmes de planification de trajectoire existants	73
3.2 Rappels de théorie des graphes et problème de routage	76
3.3 Contraintes et objectifs dans le cas de la gestion d’une flotte de planeurs	80
3.4 Détails des approches de génération automatique de trajectoire	81
3.5 Simulations numériques et discussion	94
3.6 Conclusion	104
4 Validation expérimentale en mission réelle	107
4.1 Choix et présentation de la zone d’opération	108
4.2 Planification des trajectoires en amont de mission	111
4.3 Préparation et déploiement des engins	117
4.4 Résultats et discussion	122
4.5 Conclusion	126

Conclusion générale & perspectives	129
Annexes	133
A Exemples de matrices d'adjacences	135
Bibliographie	151

Table des figures

1	Planeurs sous-marins	12
2	Flotte de SeaExplorer en mer	14
1.1	Collecte de données bathymétriques [130]	19
1.2	NEXXUS ROV effectuant une intervention sur une structure sous-marine [92]	21
1.3	ROV 30K de l'AURLab permettant d'aller jusqu'à 6000m de profondeur	24
1.4	ROV Victor 6000 de l'Ifremer	25
1.5	ROV Tortuga de Subsea Tech	26
1.6	ROV BlueROV2 de BlueRobotics	26
1.7	ROV Fifish V-EVO de Qysea	26
1.8	AUV Autosub6000 du NOC	28
1.9	AUV Hugin et Remus de Kongsberg	28
1.10	AUV Girona 500 de IQUARobotics	29
1.11	AUV YUCO et LAUV	29
1.12	Déploiement d'un planeur SeaExplorer en mer Méditerranée	30
1.13	Planeur Slocum de Teledyne Technologies	31
1.14	Planeur Spray de Bluefin Robotics	32
1.15	Planeur SeaExplorer d'Alseamar	32
1.16	Nombre de jours moyen en mer par déploiement des planeurs	33
1.17	Échelles spatio-temporelles de différentes plateformes	34
1.18	Exemple de parcours en boustrophédon [89]	35
1.19	Planeur SeaExplorer ouvert	35
1.20	Description du fonctionnement de la vessie et de la masse mobile	36
1.21	Niveau de contrôle du planeur	37
1.22	Description des angles et des vitesses	37
1.23	Les différentes phases de navigation	39
1.24	Équilibre statique des forces	40
1.25	Compensation de courant	41
1.26	Calcul de ΔH	41
1.27	Système de gestion de mission	42
1.28	Exemple de données de température accessibles depuis Marine Copernicus	43
1.29	Niveaux fonctionnels du SeaExplorer (planification, navigation, contrôle)	44
1.30	Couverture de zone manuelle avec 2 planeurs	46
2.1	Carte de courant de surface depuis Marine Copernicus [8]	50
2.2	Simulations sous AirSim et Flightmare	51
2.3	Simulations sous UWSim et StoneFish	51
2.4	Niveaux bathymétriques disponibles depuis Marine Copernicus [8]	53

2.5	Vue d'ensemble de la structure du simulateur	56
2.6	Représentation des données de courant	58
2.7	Résolution statique et système de coordonnées NED	59
2.8	Vue globale de l'IHM	64
2.9	Trajectoires 2D et 3D du planeur simulé	65
2.10	La mission SEA041 vue depuis le système GLIMPSE	66
2.11	Résultat de la simulation de la mission SEA041, 113 plongées	66
2.12	Comparaison de l'énergie restante entre la mission réelle et celle qui a été simulée	67
2.13	Comparaison des trajectoires entre la mission simulée et la mission réelle sur un transect donné	68
2.14	Résultat de la simulation de la mission de SEA041 avec $sr = 2$, 79 plongées	68
2.15	Résultat de la simulation de la mission SEA041 avec quatre capteurs supplémentaires et 113 plongées	69
3.1	Classification des algorithmes de planification en couverture de zone (CPP) [124]	74
3.2	Voisinages 4, 8, 16, graphe complet	77
3.3	Vue d'ensemble de l'architecture proposée pour la couverture de zone	82
3.4	Modélisation des données de courant pour plusieurs dates	82
3.5	Trajectoires générées par l'algorithme du chemin hamiltonien	84
3.6	Projection vectorielle	86
3.7	Calcul de la moyenne pondérée du courant	87
3.8	Influence du niveau de bathymétrie sur le profil de vol adaptatif	91
3.9	Méthodologie de planification de trajectoire en couverture de zone	92
3.10	Trajectoire en boustrophédon générée par un pilote de planeur	95
3.11	Graphe complet + estimation de coût en distance	96
3.12	N8 + simulateur	96
3.13	N8 + simulateur + estimation de coût en temps	98
3.14	Profil de vol adaptatif : minimisation de la consommation d'énergie	99
3.15	Trajectoire de la flotte de 3 planeurs	101
3.16	Trajectoire de la flotte de 4 planeurs	102
4.1	Zone d'opération se trouvant à l'Est du point de déploiement	108
4.2	Simulation de la trajectoire à l'Est	109
4.3	Courant moyen pondéré	110
4.4	Trajectoires des 3 planeurs sur toute la zone	112
4.5	Boustrophédons des 3 planeurs sur toute la zone	113
4.6	Trajectoires des 3 planeurs avec une zone d'exclusion	114
4.7	Trajectoires des 4 planeurs avec une zone d'exclusion	115
4.8	Plan de mission généré chargé automatiquement sous GLIMPSE	117
4.9	Comparaison GPCTD-DO et GPCTD	119
4.10	Partie avant du planeur et carte "charge utile"	119
4.11	Exemple de planeur assemblé et de test en piscine	120
4.12	Table de calibration compas en extérieur	121
4.13	Départ pour mise à l'eau de la flotte	121
4.14	Planeur relié à une bouée	122
4.15	Plan de mission des 4 planeurs la veille du déploiement	123
4.16	Trajectoires réalisées par les 4 engins pendant la mission réelle	124

4.17 Capture d'écran de GLIMPSE mettant en avant la désynchronisation des engins en début de mission	125
4.18 Données de température mesurées par la flotte	127
4.19 Comparaison couverture manuelle et automatisée	131

Glossaire

Nom Acronyme	Page	Définition
A*	75	Méthode de recherche du plus court chemin dans un graphe (moins coûteux).
ADCP	27	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i> . Capteur de vitesse de courant par effet Doppler.
AHRS	35	<i>Attitude and Heading Reference System</i> . Capteur de mesures inertielles d'orientation.
AID	13	Agence de l'Innovation de Défense (Ministère des Armées).
Alseamar Alcen	12	Alseamar Alcen, entreprise d'accueil de cette thèse basée à Rousset (13).
AUG	11	<i>Autonomous Underwater Glider</i> , planeur sous-marin.
AUV	26	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i> , véhicule sous-marin autonome sans câble.
Benthique	20	Relatif au fond des eaux.
BMS	44	<i>Battery Management System</i> , Système de gestion de la batterie.
Boustrophédon	34	Se dit d'une trajectoire de type tondeuse à gazon (<i>lawn mower</i>) où une zone est couverte par passages rectilignes parallèles régulièrement espacés d'un pas donné.
COSMER	13	COncception de Systèmes Mécatroniques Et Robotiques - Laboratoire d'accueil de cette thèse.
CPP	71	<i>Coverage Path Planning</i> , Plannification de trajectoire pour la couverture de zone.
CTD	24	<i>Conductivity Temperature Depth</i> , capteur sous-marin de conductivité, température et profondeur.
CVRP	78	Variante du problème VRP (voir VRP - <i>Vehicle Routing Problem</i>) sous contraintes de capacité.
D*	75	Algorithme de recherche incrémentale heuristique.
DFS	75	<i>Depth First Search</i> , algorithme de parcours de graphes présentés sous forme d'arbre.
DGA	13	Direction Générale de l'Armement (Ministère des Armées).
Dijkstra	75	Méthode de recherche du plus court chemin (moins coûteux).
DP	75	<i>Dynamic Programing</i> , programmation de résolution visant à diviser en sous-problèmes.
DVRP	78	Variante du problème VRP (voir VRP - <i>Vehicle Routing Problem</i>) sous contraintes de durée.
Dyfamed	64	Série de trajectoire d'engins évoluant en méditerranée au large des côtes françaises.

EMODNet	43	<i>European Marine Observation and Data Network</i> , base de données marines.
FLBBCD	64	Capteur de grandeurs marines comme notamment la fluorescence de chlorophylle (densité de phytoplancton), la concentration de particules ou de matière organique dissoute.
GBNN	75	<i>Glasius Bio-inspired Neural Network</i> , méthode de décomposition de zone.
GHOM	13	Géographie, Hydrographie, Océanographie et Météorologie.
Glider	29	Planeur sous-marin dans le cadre de cette thèse.
GLIMPSE	42	<i>GLider Mission Piloting SytEm</i> , Plateforme de pilotage d'Alseamar pour le SeaExplorer.
Ligure (mer)	64	Partie de la mer Méditerranée comprise entre le nord de la Corse et Gènes (Italie).
LIS	13	Laboratoire d'Informatique et Systèmes. Laboratoire d'accueil de cette thèse.
LSM	13	Lutte Sous la Mer.
Marine Copernicus	43	Base de données sur les mers et océans libre d'accès. Utilisée dans cette thèse pour obtenir les cartes de bathymétries et de courants marins entre autres.
Médio-océanique	19	Se dit de ce qui se trouve dans des zones centrales d'un océan.
Méso-échelle	64	En océanographie et météorologie, désigne une échelle intermédiaire adaptée au phénomène concerné.
NetCDF	51	<i>Network Common Data Form</i> est un format de fichier qui permet de stocker des données scientifiques multidimensionnelles (variables), telles que la température, l'humidité, la pression, la vitesse et la direction du vent.
Pilote	38	Personne en charge de superviser et commander un ou plusieurs planeurs sous-marins tout au long d'une mission.
Profil de vol	38	Caractéristique de vol du planeur défini par sa vitesse verticale, son angle de tangage, des immersions à respecter et d'un nombre de "yos" sous-marins (voir Yo). Le choix d'un profil de vol est souvent conditionné par l'occurrence et la force de courant, ainsi que par la durée de trajet souhaitée.
RBR	64	Constructeur de capteur CTD (voir CTD) - https://rbr-global.com
RinkoDO	64	Capteur optique d'oxygène dissous.
ROV	23	<i>Remotely Operated Vehicle</i> , Véhicule sous-marin téléopéré disposant d'un câble le reliant à une unité de pilotage en surface ou à terre.
RW	75	<i>Random Walk</i> , processus stochastique ou aléatoire qui décrit une trajectoire consistant en une succession d'étapes aléatoires dans un espace mathématique.
SeaExplorer	38	Planeur sous-marin d'Alseamar.
SHOM	13	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
STC	75	<i>Spanning-Tree Coverage</i> , algorithme de recherche arborescente.
Theta*	75	Méthode de recherche du plus court chemin, variante de A*.

TSP	72	<i>Travelling Salesman Problem</i> , Problème du Voyageur de Commerce qui vise à trouver un chemin qui minimise une fonction de coût le long d'un parcours où chaque étape n'est visitée qu'une seule et unique fois.
USBL	51	<i>Ultra Short BaseLine</i> , se dit de capteur acoustique de localisation où l'émetteur et le récepteur sont éloignés d'une distance réduite.
USV	17	<i>Unmanned Surface Vehicle</i> , drone marin de surface.
VRP	71	<i>Vehicle Routing Problem</i> , Problème de routage de véhicules qui représente une généralisation du problème du Voyageur de Commerce (voir TSP) dans un contexte multi-engins.
VRPTW	79	Variante du problème VRP (voir VRP) avec un critère supplémentaire de fenêtre temporelle.
Waypoint	42	Point de passage géo-référencé
Yo	37	Trajectoire composée d'une plongée et d'une remontée du planeur sous-marin. Certaines trajectoires sont composées de plusieurs yos entre 2 surfaçages pour usuellement naviguer en profondeur entre une immersion maximale et minimale en évitant l'influence des courants de surface.
ZEE	22	Zone Économique Exclusive.

Introduction

Les planeurs sous-marins autonomes (*glider* en anglais, “AUG”) ont été inventés pour répondre à un besoin grandissant de mesures effectuées dans des environnements marins sur de grandes échelles spatiales et temporelles. Ils ont été conçus pour être faciles à utiliser, évolutifs et peu onéreux par rapport à d’autres véhicules sous-marins que l’on peut trouver sur le marché.

Ewan Fallon fut le premier scientifique à proposer le concept d’un engin sous-marin pour se déplacer sous l’eau sans propulseur en 1965 [39]. Le design bio-inspiré de cet engin du nom de “Hydroglider” ne s’adresse qu’à un plongeur en scaphandre autonome devant pomper afin de se déplacer. Ce brevet constitue la première pierre fondatrice du développement des planeurs sous-marins, toutefois de ce dernier ne sortira aucun appareil et il sombrera dans l’oubli.

C’est réellement en 1989 que le principe du planeur sous-marin a été défini par Henry Stommel dans une publication considérée comme étant de la science-fiction à son époque [119]. Cet océanographe s’imaginait un futur où il resterait à terre à piloter une flotte de 1000 planeurs sous-marins dont un peu plus de la moitié serait en mer en permanence. Ces planeurs utiliseraient la différence de température de l’océan pour se recharger et cette grande densité d’observation viendrait compléter les observations satellites pour répondre à un besoin de données sous la surface de la mer dans le but d’étudier le déplacement des polluants et leurs impacts sur le réchauffement climatique. Leur objectif initial serait de collecter des profils de données dans la colonne d’eau avec une large couverture spatio-temporelle (des milliers de kilomètres et des semaines à des mois d’endurance). Grâce aux variations de flottabilité, ils pourraient planer de haut en bas, alternant des cycles de montée et de descente. Ils feraient généralement surface six fois par jour pour contacter le centre de contrôle de mission par satellite. Les brefs instants qu’ils passeraient à la surface, ils transmettraient les données qu’ils auraient accumulées et recevraient les instructions leur indiquant comment se diriger dans l’océan lors de leurs plongées. Leur vitesse serait d’environ un demi-nœud.

Ce principe de fonctionnement étant encore utilisé parmi les planeurs sous-marins “modernes”, on peut donc considérer que Henry Stommel était un véritable visionnaire pour son époque. Cette vision est accompagnée d’un développement de l’électronique low-power, des batteries et des capteurs avec des possibilités plus larges de géolocalisation satellite qui ont permis des progrès majeurs en robotique marine, parmi lesquels on peut citer le projet “ARGO”. Il consiste en un réseau de bouées à flottabilité variable déployées à travers le monde et qui

récupère des données depuis 1999. Le développement des quatre premiers planeurs sous-marins commerciaux fait également partie de ces avancées : “Slocum” [128], “Spray” [113], “Seaglider” [38] et “SeaExplorer” [40] qui sont présentés au niveau de la Figure 1.



Figure 1 – Planeurs sous-marins

Contexte scientifique et industriel

Mes travaux s’inscrivent dans le cadre d’une thèse Cifre-Défense au sein de l’entreprise Alseamar, filiale du groupe ALCEN.

ALCEN est un groupe industriel dont le secteur d’activité s’étend sur quatre domaines : la défense et la sécurité, l’énergie, le médical et l’aéronautique. Il organise ses équipes en filiales à la fois autonomes et coordonnées. La filiale Alseamar est apparue en 2014, après la fusion de trois sociétés du groupe : ACSA, ATOB et BMTI.

ACSA, depuis 2007 était spécialisée dans les systèmes de navigation et la robotique sous-marine tandis que ATOB fournissait des solutions d’ingénierie de maintenance et d’inspection sous-marine dans des environnements subaquatiques et militaires. Plus ancienne, BMTI, fabriquait depuis 1982 des matériaux de flottabilité (mousses syntactiques, bouées de communication éjectables pour sous-marins...) et des systèmes de radiocommunication pour bâtiments de surface et sous-marins militaires.

Forte des précédentes expériences des trois anciennes filiales, Alseamar se spécialise dans trois marchés différents : les sciences marines et l’environnement, la défense et la sécurité et l’industrie pétrolière. Sur le marché des sciences marines et de l’environnement, Alseamar contribue à la recherche océanographique et à la surveillance de l’environnement marin. Alseamar est organisée en trois départements : un département Produits (acoustique sous-marine passive, planeurs sous-marins, radiocommunication maritime, propulseurs sous-marins pour plongeurs et nageurs de combat), un département Services (surveillance maritime et sous-marine par planeurs, traitements d’obsolescences et re-fabrication, modernisation de systèmes complexes), un département Mousses syntactiques (mousses syntactiques BMTI, composites). L’entreprise possède une vaste expérience sur une large gamme de produits et services innovants, comme les véhicules de surface non habités ou les véhicules sous-marins sans pilote, tels que le planeur SeaExplorer. C’est sur ce dernier que mes travaux de thèse portent. Cet engin permet

l'acquisition de données à large échelle (temporelle et spatiale) sur toute la colonne d'eau jusqu'à 1000 m de profondeur.

Mes travaux de thèse font l'objet d'une co-direction entre deux laboratoires de l'université de Toulon : le laboratoire de COncEption de Systèmes Mécaniques et Robotiques (COSMER), et le Laboratoire d'Informatique et des Systèmes (LIS, UMR CNRS 7020).

Pour effectuer ma thèse, j'ai bénéficié d'un co-financement (bourse n°2020858) de l'AID (Agence Innovation de Défense) et mes travaux sont également suivis par deux tuteurs au sein de la DGA (Direction Générale de l'Armement).

La Direction Générale de l'Armement est une direction du ministère français des Armées qui a pour objectif d'équiper les forces armées françaises, de préparer l'avenir et d'apporter du soutien à l'exportation à l'industrie française de défense. Placée sous la responsabilité de la DGA, l'Agence de l'innovation de défense (AID) a été créée le 1er septembre 2018. L'AID fédère les initiatives d'innovation du ministère en assurant la coordination et la cohérence de l'ensemble des démarches d'innovation.

Un Programme Technique de Défense (PTD) entre la DGA, Alseamar, le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et la Marine nationale a démarré en 2022 et porte sur la réalisation d'études et de démonstrations de planeurs sous-marins destinés à recueillir des données Géographiques, Hydrographiques, Océanographiques et Météorologiques (GHOM) au profit notamment de la composante sous-marine de la Marine nationale.

Un volet de ce programme, dans lequel s'inscrivent mes travaux de thèse, consiste à développer un système de coopération de flottilles de plusieurs planeurs SeaExplorer (cf. Fig. 2). La connaissance des données environnementales permet de comprendre et d'appréhender des situations complexes et d'apporter l'appui nécessaire aux forces sur le terrain. Ces données essentielles sont : la Géographie (e.g. cartographie de surfaces terrestres, du trait de côte, du profil de plage), l'Hydrographie (e.g. cartographie des fonds de mer), l'Océanographie (e.g. état de mer, détection visuelle), la Météorologie (e.g. vents, précipitations) et pourraient répondre à des besoins de Lutte Sous la Mer (LSM).

En plus des données classiques telles que les images satellites, les modèles ou les cartes, la mise en œuvre de nouveaux moyens d'observation sont actuellement à l'étude pour améliorer, dans le futur, la connaissance des théâtres d'opérations. C'est dans ce contexte, que le planeur sous-marin SeaExplorer est mis à l'étude. En effet, ce dernier est capable de transmettre, en temps quasi réel à l'échelle du planeur (autour de 3h), des données de température, courants, lumière, turbulence, mesurés à différentes profondeurs, qui sont susceptibles d'apporter des informations vitales relatives aux opérations en mer.

A titre d'illustration, on peut mentionner l'efficacité des sonars ou les risques de détections visuelles. Néanmoins, pour que ces informations soient pertinentes et utiles aux opérations, le déploiement de l'engin doit être rationalisé et optimisé, pour permettre l'obtention d'une image claire et intégrée de la zone d'opération. Cela est d'autant plus vrai que les environnements



Figure 2 – Flotte de SeaExplorer en mer

océaniques sont des espaces très dynamiques et changeants sur des échelles spatio-temporelles très variables.

Un avantage certain pour l'échantillonnage et le suivi précis d'une zone réside dans l'utilisation non plus d'un seul planeur mais d'une flotte (Fig. 2). Dans ce cas, la planification, le plan d'échantillonnage et le pilotage sont encore plus complexes et nécessitent l'utilisation de méthodes de plus haut niveau de planification de trajectoire et de supervision permettant ainsi une certaine coopération entre les engins.

La **problématique principale** identifiée pour atteindre cette coopération réside en l'asynchronisme des communications qui existe entre les engins composant la flotte. En effet, ils ne peuvent pas communiquer entre eux de manière instantanée, mais de façon centralisée lorsqu'ils refont surface à des moments différents à l'aide d'un relais de communication placé en permanence à l'écoute des membres de la flotte.

La **problématique en GHOM** est d'assurer la couverture géographique d'une zone d'intérêt pouvant inclure des zones d'exclusion, de manière optimale en vitesse de couverture ou optimale en persistance pour évaluer la variabilité temporelle des mesures. Les engins composant la flotte de drones doivent donc se partager l'espace et le temps pour répondre aux problématiques d'acquisition de données physico-chimiques. La finalité de cette thèse est de définir un moyen de coopération générique de l'ensemble de la flotte de planeurs dans le but de répondre aux problématiques en GHOM.

Alseamar a eu l'occasion d'avoir une précédente expérience dans la gestion de flotte de planeurs dans le cadre d'un projet "RAPID". L'objectif du RAPID AGLIMMS, Acoustic GLIders Mission Management System, consistait en la localisation de phénomènes acoustiques à très grandes échelles spatiale et temporelle en déployant une flotte de planeurs sous-marins. Le groupement projet était constitué d'ALSEAMAR, porteur du projet, de l'ONERA et de CENTRAL WEB. L'ONERA avait pour objectif d'étudier et d'implémenter un système de supervision de la mission et des algorithmes d'optimisation de mission. Ce projet a permis la mise en place d'une plateforme de pilotage pour les planeurs SeaExplorer ainsi que d'un protocole permettant l'interaction entre les différents modules de cette dernière. Notre objectif est également d'implémenter tous les algorithmes développés dans le cadre de mes travaux de

thèse au sein de cette plateforme de pilotage.

Organisation du mémoire

Mes travaux de thèse se focalisent sur le développement d'un simulateur pour le planeur SeaExplorer et de méthodes de génération de trajectoire pour chaque engin composant une flotte de drones. Les problématiques ont été traitées lors de la phase de préparation de mission, les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse permettant d'être adaptés pour répondre à un besoin de supervision en cours de mission. L'approche développée dans ce mémoire consiste en la conception d'un simulateur de mission afin d'en extraire les principales grandeurs d'intérêt dans le pilotage des planeurs. Nous montrerons qu'il s'agit de l'énergie consommée, le temps et la distance parcourue. Dans un second temps, nous introduirons des méthodes d'optimisation, consistant à minimiser différentes fonctions de coût construites à partir de ces grandeurs dans le but d'optimiser les trajectoires de chaque planeur de la flotte ainsi que le profil de vol du planeur dans la colonne d'eau. Le manuscrit de thèse est organisé en quatre chapitres :

Chapitre I : État de l'art en robotique sous-marine

Ce chapitre introduit les différents types de missions en robotique sous-marine et de robots qui peuvent y répondre, tout en présentant un état de l'art préliminaire sur leurs applications civiles et militaires. Une comparaison de ces engins sera menée avant de présenter en détail le planeur SeaExplorer, engin qui est au cœur de cette thèse. Les limites du pilotage actuel des engins seront discutées. Ce chapitre explique pourquoi il est nécessaire d'améliorer la phase de préparation de mission des SeaExplorer lors d'un pilotage en flotte et permet d'introduire nos travaux de recherche.

Chapitre II : Simulateur de mission

Afin de pouvoir minimiser des grandeurs d'intérêt dans la phase de génération de trajectoire, nous expliquerons qu'il est d'abord nécessaire de développer un simulateur de mission du planeur SeaExplorer fournissant en paramètres de sortie ces grandeurs. Ainsi, la première partie de ce chapitre détaille les motivations de l'étude avant de présenter le cahier des charges appliqué à la réalisation de ce simulateur qui prend en compte un environnement 3D qui évolue au cours du temps. Ce simulateur a pour but d'être utilisé en phase de préparation de mission mais également en cours de mission. Une explication détaillée de l'architecture développée sera menée dans ce chapitre ainsi qu'une présentation de la validation expérimentale de ce simulateur.

Chapitre III : Planification de trajectoire

Ce chapitre est consacré aux méthodes de génération de trajectoire. L'objectif étant de

construire les trajectoires les plus optimales possible en mode mono et multi-engins. Parmi les différents types de mission envisageables, nous avons fait le choix de nous concentrer sur le problème de la couverture optimale de zones d'intérêt pouvant comporter des zones d'exclusion. Après un état de l'art des méthodes existantes, nous introduisons la nouvelle méthode que nous proposons et qui repose sur la théorie des graphes.

Chapitre IV : Validation expérimentale en mission réelle

Ce chapitre vise à valider la méthode de génération de trajectoire optimisée développée et présentée au chapitre précédent, en simulation puis en contexte expérimental réel, en analysant les retours d'expériences d'une mission en mer menée en troisième année de thèse. Celle-ci visait à tester l'implémentation de la méthode de planification et de supervision sur la plateforme de pilotage d'Alseamar.

Conclusion & perspectives

L'ensemble de ces développements démontre l'intérêt et la faisabilité de la gestion de flottes de planeurs sous-marins par l'utilisation de la méthode développée dans cette thèse. Plusieurs perspectives d'améliorations ainsi que les limites de l'étude sont également présentées.

Valorisation des travaux

Plusieurs valorisations des travaux ont été menées au cours de cette thèse :

- A. Merci, C. Anthierens, N. Thirion-Moreau, and Y. Le Page, "A simulator of underwater glider missions for path planning", *Ocean Engineering*, vol. 269, p. 113514, 2023. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822027974>.
- En soumission : A. Merci, C. Anthierens, N. Thirion-Moreau, and Y. Le Page, "Simulator based path planning : application to zone coverage mission of underwater gliders fleet", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*.
- Présentation des résultats de cette thèse au Forum Innovation Défense édition 2023 du 23 au 25 novembre.

Chapitre 1

État de l’art en robotique sous-marine

Au sein du domaine des robots mobiles, on considère trois catégories principales, chacune possédant des domaines d’application diversifiés : les engins aériens, terrestres et marins. Parmi ces derniers, il est possible de les subdiviser en deux catégories distinctes en fonction de leurs applications : les véhicules opérant en surface (“USV” pour *Unmanned Surface Vehicle*) et ceux qui évoluent sous la surface des océans. Dans cette dernière catégorie, on distingue à nouveau deux types majeurs d’engins : d’une part, les robots opérés via un câble (“ROV” pour *Remotely Operated Vehicle*) et, d’autre part, les robots autonomes sous-marin sans liaison filaire (“AUV” pour *Autonomous Underwater Vehicle*).

Cette gamme variée de robots sous-marins permet d’explorer de nouveaux environnements marins et de réaliser des missions allant de l’exploration scientifique à l’inspection industrielle en profondeur. Le domaine de la robotique sous-marine est en constante évolution et révolutionne notre compréhension et notre interaction avec les écosystèmes aquatiques. Ce chapitre est consacré aux possibilités offertes par ces engins au sein des océans et mers de notre planète. Nous commencerons par décrire les différents types de missions qu’ils peuvent accomplir, qu’il s’agisse d’exploration géologique, de surveillance environnementale ou encore de maintenance industrielle. Dans un second temps les différentes catégories d’engins sous-marins disponibles seront comparées afin d’établir une comparaison de leurs principaux avantages et inconvénients. Nous nous concentrerons ensuite sur les planeurs sous-marins et plus spécifiquement sur le SeaExplorer que nous présenterons de manière détaillée dans la mesure où tous les travaux qui sont menés dans cette thèse lui sont consacrés. Ce planeur est développé par la société Alseamar. La description du principe de son fonctionnement nous permettra d’introduire les problématiques que nous serons amenées à traiter dans cette thèse.

1.1 Les missions en robotique sous-marine

Les premiers développements des robots sous-marins remontent aux années 1950 et 1960, lorsque les premiers engins ont été conçus à des fins militaires et de recherche scientifique

[58, 30]. Toutefois, ce n'est qu'à partir des années 1970 et 1980 que les avancées en électronique ont permis de miniaturiser les capteurs et les composants nécessaires, ouvrant la voie à des engins sous-marins autonomes capables de suivre des trajectoires préprogrammées et de réaliser des missions de cartographie des fonds marins [48]. Avec le développement de l'industrie offshore, ces véhicules ont été utilisés pour de l'exploration sous-marine du pétrole et du gaz, l'éducation et la recherche en sciences océaniques [121].

Les années 1990 ont vu une amélioration des capacités d'autonomie, de navigation et de communication des robots sous-marins, conduisant à leur utilisation croissante dans la recherche océanographique et la surveillance maritime notamment [96].

Les avancées technologiques des années 2000 à 2020 ont permis de perfectionner ces engins, élargissant leurs applications à des secteurs tels que le loisir, la recherche archéologique sous-marine, la surveillance environnementale et la sécurité maritime [125].

Aujourd'hui, les robots sous-marins jouent un rôle essentiel dans la compréhension et l'exploration des milieux sous-marins, témoignant d'une évolution continue basée sur les avancées technologiques et les besoins diversifiés de la société. Les robots sous-marins ont donc rapidement évolué pour devenir des acteurs incontournables dans un large éventail de missions, qu'elles soient civiles ou militaires.

1.1.1 Applications civiles

Les applications civiles des robots sous-marins sont vastes et diversifiées. Dans le domaine scientifique, ils sont très largement utilisés pour répondre aux besoins océanographiques. L'océanographie est une branche de la science qui se consacre à l'étude des océans. Elle englobe un large éventail de disciplines scientifiques appliquées au domaine marin telles que la géologie, la biologie, la chimie et la physique, qui travaillent de concert pour comprendre les différents aspects des océans. Cette compréhension passe par l'étude de la composition, de la dynamique, de la vie marine des océans [116, 37, 20] et de leur interaction avec le climat terrestre. Ces derniers couvrent environ 70% de la surface de la planète, et jouent un rôle essentiel dans de nombreux processus terrestres tel que le temps atmosphérique et le climat [118]. Les océans influent sur la distribution des précipitations, les sécheresses, les inondations, le climat régional et le développement des tempêtes, des ouragans et des typhons.

Les océanographes utilisent une variété d'instruments, de navires de recherche, de satellites et de technologies avancées tels que les robots sous-marins pour collecter des données. Ces données sont ensuite analysées pour développer des modèles et des théories qui expliquent les processus océaniques et les phénomènes observés.

Dans ce domaine scientifique, les engins sont donc déployés pour **l'exploration géologique des fonds marins, la collecte de données océanographiques, la cartographie des reliefs sous-marins et l'étude des écosystèmes marins.**

Il est important de noter que l'obtention d'une représentation visuelle du fond marin a toujours

été un défi unique pour l'humanité. La première avancée significative dans la cartographie des fonds marins a été rendue possible grâce à l'invention du sonar, qui a été employé pendant la Première Guerre mondiale pour la détection des sous-marins ennemis et des torpilles. Au cours des années 1920, le sonar a été utilisé pour créer une image virtuelle des profondeurs marines. La Seconde Guerre mondiale a vu l'émergence de progrès technologiques dans le domaine du sonar et de l'électronique permettant ainsi la mise en place de systèmes nettement améliorés capables de mesurer précisément la profondeur des fonds marins. Ces avancées ont constitué les fondements nécessaires pour élaborer les premières cartes réelles des caractéristiques importantes, telles que les fosses océaniques profondes et les crêtes médio-océaniques [134]. Les robots sous-marins sont alors déployés pour collecter un ensemble complet de données à haute résolution, comprenant des mesures de la **topographie des fonds marins, du champ magnétique, de la température et de la rétrodiffusion optique**. Un exemple d'application dans une région caractérisée par une activité tectonique et néovolcanique située le long de la dorsale Est-Pacifique Sud est donné dans [130] (voir Fig. 1.1).

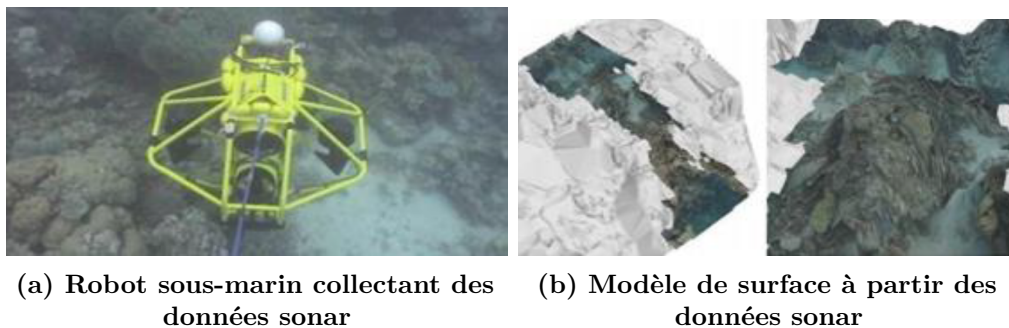


Figure 1.1 – Collecte de données bathymétriques [130]

Les robots sous-marins ont été déployés dans une grande variété d'études géoscientifiques marines, initialement axées sur la cartographie des fonds marins, mais plus récemment étendues aux mesures géochimiques et océanographiques de la colonne d'eau [97, 23].

L'une des applications les plus courantes de ces robots dans les géosciences marines concerne l'étude du volcanisme sous-marin et des cheminées hydrothermales [87, 53] mais ils sont également utilisés pour créer des cartes détaillées des profondeurs marines ainsi que des champs magnétiques à haute résolution. De plus, ils permettent de repérer les émissions de panaches hydrothermaux actifs (par exemple : [135, 50, 86]) en utilisant une combinaison de mesures de température, de rétrodiffusion optique, d'oxydo-réduction électrochimique, de vitesse verticale et d'imagerie SSS (*Side-Scan Sonars*). Enfin, ils permettent l'acquisition de photographies dans le but de générer des photo-mosaïques géoréférencées détaillées de zones d'intérêt spécifiques (reconstruction 3D d'épaves ou de sites archéologiques).

Outre la cartographie et la surveillance des processus hydrothermaux en eaux profondes, les robots sous-marins ont joué un rôle important dans l'étude des caractéristiques d'échappement des fluides à basse température [107]. Les données de ces robots ont fourni de nouvelles

informations sur les processus de formation de lacs salés et enrichis en méthane.

Les informations recueillies par les robots sous-marins ont également été utilisées dans des études de cartographie des habitats benthiques à différentes profondeurs, y compris dans des zones côtières très peu profondes [85]. Cette utilisation vise à obtenir des données sur la caractérisation de l'écosystème sous-marin et de sa faune et sert à constituer une base de données de référence pour toutes les futures missions visant à évaluer l'efficacité des mesures de protection.

Les robots sous-marins ont été utilisés pour cartographier diverses caractéristiques morphologiques des fonds marins, notamment car ils peuvent atteindre des profondeurs qui ne sont plus accessibles depuis un navire de recherche. Ils sont également utilisés pour imager les caractéristiques sédimentaires dans les canyons sous-marins. Ils représentent une solution optimale pour collecter des données de vitesse de courant dans des profondeurs d'eau supérieures ou égales à 100 m, ces données étant essentielles pour une évaluation correcte de la mécanique du transport des sédiments.

Au cours des dernières années, les robots sous-marins ont émergé rapidement en tant qu'outil essentiel pour les géoscientifiques marins, en particulier pour la cartographie et la surveillance des fonds marins. La capacité de ces véhicules à évoluer à une altitude relativement basse au-dessus du fond marin leur permet de collecter des données spatiales à une résolution bien supérieure à celle des navires de surface, en particulier en eau profonde. Les robots sous-marins sont capables de prendre des décisions qui leur permettent d'éviter les collisions avec le fond marin ou la glace. Ceci a conduit à une étude avec le robot "Autosub-2" parcourant plus de 210 km sous la glace. Cette étude a permis de mettre en évidence la présence importante de petits crustacés d'eaux froides et ainsi d'évaluer l'impact de la fonte des glaces sur la biodiversité [24]. Les robots sous-marins sont développés de plus en plus avec une intelligence suffisante pour adapter leurs missions en fonction des changements dans l'environnement qu'ils surveillent, par exemple, la découverte d'un panache hydrothermal [18, 135].

Ces engins sont également utilisés dans l'industrie offshore pour inspecter et entretenir des installations sous-marines (voir Fig. 1.2), ainsi que dans la récupération d'objets précieux perdus en mer, tels que des épaves ou des équipements.

Le domaine de la surveillance sismique est d'une grande importance dans l'extraction pétrolière. Les études des variations dans les réservoirs au fil du temps sont appelées "sismiques 4D" et sont utiles pour évaluer les performances du champ et motiver d'éventuelles interventions. La surveillance des champs pétrolifères sous-marins est une tâche plus complexe que celle des champs pétrolifères terrestres. Cette contrainte s'explique principalement par le fait que les capteurs sismiques ne sont pas actuellement déployés dans les champs sous-marins. À la place, la surveillance sismique des champs sous-marins implique généralement un navire équipé d'un ensemble remorqué d'hydrophones en tant que capteurs et d'un canon à air comme actionneur. Les robots sous-marins sont également utilisés pour relever ce défi et contribuer à la surveillance sismique des champs pétroliers [109].

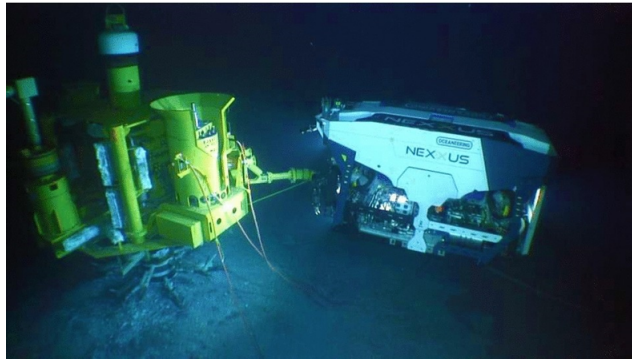


Figure 1.2 – NEXXUS ROV effectuant une intervention sur une structure sous-marine [92]

Les robots sous-marins sont largement impliqués dans le domaine pétrolier et gazier sous-marins et notamment dans l'inspection, la réparation et la maintenance de plateforme offshore et de *pipelines* sous-marins. L'industrie pétrolière et gazière utilise les robots sous-marins pour réaliser des cartes détaillées du fond marin avant de commencer à construire ces infrastructures. En utilisant des robots sous-marins, des enquêtes sont menées sur les géorisques/dégagements, sur les sites de forage. Des inspections physiques avec des véhicules d'interventions peuvent également être menées car en eau profonde les tuyaux ont tendance à se déformer sous les charges extrêmes, puis à s'effondrer avec la pression de l'eau plus élevée.

Le véhicule sous-marin présente un avantage certain car, pendant qu'il collecte les images acoustiques, le navire mère est libre d'effectuer l'enquête géotechnique longue et lourde. De même, les véhicules peuvent collecter les données géophysiques peu profondes pour les études de chantier tandis que le vaisseau mère rassemble les données géophysiques numériques plus profondes. L'autre utilisation évidente des robots sous-marins est celle de pose de câbles de communication.

Une autre tendance clé est la volonté du secteur pétrolier et gazier d'exploiter des réserves inexploitées dans certaines des régions les plus reculées et les plus profondes de l'océan : le *deep sea mining*. Outre les problèmes technologiques complexes posés par les pressions et températures élevées, qui peuvent aller de plusieurs centaines de degrés à près de zéro, de sérieuses inquiétudes quant à son impact environnemental ont été exprimées par les défenseurs de l'environnement et les industries de la pêche. Néanmoins, l'exploitation minière en haute mer suscite actuellement un intérêt croissant, car les fonds marins contiennent d'énormes quantités de minéraux. Aujourd'hui, certaines ressources terrestres s'épuisent et deviennent plus difficiles et plus coûteuses à extraire, les prix de certains métaux atteignent des niveaux record et les progrès récents en matière de robotique, de forage sous-marin et de cartographie des minéraux font de l'exploitation minière sous-marine une possibilité attrayante. Les entreprises espèrent extraire des métaux tels que l'or, l'argent, le cuivre, le nickel, le cobalt, le zinc et des éléments de terres rares.

1.1.2 Applications militaires

Dans le domaine de la défense, les robots sous-marins offrent des avantages significatifs en matière de surveillance, de reconnaissance et de sécurité. Ils sont employés pour des missions de détection de mines, de patrouille maritime, de collecte de renseignements et de surveillance des zones sensibles. Leurs capacités de discrétion et de déploiement à distance les rendent idéaux pour des opérations secrètes ou risquées. De plus, les robots sous-marins peuvent jouer un rôle crucial dans le domaine de la sécurité maritime en protégeant les infrastructures côtières et en surveillant les activités suspectes.

L'environnement marin est un environnement complexe, hostile pour l'homme et peu accessible. Moins d'un cinquième de la topographie sous-marine est déterminée avec précision tandis que les trois quarts des fonds marins se situent à des profondeurs supérieures à 3000 m. Les activités étatiques et privées dans les fonds marins se développent de plus en plus (extraction pétrolière, gazière, marché des câbles sous-marins, exploration et exploitation des ressources). La France a une volonté d'exploration et de protection des ressources se trouvant dans ses fonds marins, de défendre ses intérêts qui pourraient être menacés comme par exemple la sécurité des câbles de communication, des infrastructures de transport d'énergie, des ressources potentielles dans sa Zone Économique Exclusive (ZEE)[115].

Depuis la déclaration de Mme Florence PARLY, ministre des armées, à Paris le 14 février 2022 [1], la France cherche à étendre sa maîtrise de l'espace maritime aux grands fonds marins. Cela passe par un développement de sa capacité à connaître, surveiller et agir jusqu'à 6000 m de profondeur grâce au développement, à horizon 2025, d'un drone et d'un robot sous-marin opérant jusqu'à cette profondeur.

L'importance de la reconnaissance et la collecte de nombreux types de renseignements par les forces navales restent des aspects essentiels d'une stratégie efficace. Un des objectifs des développements actuels et à court terme des robots sous-marins autonomes consiste en l'exécution de missions de reconnaissance et de collecte de données tactiques sur les théâtres d'opérations.

Le développement de ces robots dans le domaine de la défense s'est fait en parallèle des développements technologiques dans le domaine des sciences et le domaine industriel, comme détaillés précédemment. Des exercices militaires utilisent de plus en plus des robots sous-marins et mettent en collaboration les forces militaires, les universités et les entreprises. Parmi ces exercices, on peut trouver "REP(MUS)" (*Robotic Experimentation and Prototyping using Maritime Uncrewed Systems*) qui est un exercice annuel dont le but de tester différents types de véhicules aériens autonomes, de véhicules de surface et sous-marins autonomes et de véhicules terrestres autonomes. Cet exercice est organisé et accueilli par la marine portugaise et l'OTAN avec la participation de forces militaires étrangères, d'universités et d'entreprises. La robotique sous-marine s'est concentrée sur des problèmes navals spécifiques associés aux tâches de lutte contre les mines et à la recherche sous-marine tout en éloignant l'être humain

des zones dangereuses. Parmi les rôles défensifs des robots sous-marins on peut trouver : la détection, la localisation et la traque des sous-marins, la détection et l'identification des mines dans ses propres eaux, la conduite d'opérations hydrographiques et environnementales à l'appui d'opérations navales ou inter-armées plus vastes, la collecte sous-marine de données du système ennemi pouvant être exploitables par ses propres forces.

Les besoins de défense sont multiples et vont sans doute bien au-delà de la liste non-exhaustive faite ici, mais les problématiques robotiques en terme de planification de trajectoire peuvent converger aussi bien pour le domaine civil que pour le domaine de la défense. Par exemple la couverture de zone revêt un intérêt particulier pour la recherche d'hydrocarbures, pour de la mesure océanographique ou de la surveillance militaire. De façons duales, ce type de mission sera adressé dans la partie applicative de cette thèse.

1.2 Catégories d'engins sous-marins

Pour répondre aux besoins des missions précédemment évoquées, différentes catégories d'engins sous-marins sont apparues au fil des années qu'ils soient habités ou non habités. Les "ROV" (*Remotely Operated underwater Vehicles*), les "AUV" (*Autonomous Underwater Vehicles*) et les planeurs sous-marins font partie de cette dernière catégorie.

1.2.1 ROV

Les ROV sont des véhicules contrôlés à distance par des opérateurs se trouvant à la surface, généralement par l'intermédiaire d'un câble ombilical qui peut fournir l'alimentation électrique nécessaire et qui sert de relais pour les communications. Ces engins sont généralement utilisés pour des tâches qui nécessitent une intervention humaine directe, comme l'inspection, l'exploration, la réparation et la maintenance d'infrastructures sous-marines, ainsi que pour la collecte d'échantillons.

Les ROV peuvent être équipés de caméras, de bras manipulateurs et de capteurs pour effectuer des opérations précises sous l'eau. L'architecture typique d'un ROV (voir Fig. 1.3) comporte un cadre robuste, généralement ouvert afin de laisser passer les flux d'eaux, de propulseurs (souvent entre 3 et 8) pour permettre une grande manœuvrabilité, d'une unité de flottaison pour assurer la flottabilité (neutre ou positive pour remonter à la surface) et d'un câble qui relie le système à un navire hôte. Il peut également supporter un équipement d'exploitation complexe et une charge électrique importante.

Par rapport à d'autres types de véhicules sous-marins sans pilote, le ROV possède des avantages tels que la flexibilité, la dynamique, une grande profondeur de fonctionnement, une forte endurance et une bonne adaptabilité à l'environnement.

Le système de contrôle de surface du ROV est situé à bord d'un navire ou installé sur une console à terre. Le système est composé d'un ordinateur, d'un convertisseur de données,

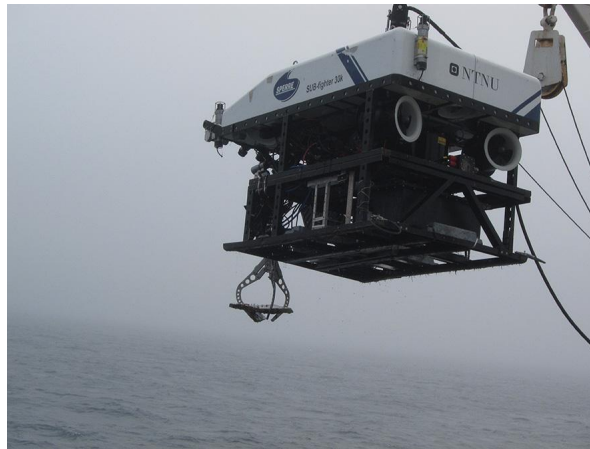


Figure 1.3 – ROV 30K de l'AURLab permettant d'aller jusqu'à 6000m de profondeur

d'une alimentation électrique, d'une poignée de commande, d'un écran d'affichage et d'autres équipements. Grâce à l'ordinateur et à l'écran d'affichage, l'opérateur peut analyser les données ou observer l'environnement dans lequel se trouve le robot, surveiller le fonctionnement du robot en temps réel et contrôler les mouvements et la vitesse du robot.

Grâce au câble ombilical, la console de surface peut non seulement transmettre l'énergie et les signaux de commande au ROV, mais aussi recevoir les informations renvoyées par le robot. Dans les eaux peu profondes, quelques centaines de mètres de câble ombilical peuvent être utilisés directement. Cependant, dans les eaux profondes, le câble ombilical augmente la résistance aux mouvements et aux opérations du ROV sous-marin. C'est pourquoi le câble peut également être relié à un système de gestion du câble (*Tether Management System - TMS*) : une unité distincte non flottante qui est descendue avec le ROV sur un câble blindé depuis le navire et qui amortit l'effet des mouvements du navire sur le ROV. Le câble ombilical limite toutefois la mobilité du ROV, mais il permet un contrôle en temps réel et la transmission de données à la surface. Il peut accepter une transmission de données relativement importante et peut être utilisé pendant de longues périodes à condition d'être relié et de mobiliser un navire sur la période d'utilisation.

Dans sa configuration la plus basique, un ROV embarque une ou plusieurs caméras vidéo, dont les données sont transférées en temps réel à l'opérateur à bord. En outre, il peut y avoir un ou deux bras manipulateurs avec différents niveaux de fonctionnalité, ainsi qu'un "panier" ou un dispositif de stockage pour conserver les échantillons ou les outils. Dans les configurations plus avancées, d'autres capteurs ou équipements peuvent être intégrés au système, allant de capteurs de conductivité, température, profondeur (*Conductivity Temperature Depth - CTD*), de capteurs optiques ou chimiques à des caméras Haute Définition, des sonars à balayage sectoriel et des échosondeurs multifaisceaux.

Outre leur profondeur, les ROV sont généralement classés en fonction de leur taille : les ROV de classe professionnelle sont des véhicules grands et puissants (jusqu'à 2 m de haut et 4 m

de long), qui peuvent être utilisés pour des opérations complexes et transporter plusieurs instruments ou un grand volume d'échantillons afin de réaliser des tâches d'observations et d'interventions sous-marines. Dans la plupart des cas, ils sont équipés de deux bras manipulateurs disposant de 2 à 7 fonctions. Dans le domaine scientifique, on peut citer le "Victor 6000" (voir Fig. 1.4) conçu par l'Ifremer capable d'intervenir jusqu'à 6000 m de profondeur. Ce dernier peut aller jusqu'à 0.5 m/s avec 6 propulseurs, il pèse 4600 kg avec une capacité d'emport qui peut aller jusqu'à 150 kg.

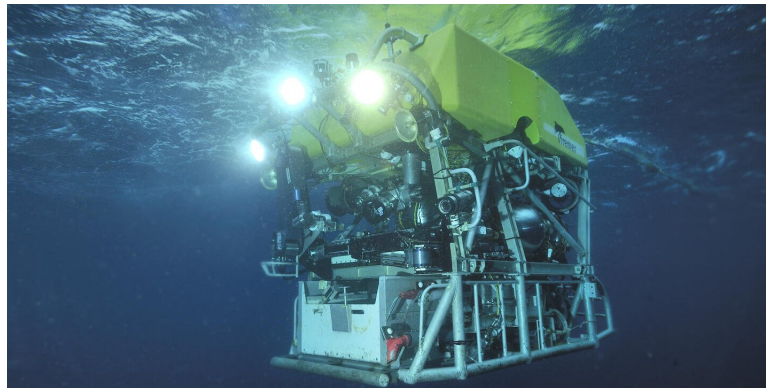


Figure 1.4 – ROV Victor 6000 de l'Ifremer

Si on se concentre sur des ROV plus petits, on peut citer le "Tortuga" développé par Subsea Tech (voir Fig. 1.5). Ce dernier a été spécifiquement développé pour explorer des conduites industrielles, des tuyaux d'égouts ou certaines conduites d'eau se trouvant sous la mer. Il permet de réaliser des tâches d'observations et de d'interventions. Dans sa configuration la plus facile à déployer, ce ROV peut aller jusqu'à 500 m de profondeur et pèse 37.5 kg avec 15 kg de capacité d'emport. Il est équipé de 4 propulseurs longitudinaux et de 2 propulseurs verticaux lui permettant d'atteindre une vitesse de 2.6 m/s. Il peut être équipé d'un bras manipulateur 2 à 5 fonctions avec mâchoires interchangeable et d'un certain nombre d'options telles qu'une caméra acoustique, un sonar mécanique et un profileur, un capteur de vitesse Doppler (*Doppler Velocity Log - DVL*), plusieurs sondes, des outils de nettoyage (brosse rotative, lance et rotor de cavitation).

Parmi les ROV d'inspection à vocation scientifique et éducative, on peut citer le "BlueROV2" (voir Fig. 1.6) développé par l'entreprise BlueRobotics. Il s'agit d'un ROV très manœuvrable équipé de 8 propulseurs, il peut atteindre une vitesse de 1.5 m/s. Son autonomie de navigation est de 2h et peut aller jusqu'à 300 m de profondeur. Il pèse 11 kg ce qui le rend facile à déployer, et a une capacité d'emport de 1.5 kg. Il peut également être équipé d'un capteur externe de mesure de profondeur et de température.

Enfin, il existe des ROV accès grand public, qui sont très abordables et faciles à déployer tel que le "Fifish V-EVO" (voir Fig. 1.7) développé par l'entreprise Qysea. Ce dernier est équipé de 6 propulseurs et peut atteindre une vitesse de 1.5 m/s. Il peut aller jusqu'à 100 m



Figure 1.5 – ROV Tortuga de Subsea Tech

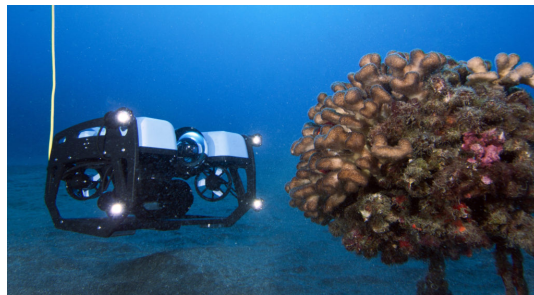


Figure 1.6 – ROV BlueROV2 de BlueRobotics

de profondeur avec une autonomie de 4h pour 3.9 kg. Il peut être équipé d'un bras robotique composé de deux accessoires : une pince pour saisir des objets et un crochet pour tirer des éléments.



Figure 1.7 – ROV Fifish V-EVO de Qysea

1.2.2 AUV

Les AUV sont des drones sous-marins autonomes qui fonctionnent sans intervention humaine directe une fois qu'ils sont déployés. Ils sont préprogrammés pour effectuer des missions spécifiques et peuvent collecter des données, réaliser des relevés cartographiques, effectuer des recherches scientifiques et surveiller l'environnement marin. Ils sont capables de

naviguer de manière autonome en utilisant une intelligence embarquée qui se base sur des mesures sonars, des caméras, des systèmes de détection d'obstacles.

Contrairement aux ROV, les AUV ne sont pas limités par des câbles ombilicaux, ce qui leur permet de couvrir de grandes distances et d'explorer des zones plus éloignées et plus difficiles d'accès (par exemple en milieu karstique sous-marin [33]) que les ROV. Cependant, l'absence de câble, et donc d'alimentation directe, limite la durée de l'activité des AUV à quelques heures par jour en mer. Par conséquent, les AUV ne sont pas encore équipés pour un échantillonnage extensif des fonds marins ou de la faune.

Dans l'ensemble, les AUV sont plus adaptés aux opérations de surveillance, à l'acquisition de données de capteurs le long de lignes régulières et préprogrammées, tandis que les ROV sont optimaux pour les travaux interactifs, précis et à haute résolution.

Concernant l'enveloppe capteur des AUV, elle peut être composée de caméras vidéo ou fixes, de sonars, de magnétomètres, de fluorimètres (capteurs de chlorophylle), de capteurs d'oxygène dissous, de capteurs de conductivité, de température et de profondeur (CTD), de capteurs de pH et de capteurs de turbidité (concentration de sédiments en suspension). Ils peuvent également être équipés d'un système de navigation GPS mais ce dernier ne sera utilisable qu'en surface dû à l'atténuation des ondes électromagnétiques dans l'eau. Sous l'eau, l'AUV utilise sa dernière position GPS connue et calcule son mouvement à l'aide d'un filtre de navigation intégrant différents types de capteurs dont une centrale inertielle qui mesure la vitesse, l'accélération et la rotation de l'AUV (navigation à l'estime).

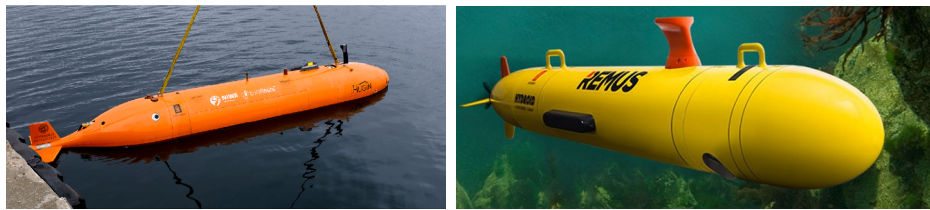
Dans la plupart des cas, les AUV ont une forme de torpille, ils se déplacent à l'aide de propulseurs et peuvent être configurés en embarquant des charges utiles adaptées aux mesures souhaitées. De nombreuses variétés existent, allant de l'engin léger facilement déployable en mer par un humain, à un engin pouvant peser plusieurs tonnes permettant d'accéder à de grandes profondeurs.

Parmi ces derniers, on peut citer "l'Autosub6000" (voir Fig. 1.8) construit par *l'Underwater Systems Laboratory* du *National Oceanography Centre* (NOC). Il est alimentée par batterie et peut être équipé de capteurs tels qu'un magnétomètre, un capteur de turbidité, une CTD. Il dispose également d'un système d'évitement de collisions à 3 mètres au dessus du fond marin et permet d'aller jusqu'à 6000 mètres de profondeur. Il mesure 5.5 m de long et 0.9 m de diamètre et peut atteindre une vitesse de 0.40 m/s. Hors de l'eau, il pèse 1800 kg et il est capable d'effectuer des déploiements d'une durée de 2 à 3 mois et d'une portée allant jusqu'à 1800 km.

Les familles d'AUV "REMUS" et "HUGIN" de Kongsberg (voir Fig. 1.9) permettent d'effectuer des recherches marines approfondies sur des profondeurs comprises entre 100 m et 6000 m de profondeur selon la configuration utilisée. Ils peuvent également être équipés d'une grande variété de capteurs tels qu'un sonar à ouverture synthétique ou un sonar à balayage latéral, un échosondeur multifaisceaux, un profileur de fond, une caméra, une CTD, un courantomètre acoustique à effet doppler (*Acoustic Doppler current profiler* - ADCP).



Figure 1.8 – AUV Autosub6000 du NOC



(a) Hugin

(b) Remus

Figure 1.9 – AUV Hugin et Remus de Kongsberg

Si on se concentre sur des configurations d’engins permettant d’atteindre des profondeurs plus faibles, on peut citer le “Girona 500” (voir Fig.1.10) qui est commercialisé par la société IQUARobotics issue des développements à l’Université de Girona. Il est composé de 3 torpilles qui confèrent une grande stabilité. Un volume de 35 litres est disponible pour sa charge utile qui est configurable en fonction des missions. Cet engin peut atteindre 500 m de profondeur et a une autonomie de 6h.

Des formats accès grands publics sont également disponibles, permettant de facilement déployer les engins en mer par un humain de par leur faible poids. Ces derniers ont toutefois des capacités limitées en termes d’autonomie et de profondeur maximale. Dans cette catégorie, on peut noter l’existence du “YUCO” (voir Fig. 1.11 (a)) développé par la société SEABER permettant d’atteindre une profondeur de 300 m. Ce dernier pèse environ 9.5 kg et peut atteindre une vitesse supérieur à 3 m/s. À une vitesse de 1 m/s, il peut avoir une autonomie de 10h de mission en mer. Le “YUCO” peut être équipé de différentes charges utiles permettant de réaliser des mesures de conductivité et de température, de la mesure de bruit ou du scanning. Dans cette même catégorie, on peut trouver les “LAUV”(*Light Autonomous Underwater Vehicle*) développés par OceanScan-MST (voir Fig. 1.11 (b)). Ces engins ont un poids allant de 15 à 34 kg et peuvent descendre à 100 m de profondeur. Ils peuvent atteindre une vitesse de 2.5 m/s. A une vitesse de 1.5 m/s, leur autonomie peut dépasser 8h.

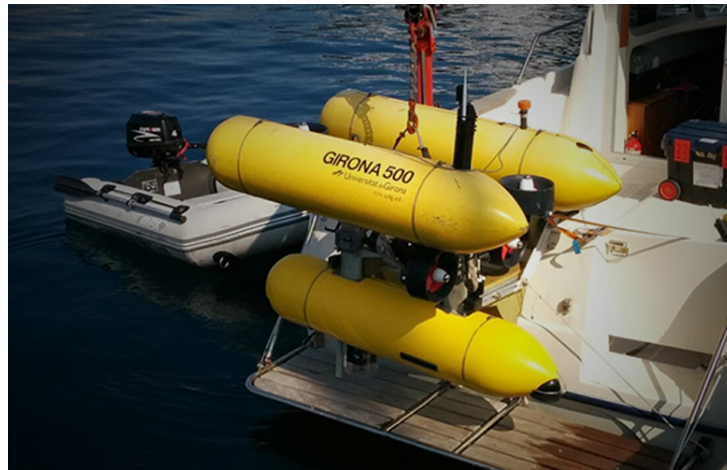


Figure 1.10 – AUV Girona 500 de IQUARobotics



(a) YUCO

(b) LAUV

Figure 1.11 – AUV YUCO et LAUV

1.2.3 Planeurs sous-marins

Les planeurs sous-marins sont des drones autonomes qui, contrairement aux drones présentés précédemment, n'utilisent pas de propulseur à proprement parler mais qui reposent sur un phénomène physique appelé la poussée d'Archimède. Ils font varier leur flottabilité et la position d'éléments pesants au sein de leur corps (généralement leur batterie) pour monter et descendre dans la colonne d'eau. Ils font ainsi varier leur densité interne afin de "planer" entre la surface et la profondeur désirée.

La plupart des planeurs permettent d'aller jusqu'à 1000 m de profondeur. Ces engins se déplacent horizontalement à des vitesses d'environ 0.5 nœud (0.25 m/s) tout en consommant peu d'énergie de par l'absence de propulseur.

Les planeurs ont une vitesse suffisante pour progresser dans les zones présentant de faibles vitesses de courant, ces derniers étant sensibles aux forts courants marins ou océaniques pouvant les faire dériver de leurs trajectoires. Leur propulsion à faible vitesse dérivée de la flottabilité permet d'augmenter considérablement l'autonomie et la durée des missions réalisables par rapport aux véhicules fonctionnant avec des hélices électriques, ce qui permet

d'étendre les études océaniques de quelques heures à plusieurs mois, et sur des milliers de kilomètres.

La trajectoire d'un planeur consiste en des profils de données ascendants et descendants en dent de scie sur des échelles temporelles et spatiales inaccessibles aux autres AUV. Toutefois ces drones ne disposent pas de communication synchrone, ils sont autonomes mais remontent régulièrement à la surface afin de communiquer leurs positions à une base reliée à la Terre et d'y recevoir des ordres.

Ces engins, de par leur poids allant de 50 à 70 kg pour les plus grosses configurations, sont facilement déployables par un être humain et ne mobilisent pas nécessairement un navire hauturier pour leur déploiement et leur récupération puisqu'ils peuvent être mis en mer à partir d'un semi-rigide. Ces engins étant autonomes et réalisant plusieurs mois de missions en mer, il n'est pas nécessaire d'avoir un navire sur zone pour les recharger quotidiennement comme les AUV ou pour les contrôler comme pour les ROV. Un exemple de déploiement de planeurs SeaExplorer en mer Méditerranée est donné sur la figure 1.12.



Figure 1.12 – Déploiement d'un planeur SeaExplorer en mer Méditerranée

Un planeur est profilé pour l'hydrodynamisme afin d'effectuer des missions de longue durée. Selon [83], le cône avant embarque la charge utile alors que la partie arrière est dédiée au contrôle de la navigation. Enfin, il dispose d'un mât pliable qui permet au planeur de communiquer sa position et ses coordonnées et recevoir des ordres de pilotage.

Ces engins ont été créés afin de répondre à un besoin de mesures sur des échelles spatiales et temporelles plus larges que ce que les autres types d'engins sous-marins peuvent proposer. Ils sont conçus pour effectuer des missions de surveillance de longue durée, comme la collecte de données océanographiques sur de vastes zones. Ils peuvent être équipés de capteurs pour mesurer des paramètres sur un important volume d'eau tels que la température, la salinité, la turbidité et d'autres caractéristiques océaniques.

Les applications océanographiques des planeurs sont diverses, ils peuvent donner des observations de la dynamique côtière, à méso-échelle et à sub-méso-échelle [100, 99] (par exemple les remontées d'eau, les tourbillons, les fronts ...), permettre d'étudier les processus de mélange et transport de l'eau et de l'énergie [126, 110] (par exemple la variabilité des systèmes de courants limitrophes). Ils peuvent être utilisés pour étudier l'impact de l'assimilation de leurs données sur les modèles océaniques [60, 90], réaliser de la détection acoustique de l'activité biologique et géologique [93, 101] (mammifères, poissons, volcans sous-marins, etc.) et étudier les transports et la remise en suspension des sédiments [51, 22].

Plusieurs configurations de planeurs existent à l'heure actuelle, parmi lesquelles on peut citer le "Slocum" proposé par Teledyne Technologies [128], le "Spray" de Bluefin Robotics [113], le "Seaglider" de Konksberg [38] et le "SeaExplorer" développé par Alseamar [40].

Ces engins ont des caractéristiques similaires avec pour certains quelques particularités. Le "Slocum" par exemple (voir Fig.1.13) est équipé d'un gouvernail sur l'arrière afin de changer son cap et avoir ainsi un faible rayon de giration. Cet engin est également équipé d'une "vessie" à air externe qui peut être gonflée à la surface par une petite pompe afin d'augmenter la flottabilité de l'engin en surface et avoir une position d'antenne émergente.

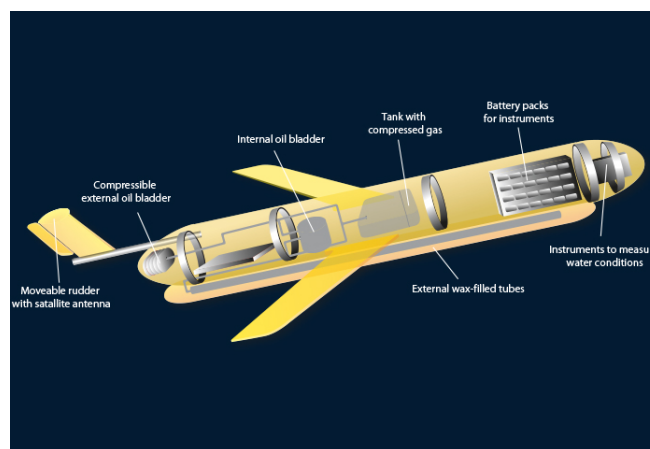


Figure 1.13 – Planeur Slocum de Teledyne Technologies

Le "Spray" (Fig. 1.14) ne possède pas d'antenne externe, elle est intégrée dans une de ses ailes qu'il déploie en dehors de l'eau à la surface afin de communiquer.

Enfin, le "SeaExplorer" (Fig. 1.15) est le premier planeur à être équipé d'une batterie rechargeable mobile, ce qui lui a permis de battre des records de persistance de mesure de données,

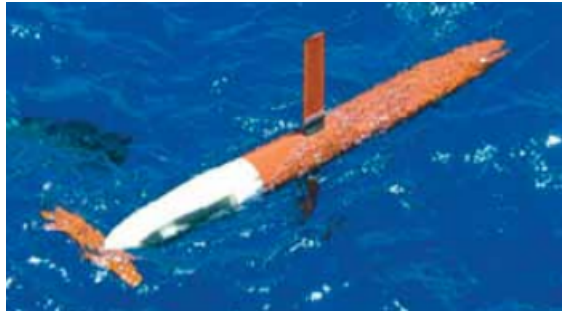


Figure 1.14 – Planeur Spray de Bluefin Robotics

le temps nécessaire à une recharge étant bien inférieur au temps de remplacement d’une batterie primaire. Il est également équipé d’une section charge-utile modulaire (déconnectable) à l’avant. Cet engin sera présenté plus en détails dans la partie suivante.

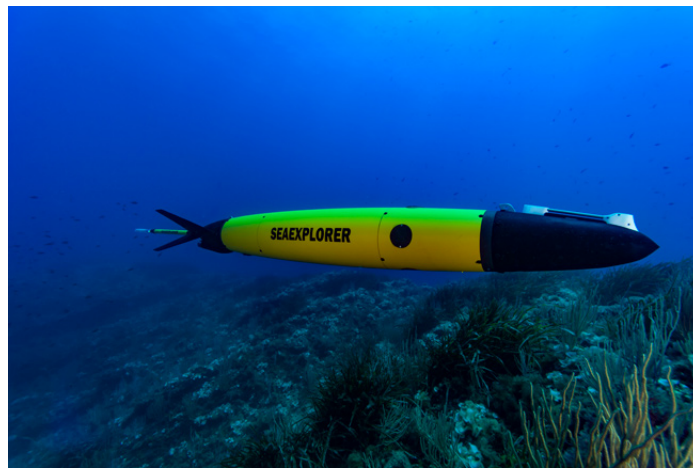


Figure 1.15 – Planeur SeaExplorer d’Alseamar

Une plateforme du nom de “OceanOPS” [2] permet de partager les données mesurées par différents systèmes d’observations. Sur cette plateforme, il est donc possible d’avoir accès aux nombres de déploiements réalisés par les différents fabricants de planeurs sous-marins dans le monde ainsi que le nombre de jours passés en mer. La figure 1.16 permet de mettre en avant le nombre de jour en mer moyen par déploiement des 4 planeurs cités précédemment. Cela permet de montrer l’intérêt d’utiliser les planeurs sous-marins dans des missions de longue durée de par leurs durances importantes.

La plupart des travaux de recherche récents sur les planeurs sous-marins se concentrent sur le développement d’algorithmes de planification de trajectoire capables de prendre en compte un environnement variable dans le temps [68, 25, 61, 76, 69] et sur le contrôle de la formation et la coordination de plusieurs planeurs sous-marins [129, 78]. Dans notre cas, l’objectif à long terme est de rendre le système de pilotage des planeurs plus autonome.

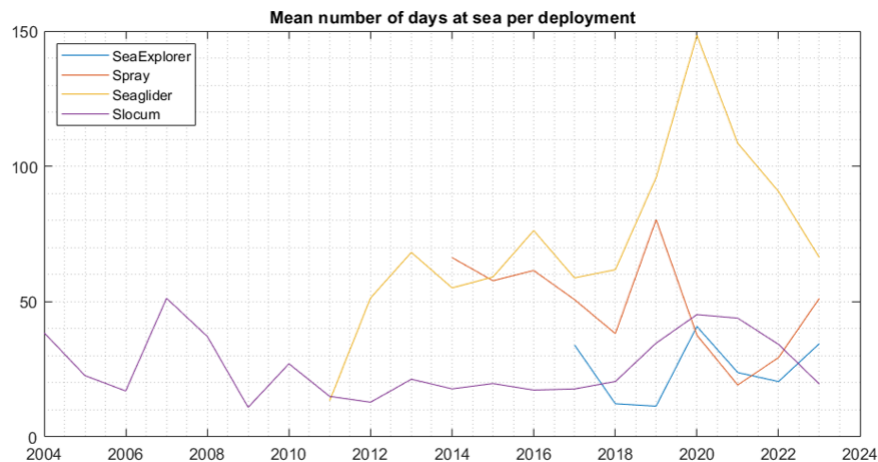


Figure 1.16 – Nombre de jours moyen en mer par déploiement des planeurs

1.2.4 Comparaison des engins sous-marins

Le tableau 1.1 regroupe les informations trouvées dans la bibliographie des principales catégories d'engins sous-marins évoquées.

	ROV	AUV	Planeur
Cas d'applications	Inspection / exploration Intervention : réparation et maintenance Collecte d'échantillons	Cartographie optique et acoustique Exploration profonde Surveillance de l'environnement	Surveillance longue durée Collecte de données océanographiques dans un volume important
Type de couverture	Ponctuelle	Linéaire / Surfacique	Volumique
Motricité	Propulsés	Propulsés	Variation de flottabilité
Vitesse (m/s)	Entre 1 et 3	Entre 0.40 et 2.5	Jusqu'à 0.5
Autonomie	Illimitée si relié à un navire	Entre 6h et 72h	Entre 4 et 18 mois
Comportement	Piloté par câble	Complètement autonome	Autonome avec remontées en surface
Dimensions	Jusqu'à 4.25 m de long Jusqu'à 2.3 m de large Jusqu'à 2.77 m de hauteur	Jusqu'à 6.6 m de long Jusqu'à 1 m de large Jusqu'à 1 m de hauteur	Jusqu'à 2.80 m de long Jusqu'à 1 m de large Jusqu'à 0.50 m de hauteur
Masse dans l'air (kg) Profondeur maximale (m)	Entre 100 et 6000 Entre 100 et 11000	Entre 15 et 2200 Entre 100 et 6000	Entre 50 et 70 Entre 50 et 1000
Charge utile	Caméras HD, bras manipulateurs, CTD, DVL, capteurs optiques, chimiques, sonars, échosondeurs	Caméras, sonars, magnétomètres, fluorimètre, capteurs d'oxygène dissous, CTD, des capteurs de pH et de turbidité	CTD, capteurs d'oxygène dissous, ADCP, capteurs de chlorophylle, turbidité, nitrates, capteurs de fluorescences, rétrodiffusion, acoustiques, écho-sondeur, capteurs de méthane, hydrocarbures, turbulences, hydrophones

Tableau 1.1 – Comparaison des engins sous-marins

Les charges utiles de ces engins sont similaires toutefois les cas d'applications de ces derniers diffèrent. En effet, les ROV vont être utilisés là où l'interaction avec l'humain est encore nécessaire pour des applications d'inspection et de maintenance industrielle, tandis que les AUV servent principalement pour des tâches de plus en plus automatisables comme la cartographie en couvrant la surface des fonds marins.

Les planeurs sous-marins sont davantage utilisés dans la caractérisation dans le temps et l'espace des phénomènes océanographiques de plus grande échelle spatio-temporelle que ce qu'il est possible de faire avec les AUV.

Outre le fait que les planeurs sous-marins ne soient pas propulsés comme les ROV et les AUV, ces engins se distinguent par le temps qu'ils peuvent passer en mer et donc par leur volume de

données mesurées. Contrairement aux ROV et AUV qui peuvent parfois nécessiter de grands moyens de déploiement, le gabarit moyen des planeurs sous-marins permet une mise en oeuvre beaucoup plus simple avec, en général, un semi-rigide avec 2 personnes minimum. De plus, les ROV ont besoin d'être pilotés par un opérateur ce qui peut limiter leur durée d'utilisation, les AUV n'étant limités que par leurs capacités énergétiques, il est nécessaire de récupérer ces engins sur le navire pour les recharger avant de les redéployer.

Toutefois ces trois plateformes sont complémentaires avec des échelles spatio-temporelles qui leurs sont propres comme décrit dans la figure 1.17 issue de [77].

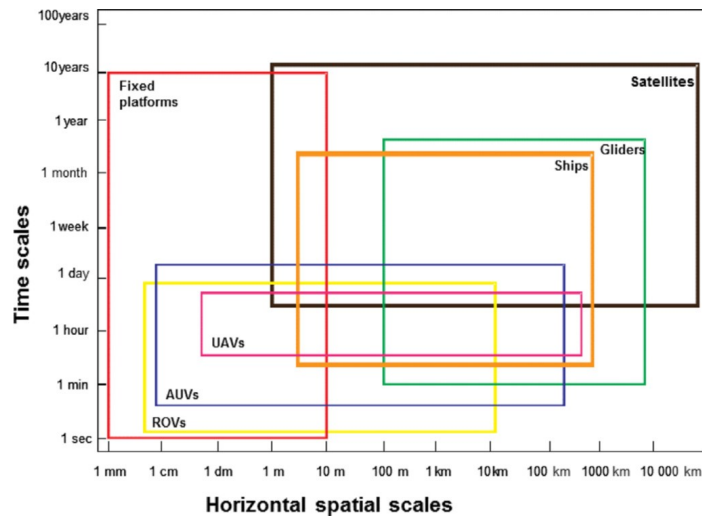


Figure 1.17 – Échelles spatio-temporelles de différentes plateformes

En résumé, les ROV permettent d'effectuer des tâches d'intervention qu'il n'est pas possible de réaliser avec les autres types d'engins. Les AUV permettent d'avoir accès à de très grandes profondeurs et caractériser une surface mais sont limités par leur énergie disponible là où les planeurs sous-marins sont utiles pour caractériser un volume d'eau important. Ces derniers sont discrets toutefois ils sont beaucoup moins rapides et donc plus assujettis aux conditions environnementales que les autres plateformes sous-marines existantes. C'est la raison pour laquelle la phase de préparation de mission est essentielle dans leur cas. Il est impératif de prendre en compte les variabilités environnementales. Les AUV étant souvent utilisés dans des missions de couvertures de zones, la plupart du temps réalisées via des trajectoires dites en "boustrophédon" (voir l'exemple de la figure 1.18).

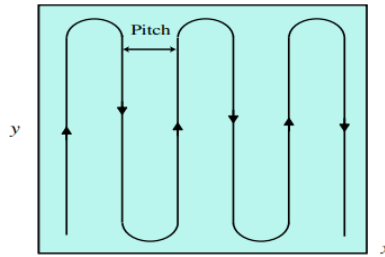


Figure 1.18 – Exemple de parcours en boustrophédon [89]

1.3 Le planeur sous-marin SeaExplorer

Le SeaExplorer, planeur sous-marin développé par Alseamar, peut être personnalisé avec une grande variété de capteurs dont l’objectif est de répondre aux différentes applications marines que nous avons détaillées dans la section précédente 1.2.3. La grande échelle de ces phénomènes océanographiques à caractériser explique également l’intérêt croissant pour l’utilisation de flottes de planeurs sous-marins [73, 74, 13, 15].

1.3.1 Présentation générale

Le planeur SeaExplorer d’Alseamar peut être subdivisé en une section “charge utile”, une section “véhicule” et une section de communication comme le montre la Fig. 1.19 (pour plus de détails sur ses spécifications techniques, voir [6] et le tableau 1.2).

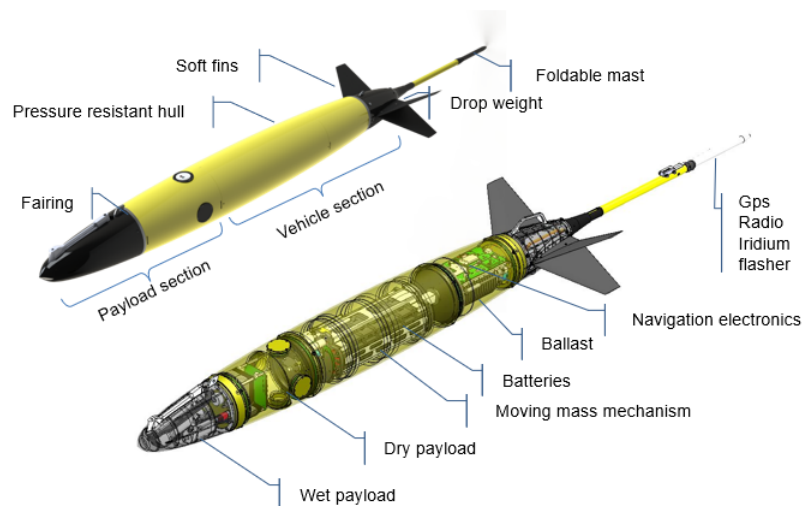


Figure 1.19 – Planeur SeaExplorer ouvert

Comme tout planeur sous-marin, le SeaExplorer ne dispose pas de système de propulsion consommateur d’énergie, ce qui le rend très endurant. Un capteur “AHRS” (*Attitude Heading*

Roll Sensor) intégré fournit des mesures d'angles de roulis, de tangage (*pitch* en anglais) et de cap. La profondeur est mesurée séparément par un capteur de profondeur.

Le déplacement sous l'eau de l'engin se fait en "planant" entre la surface et la profondeur désirée, en utilisant la gravité pour descendre le long de la colonne d'eau puis la force d'Archimède pour remonter. En effet, le véhicule est équipé d'une vessie permettant une variation de son volume et donc de sa densité (voir Fig. 1.20 (a)). En modifiant son comportement grâce à un système de vis sans fin (décrit sur la Fig. 1.20 (b)) qui, ajouté aux changements de flottabilité, permet à l'engin de planer pendant sa plongée, transformant ainsi sa vitesse verticale en vitesse horizontale. Enfin, en roulant à bâbord ou à tribord, le planeur est capable de suivre un cap désiré.

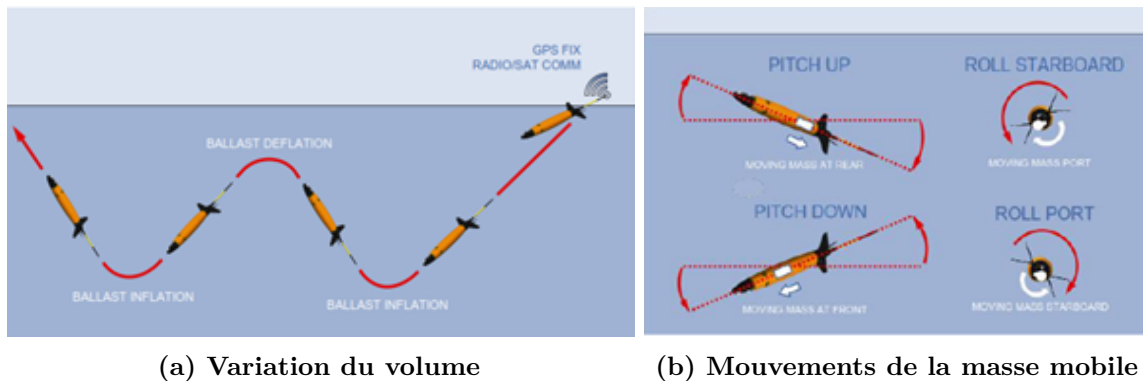


Figure 1.20 – Description du fonctionnement de la vessie et de la masse mobile

Pour la phase ascendante, la vessie est gonflée grâce à une motopompe qui est commandée pour générer une valeur de débit constante indépendamment de la pression environnante due à la profondeur du véhicule. Néanmoins la consommation d'énergie de cet actionneur varie avec cette pression et donc avec la profondeur. La durée du gonflage est modulée pour atteindre la valeur de flottabilité souhaitée.

La Fig. 1.21 donne un aperçu du fonctionnement du planeur en ce qui concerne son niveau de contrôle. Comme le montre cette dernière, les trois actionneurs (entourés en rouge sur la figure) sont contrôlés par leur propre contrôleur PID. Au cours d'un virage (utilisation de la masse mobile angulaire) ou d'un vol (utilisation du ballast et *pitch* dû à une masse mobile linéaire), les changements de flottabilité, de cap et de tangage impliquent que les trois actionneurs soient pilotés par un contrôleur PID *anti-windup* jusqu'à ce que l'erreur soit diminuée de manière significative.

Comme ces actionneurs ne sont pas réversibles (le pack batterie est monté sur une vis sans fin, ce qui rend ces actionneurs irréversibles), une telle méthode est intéressante pour limiter la consommation d'énergie. Cela signifie également que le temps pendant lequel les actionneurs sont activés est finement calculé afin de fournir au planeur les performances souhaitées à savoir la vitesse verticale désirée, le cap désiré et le tangage désiré.

Le temps d'échantillonnage de la boucle des actionneurs est de 20 s, ce qui est suffisamment

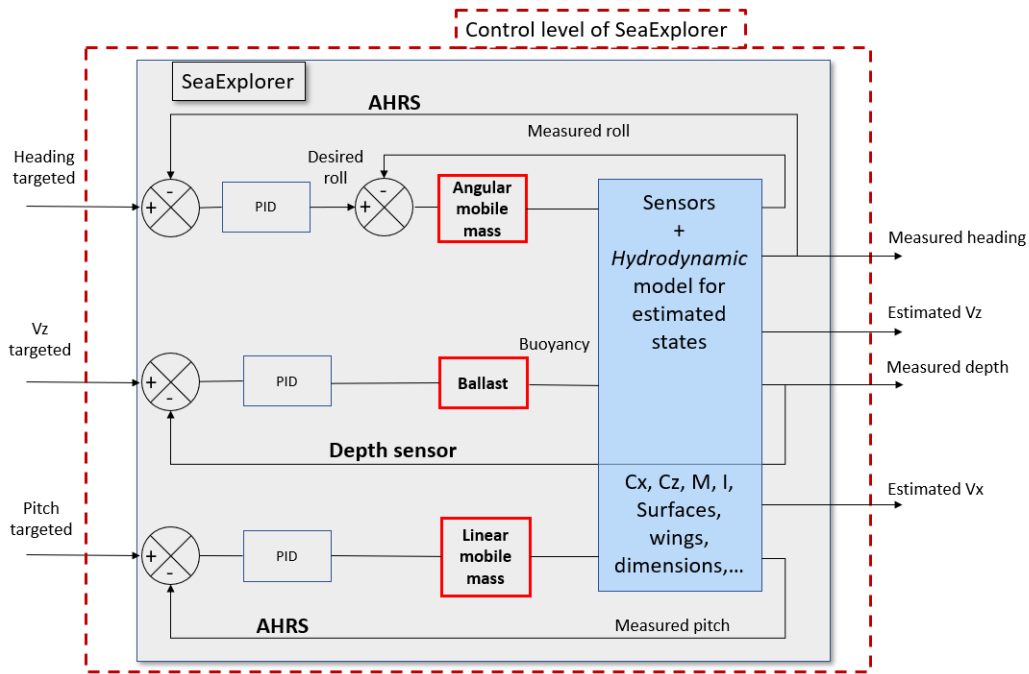


Figure 1.21 – Niveau de contrôle du planeur

faible par rapport à la dynamique du véhicule (un demi-tour dure environ 330 s, tandis qu’une transition entre les phases de montée et de descente dure environ 90 s).

La masse mobile linéaire (liée au tangage) et la masse mobile angulaire (liée au roulis) sont toutes deux contrôlées par un contrôleur PID qui est alimenté par les signaux de retour des capteurs, c’est à-dire le tangage et le cap. Pendant son cycle de navigation, le planeur plonge ou remonte avec un angle de *pitch* cible désigné par α (voir Fig. 1.22) pendant ses “yos” (trajectoire en forme de dent de scie sous l’eau comme illustré sur la figure 1.23). Il convertit ainsi sa vitesse verticale (V_z dans la Fig. 1.22) en vitesse horizontale (V_x dans la Fig. 1.22).

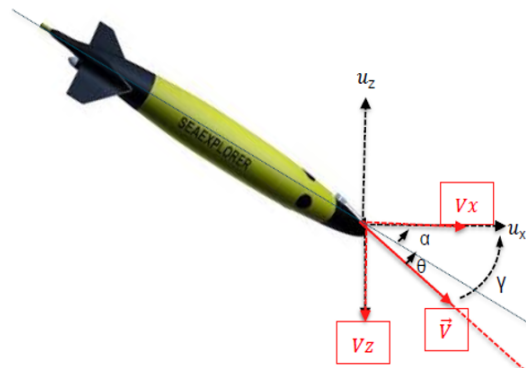


Figure 1.22 – Description des angles et des vitesses

Ces cycles sont composés de phases de navigation descendantes et ascendantes, comme décrit dans la figure 1.23, entre une immersion minimale (z_t) et une immersion maximale (z_b)

compte tenu d'un paramètre de "multi-yos" (*surfacing rate - sr*) entre l'immersion minimale et maximale (il se peut que le planeur ne remonte pas à la surface après chaque ascension, il réalise alors plusieurs "yos" sous-marins).

Lorsque le planeur atteint l'immersion de surface (z_s), la masse mobile et le ballast sont réglés de manière à déployer l'antenne hors de l'eau afin de commencer la phase de communication (état 116 *Transmitting* - Fig. 1.23). Ces paramètres sont réglables directement depuis la plateforme de pilotage GLIMPSE (présentée un peu plus tard dans la section 1.3.5) depuis laquelle les pilotes de planeurs peuvent définir un profil de vol. Un profil de vol comprend donc les paramètres suivant : $V_z, \alpha, z_t, z_b, z_s, sr$.

La position GPS est calculée et la position exacte est transmise par radio-fréquence ou Iridium à la base. Les ordres et données de navigation sont reçus et transmis. Un résumé des principales spécifications du planeur SeaExplorer figure dans le tableau 1.2.

Taille du corps (DxL)	0.25 m x 2 m + 1 m d'antenne pliable
Envergure	56.5 cm sans ailes
Poids	59 kg dans l'air
Profondeur maximale	1000 m
Volume de ballast	1000 cc (± 500 ml)
Vitesse	Nominale 0.5 kt / Maximale 1 kt
Batterie	Lithium primaire
Endurance	1300 km (64 jours) / 3200 km (160 jours) avec un capteur GPCTD-DO échantillonnant à 4 s

Tableau 1.2 – Spécifications techniques du SeaExplorer

1.3.2 Phases de navigation

Au cours d'un "yo", le planeur suit différentes séquences de navigation, et donc différentes phases numérotées de 100 à 118 (cf. Fig. 1.23).

- État 115 (*Surfacing*) : la masse mobile et le ballast sont réglés de manière à déployer l'antenne hors de l'eau en vue de la communication. Le véhicule gonfle la vessie (position +400 ml jusqu'à 500 ml) et la masse mobile se déplace vers l'avant pour piquer du nez
- État 116 (*Transmission*) : le planeur communique en surface. La position GPS est calculée et la position exacte est transmise par radio fréquence ou Iridium. Des ordres de navigation et des données peuvent être reçus et transmis.
- État 110 (*Inflexing down*) : le planeur commence à s'incliner vers le bas. Le ballast est ajusté (la vessie d'huile est dégonflée) pour alourdir le planeur et la masse mobile se déplace vers l'avant pour le faire tanguer vers le bas.
- État 100 (*Going down*) : le ballast est en position de plongée. Selon la configuration, il ajuste l'angle de tangage et le cap.

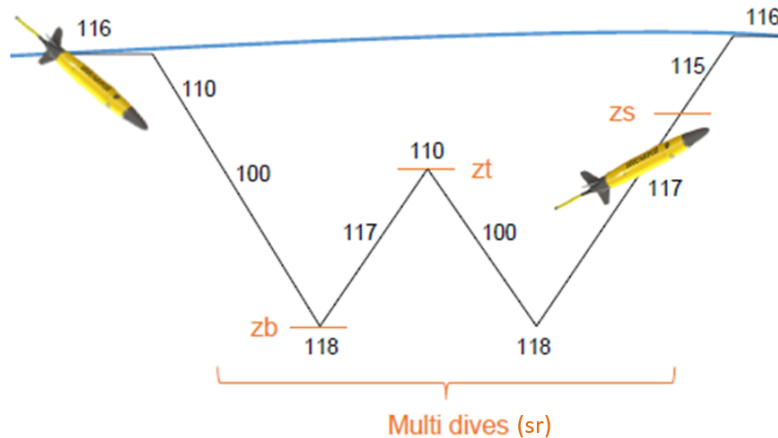


Figure 1.23 – Les différentes phases de navigation

- État 118 (*Inflecting up*) : une fois la profondeur ou l'altitude atteinte, le planeur commence à s'incliner vers le haut. Le ballast est ajusté (gonflement de la vessie d'huile) pour rendre le planeur flottant et la masse mobile se déplace vers l'arrière.
- État 117 (*Going up*) : le ballast est maintenu dans la même position lors du retour à la surface. Le planeur contrôle l'angle de tangage et le cap.

1.3.3 Modèle hydrodynamique et énergétique

Le rôle du modèle hydrodynamique est de calculer l'angle d'attaque (θ) qui varie avec le *pitch* (α). Un tel modèle dépend des caractéristiques du véhicule considéré (dimensions, poids, positions des centres de flottabilité et de masse, coefficient de traînée 3D...).

La plupart du temps, le planeur se déplace à une vitesse constante (entre deux changements de direction), ce qui permet de le supposer en régime stationnaire. Ainsi, en considérant les forces de traînée D_x , D_y , le poids P , la flottabilité B et la portance des ailerons L , le modèle donne le *pitch* α , la vitesse de glissement V et l'angle d'attaque θ (Figures 1.22 et 1.24).

En raison de la non-linéarité des forces de traînée et des vitesses, le modèle hydrodynamique du SeaExplorer, directement intégré dans l'engin, s'appuie sur des tables spécifiques pour évaluer toutes ses caractéristiques courantes. Ce modèle précis fournit les vitesses verticales et horizontales (respectivement V_z , V_x) utilisées pour estimer la position du planeur pendant une plongée.

Les paramètres mécaniques intrinsèques du véhicule sont inclus dans le modèle hydrodynamique. Les sorties de ce modèle sont liées au déplacement du planeur, qui est soit estimé, soit mesuré. Pendant les phases de montée et de descente, la consommation d'énergie est essentiellement due à la charge utile. Les erreurs de cap et de *pitch* sont négligeables car les perturbations de ces grandeurs sont rejetées par leurs contrôleurs respectifs.

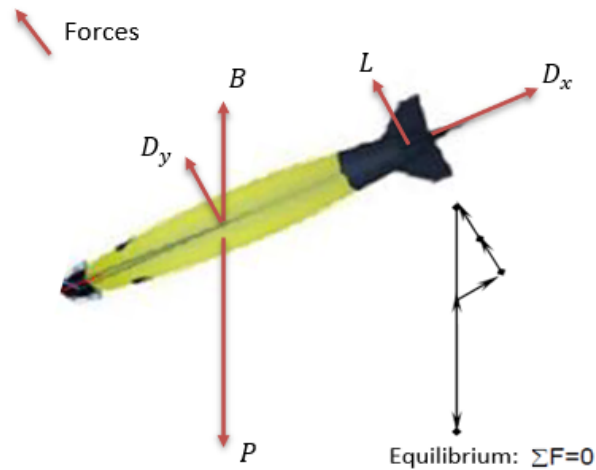


Figure 1.24 – Équilibre statique des forces

De plus, comme le circuit hydraulique du ballast est équipé d'une motopompe et d'une vanne, et qu'il ne présente ni fuite, ni compressibilité de fluide, sa consommation est nulle pendant les phases de navigation, exception faite des phases de transition (*inflecting up and down, transmitting, surfacing*).

Ce sont principalement les actionneurs (i.e. les masses mobiles et le ballast), l'électronique de navigation et la charge-utile qui sont responsables de la consommation d'énergie. En ce qui concerne les masses mobiles, le contrôleur PID les amène à maintenir une position extrême pendant que le planeur change d'orientation (*pitch* et/ou *cap*) jusqu'à ce que l'erreur d'orientation devienne faible. Cela signifie que indépendamment de la plage de changement d'orientation, la course des masses mobiles est toujours la même, et donc la consommation d'énergie aussi en fonction de la phase considérée. Elle ne dépend pas de la profondeur contrairement à l'actionnement du ballast dont la consommation d'énergie varie linéairement avec la pression de l'eau, donc la profondeur. La puissance considérée est liée à la profondeur. L'ensemble du planeur SeaExplorer est représenté par un modèle physique (hydrodynamique), un modèle expérimental de comportement et un modèle de contrôle (pour chaque variable de contrôle, à savoir la flottabilité, le roulis et le *pitch*).

1.3.4 Compensation de courant

Le planeur contrôle en permanence son cap grâce à un contrôleur PID amélioré alimenté par les données du compas, qui détermine l'angle de roulis du véhicule. A partir du modèle hydrodynamique intégré dans l'engin, ce dernier est capable de calculer une estimation de sa position (*Dead-Reckoning* en anglais, "*dr₀*" sur la Fig. 1.25) lors de sa plongée. Néanmoins, les courants marins éventuels peuvent générer une dérive du planeur.

Afin de limiter le changement de trajectoire, une estimation du courant moyen est donnée

à partir du dernier “yo” que le planeur vient d’effectuer. Ce courant moyen représente le courant perçu par le planeur dans la colonne d’eau en supposant que ce dernier est stable pendant la durée de sa plongée et homogène dans l’espace et le long de toute la colonne d’eau. Ce courant moyen est la différence entre la position estimée et la position réelle en surface de l’engin (donnée par une acquisition de position GPS) divisée par la durée de sa plongée (“ B_1 ” sur la Fig. 1.25).

Avoir une idée du courant dans la zone permet de calculer une position corrigée de la dérive du planeur (“ dr_{cc} ” sur la Fig. 1.25) qui est, à l’heure actuelle, la meilleure estimation de position sous l’eau qui peut être donnée pour le planeur SeaExplorer sans aucun outil de mesure.

En surface, un cap est calculé pour atteindre le *waypoint* visé (dans le sens des aiguilles d’une montre à partir du Nord, “ H_1 ” sur la Fig. 1.25).

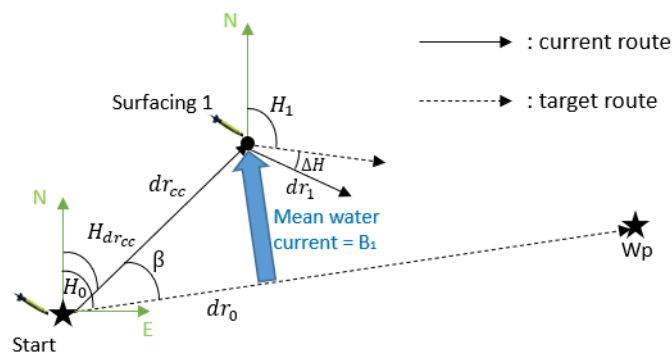


Figure 1.25 – Compensation de courant

La compensation du courant consiste donc à calculer le paramètre ΔH sur la Fig. 1.26 pour suivre un nouveau cap selon l’équation (1.1) :

$$B_1 - B_2 = 0 \Leftrightarrow dr_1 \cdot \sin(\Delta H) - dr_{cc} \cdot \sin(\beta) = 0 \Leftrightarrow \Delta H = \arcsin\left(\frac{dr_{cc} \cdot \sin(\beta)}{dr_1}\right) \quad (1.1)$$

avec $\beta = H_0 - H_{dr_{cc}}$

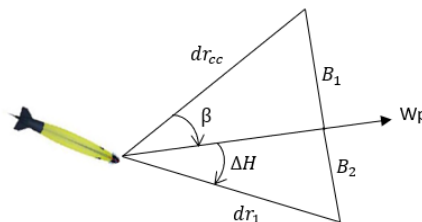


Figure 1.26 – Calcul de ΔH

Le cap souhaité actualisé correspond au cap “ H_1 ” de la Fig. 1.25 auquel est ajouté le paramètre ΔH . Cette compensation du courant est mise à jour à chaque fois que le planeur fait surface.

1.3.5 Contrôle-commande

Avant de démarrer une mission planeur, il faut définir la configuration du véhicule. Il s'agit de choisir le type de batteries et un ensemble de capteurs nécessaires au bon déroulement de la mission. Ces éléments constitueront la charge utile embarquée sur le véhicule. Actuellement, les tâches de planification et de navigation sont effectuées par un pilote tout au long de la mission afin de définir le pilotage des planeurs par le biais du système de gestion de mission appelé GLIMPSE, GLider Mission Piloting SystEm [19] (voir la Fig. 1.27 pour une capture d'écran de la plateforme).

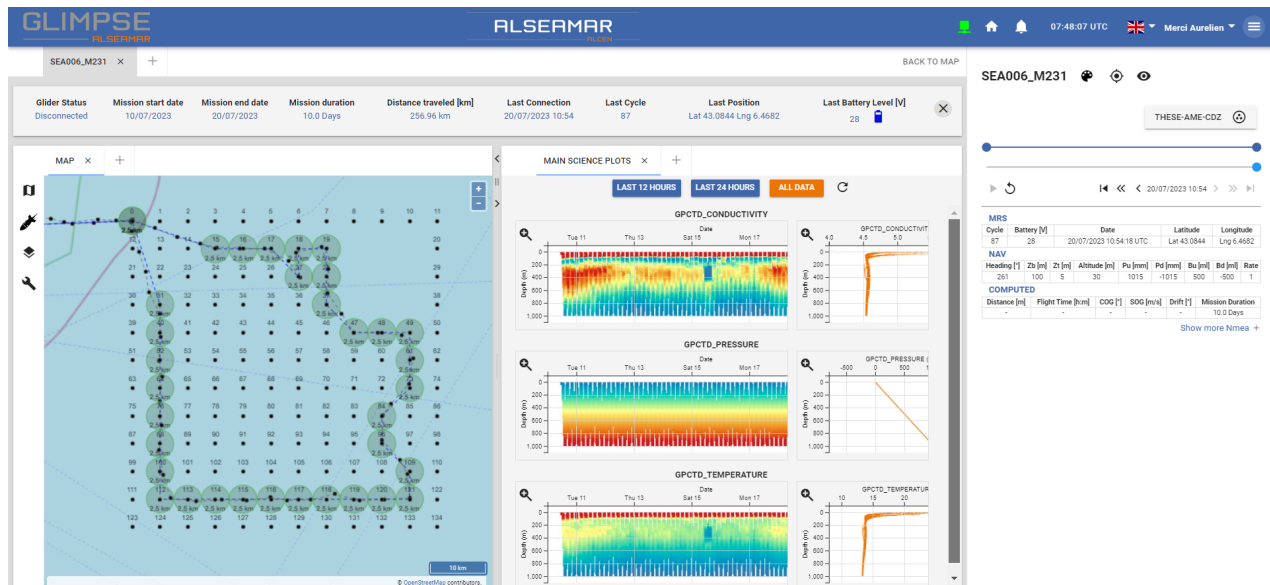


Figure 1.27 – Système de gestion de mission

Un tel outil transmet les commandes des pilotes aux planeurs, recueille et affiche tous les états du véhicule pour les pilotes. Cette phase de communication est exécutée à chaque remontée en surface des engins et dure environ 5 minutes. Toutes les données contrôlées sont donc fréquemment mises à jour et aident ainsi le pilote à affiner les paramètres de la mission si nécessaire. Ces données sont accessibles pendant la mission afin d'obtenir une vue synoptique de ce qui se passe réellement. Ainsi, le plan de mission peut être adapté en fonction de ce qui est perçu par les véhicules.

Le pilote d'un SeaExplorer peut définir une position à viser par le planeur, appelée *waypoint*, qui est définie par ses coordonnées de latitude et de longitude et par un rayon (ou une distance) de validation (un exemple de rayon de validation est mis en avant sur la figure 1.27). Si le planeur entre dans cette zone de validation, le *waypoint* est considéré comme atteint. Lorsqu'un *waypoint* est défini, le système de gestion de mission recalcule et envoie le nouveau cap de navigation du véhicule à chaque remontée à la surface afin d'atteindre le *waypoint* avec un profil de navigation prédéfini pour le segment en cours. On appelle "segment" une

trajectoire allant d'un *waypoint* initial à un *waypoint* cible. Les engins ont la possibilité d'être pilotés en consigne de cap avec une validation du *waypoint* en surface (mode *heading*) ou en mode *waypoint*. Ce dernier permet à l'engin de valider le *waypoint* lors de sa plongée et de remonter en spirale autour du point visé tout en restant dans son rayon de validation préalablement défini. Le système de gestion de mission GLIMPSE permet au pilote de définir un mode *single waypoint* (mode manuel) ou un mode *mission plan* (trajectoire à plusieurs *waypoints*) défini par une liste de *waypoints* et un profil de vol prédéfini.

Grâce à ses modèles internes et aux mesures des capteurs de navigation, le planeur estime sa position toutes les 20 secondes. La position réelle lors de la remontée à la surface et les trajectoires sont également affichées sur GLIMPSE pendant la mission. Elles sont affichées en coordonnées géographiques car la forme de la Terre peut avoir une influence sur la précision des trajectoires.

Que ce soit pour la phase de préparation de la mission ou pendant la supervision des missions, les pilotes d'Alseamar ont accès à une variété de cartes telles que les cartes de courants marins, les cartes bathymétriques, les cartes de température (voir Fig. 1.28). Ces cartes sont disponibles dans la base de données Marine Copernicus [8] ou depuis EMODnet (pour les données de bathymétries) [5] et aident les pilotes à définir un plan de mission réalisable pour les planeurs.

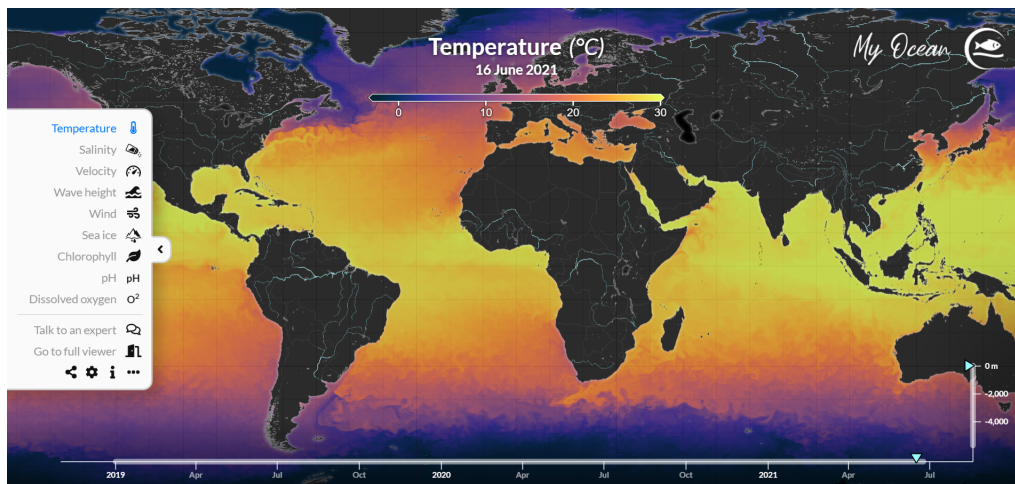


Figure 1.28 – Exemple de données de température accessibles depuis Marine Copernicus

Elles répondent également à un besoin opérationnel réel. Ces données peuvent être obtenues grâce à des mesures expérimentales menées sur une zone ou grâce à un modèle numérique (par exemple un modèle de courant marin). Ce dernier permet d'obtenir une couverture temporelle et spatiale plus importante que les données réellement issues d'observations. Il est également possible de récupérer les prévisions pour les prochains jours et de disposer des mesures en profondeur sur une certaine partie de la colonne d'eau. Ainsi, les modèles de courant demeurent les données les plus utilisées par les pilotes d'Alseamar en raison de

la sensibilité des planeurs aux courants marins. Ces données sont accessibles en 4D (3D + temps), elles jouent un rôle clé dans la phase de préparation et de supervision de mission. Cependant, il est important de noter que l'échantillonnage spatial et temporel de ces données est différent du pas d'échantillonnage temporel effectif du planeur.

Enfin, avant de commencer une mission, un modèle de consommation du planeur SeaExplorer est utilisé pour calculer le nombre total de segments réalisables. Un système de gestion de la batterie (BMS) est également intégré à la batterie du planeur. Il permet aux pilotes d'obtenir des informations sur le niveau de tension de la batterie pendant la mission par l'intermédiaire de la plateforme de pilotage, permettant ainsi d'adapter le plan de mission en conséquence. Quel que soit le nombre de véhicules utilisés dans la zone d'opération, le point de déploiement et les points à cibler sont définis avant le début de la mission.

La Fig. 1.29 illustre les trois niveaux fonctionnels du comportement du planeur par rapport à sa mission actuelle (planification), par rapport à son environnement (navigation) et par rapport à ses propres états internes et à ses actionneurs pour les modifier (contrôle). Le dernier niveau consacré aux caractéristiques du planeur est détaillé dans la section 1.3.3. Le niveau de navigation traite du profil de vol et du cap à suivre pour atteindre le prochain *waypoint*. Actuellement, la tâche de navigation est assurée par le pilote qui doit définir manuellement les coordonnées du prochain *waypoint* mais aussi ajuster manuellement le profil de vol pour prendre en compte la profondeur maximale donnée par le relevé bathymétrique. Au-dessus de ce niveau, la planification est également assurée par le pilote qui doit éditer manuellement la liste des prochains *waypoints* à atteindre. Ces *waypoints* cibles peuvent également être fournis par des algorithmes de planification de trajectoire de haut niveau.

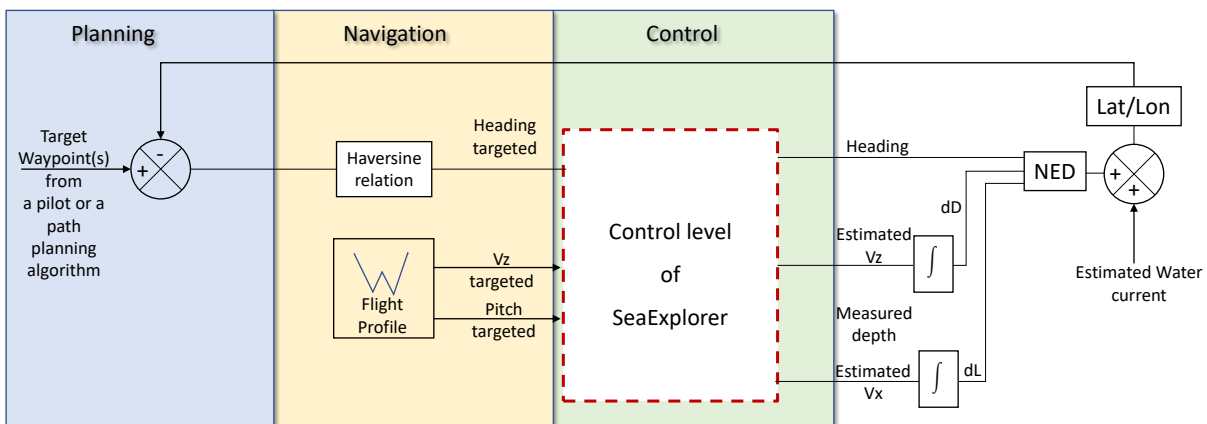


Figure 1.29 – Niveaux fonctionnels du SeaExplorer (planification, navigation, contrôle)

1.4 Problématiques détaillées

Au regard du pilotage actuel des planeurs sous-marins SeaExplorer, les pilotes d'Alseamar rencontrent des difficultés à fournir une estimation fiable des trois grandeurs suivantes : la consommation énergétique de l'engin, sa distance parcourue et la durée de la mission dans le cas mono-engin. Ce constat est encore plus vrai dans le cas multi-engins. Ces grandeurs d'intérêt sont importantes car directement reliées à l'engin qui est destiné à évoluer pendant plusieurs mois de mission en mer et peuvent être utiles lors de la phase de préparation de mission.

Cette phase consiste à :

1. Dimensionner la zone d'opération dans laquelle va évoluer le planeur (définition des *waypoints* que l'engin devra valider)
2. Déterminer l'ordre de passage par ces *waypoints*
3. Définir des profils de vol à adopter par l'engin (mode de pilotage plus ou moins rapide) ainsi que la composition de la charge utile, dépendante de l'autonomie de l'engin en fonction de ses profils de vol et de la durée de la mission souhaitée

En cours de mission, ce qui correspond à la phase de supervision, il est également important pour les pilotes de planeurs d'avoir accès à ces grandeurs propres aux planeurs. L'objectif est de pouvoir fournir une estimation de date de fin de mission afin de faciliter la récupération des engins en mer. Cela peut également permettre de réadapter le plan de mission initialement défini lors de la phase de préparation de mission dans l'éventualité où des aléas tels qu'une panne de planeur ou un courant très fort, peuvent survenir durant l'exécution de la mission des planeurs sous marins.

Il est important de pouvoir estimer ces trois grandeurs au cours du temps, ce qui permet de justifier le développement d'un simulateur de planeur SeaExplorer. Cela nous permettra de simuler ses missions en mode direct i.e. en lui fournissant la liste ordonnée des *waypoints* à visiter. Ce simulateur constitue une aide à la décision majeure pour les pilotes de planeurs, l'objectif étant que l'on se rapproche le plus possible de la réalité en prenant en compte le modèle hydrodynamique de l'engin, les courants marins, la consommation énergétique et le modèle comportemental du planeur. Ce simulateur serait donc utile dans les différentes phases de la mission des planeurs, toutefois le pilote resterait obligé de tester énormément de configurations différentes afin de déterminer le plan de mission le plus à même de répondre aux besoins opérationnels.

En effet, la préparation de la mission se révèle être une tâche extrêmement complexe de par le calcul des dimensions de la zone d'opération qui dépendent du nombre d'engins prévus pour la mission ainsi que de leur autonomie. L'autonomie des engins dépend quant à elle des profils de vol que les planeurs peuvent adopter pour la mission, ainsi que de la composition de la charge utile en termes de capteurs. Les profils de vol peuvent également dépendre des capteurs

utilisés qui peuvent contraindre l'engin en termes d'immersion maximale. De par la faible vitesse des planeurs sous-marins, la durée totale de la mission et donc l'autonomie des engins dépendent fortement des courants marins se trouvant sur la zone d'opération. Déterminer les points de déploiement et de récupération optimaux des engins ainsi que la taille de la flotte à utiliser sur zone peut également ajouter de la complexité à la phase de préparation de mission. Les pilotes d'Alseamar y voient un réel intérêt, notamment dans un cas d'application de couverture de zone car la technique qu'ils utilisent souvent consiste à réaliser un parcours en boustrophédon de la zone d'opération dans le cas mono-engin. Cette technique ne prend pas en compte les courants présents sur la zone d'opération. Dans le cas multi-engins, la tâche devient trop complexe comme mis en évidence sur la figure 1.30. On y présente une mission réalisée dans le Golfe du Mexique en 2020 par Alseamar pendant laquelle deux planeurs SeaExplorer, pilotés manuellement, devaient valider un ensemble de cases d'une zone prédéfinie, une case étant considérée comme validée (en rouge sur la figure) lorsqu'un engin réalise une mesure de donnée en profondeur dans cette dernière. On y observe de nombreux dépassements de la zone d'opération et des redondances de passage sur certaines cases de la grille déjà parcourues par un autre engin.

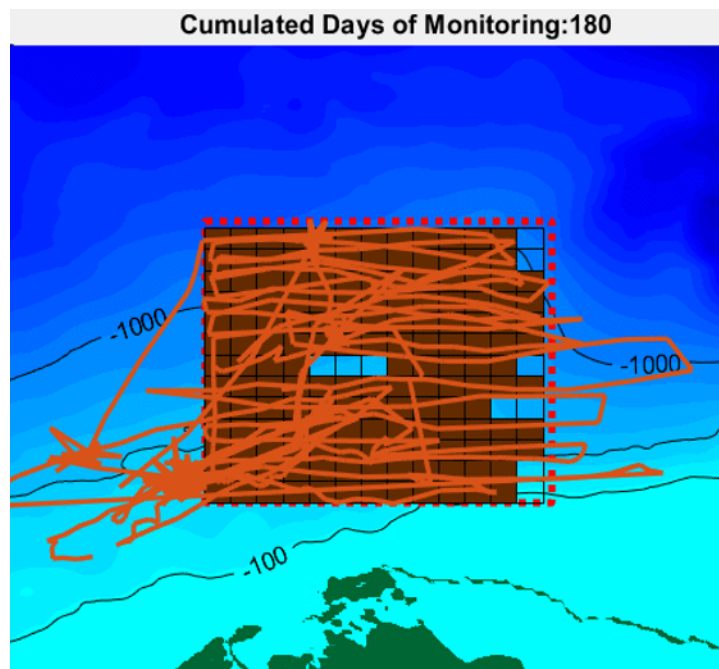


Figure 1.30 – Couverture de zone manuelle avec 2 planeurs

Une fois un simulateur de mission de planeurs développé (nous présenterons ce simulateur dans le chapitre suivant), nous pourrions alors, dans le chapitre 3, nous intéresser à l'automatisation de la planification des trajectoires des planeurs sous-marins (définition de l'ordre de passage entre les *waypoints* à visiter). Nous traiterons alors un problème inverse consistant à minimiser une fonction de coût pouvant dépendre de la distance parcourue, de l'énergie consommée

ou encore du temps de parcours. Ceci sera à l'image de ce qu'il est possible de faire avec les systèmes de navigation GPS à l'heure actuelle.

L'objectif de cette thèse est donc d'améliorer le pilotage actuel des engins au travers du développement d'un simulateur de mission de planeur SeaExplorer en première étape. Ce simulateur devra fournir des grandeurs à partir desquelles nous pourrons alors construire une fonction de coût à minimiser dans le cadre du développement d'une méthode de planification de trajectoire optimisée en mono et multi-engins.

Contrairement à ce qu'on peut voir en gestion de flotte aérienne (un exemple est donné dans [106] dans le cas d'une coopération de drones aériens) ou terrestre, les planeurs sous-marins lorsqu'ils évoluent en flotte sont soumis à de l'asynchronisme de communication. Cela signifie à la fois qu'ils ne peuvent pas tous remonter à la surface au même moment pour transmettre leurs informations à une base reliée à la terre et qu'en plus, aucune information concernant leur état n'est disponible en dehors des temps de surfacage (durée moyenne de plongée de l'ordre de 3h). En outre, leur communication est centralisée et est dépendante des conditions environnementales sur la zone dans laquelle ils évoluent (par exemple : une mauvaise couverture satellitaire peut entraîner le non-établissement de la communication avec l'engin).

Il est donc nécessaire de prendre en compte ces éléments dans le cadre du développement du simulateur et de la méthode de génération de trajectoire proposée. Nous nous concentrerons sur un cas d'application essentiel à savoir celui de la couverture optimale de zone en mode mono et multi-engins.

Chapitre 2

Simulateur de mission

Dans ce chapitre, le simulateur de mission développé pour les planeurs sous-marins SeaExplorer sera présenté. Ce simulateur constitue une contribution majeure qui a été valorisée par une publication dans la revue internationale Ocean Engineering [81].

Précédemment, nous avons démontré l'intérêt de la simulation d'un plan de mission pour planeur sous-marin en termes de durée, de distance et de consommation énergétique dans la phase de préparation de mission. En prenant en compte un environnement 4D en fonction du temps, le simulateur développé fournit une estimation de ces grandeurs les plus importantes d'un point de vue mission.

L'intérêt principal dans le développement d'un simulateur est de pouvoir l'utiliser en amont afin d'aider les pilotes de planeurs à définir un plan de mission réalisable. Ensuite, grâce à son interopérabilité avec le système de gestion de mission d'Alseamar, GLIMPSE, il fonctionne en mode interne (replanification) pendant la mission. Enfin, dans le chapitre 3, nous nous appuyerons sur ce simulateur pour construire des fonctions de coût à optimiser qui dépendent des grandeurs que nous estimons grâce au simulateur. Cela nous permettra de construire des trajectoires les plus optimales possible en mono et multi-engins. Nous montrerons également qu'il est correctement calibré en comparant les résultats obtenus avec le simulateur et ceux obtenus en conditions expérimentales réelles.

2.1 Intérêt d'un simulateur

L'objectif principal de l'utilisation d'une flotte de planeurs est de fournir la meilleure vue possible et actualisée d'une zone d'opération. C'est aussi de fournir des données qui puissent être assimilées par les modèles océaniques et ainsi améliorer les prévisions de ces derniers.

Les trajectoires des planeurs peuvent être prédéterminées, mais elles peuvent aussi être affinées dans l'espace ou adaptées en fonction des mesures des capteurs ou des changements de l'environnement marin. Il est donc utile de tester ces trajectoires en simulation pour évaluer la pertinence d'un plan de mission pour une flotte de planeurs lors de la phase de planification

et durant la mission elle-même, il s'agit de la phase de supervision.

Les planeurs évoluent à une vitesse relativement faible (environ un demi-noeud), ce qui permet de réduire les coûts d'exploitation mais les rend sensibles aux courants marins. C'est la raison pour laquelle il s'est révélé très important de développer un simulateur de mission de planeur pouvant prendre en compte un modèle environnemental 4D (3D dans l'espace et 1D dans le temps). Un exemple de carte de courant en surface à une date fixée est donné dans la figure 2.1.

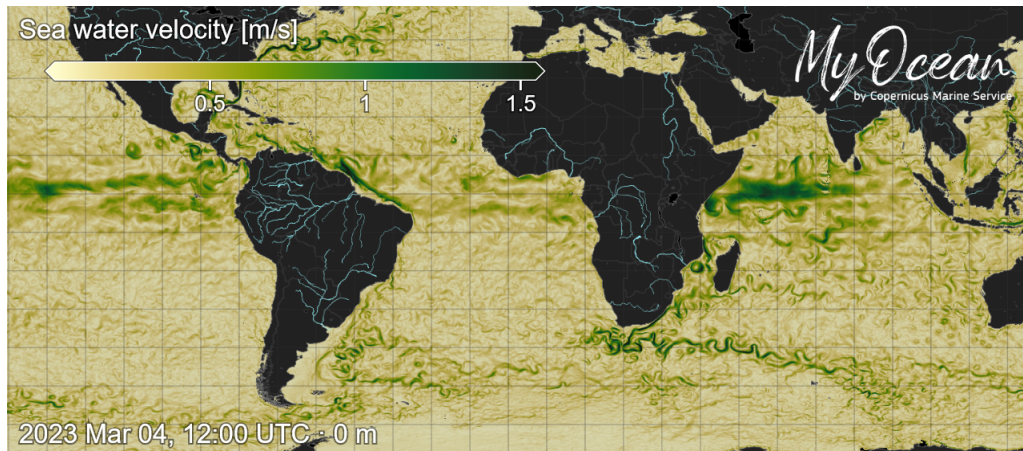


Figure 2.1 – Carte de courant de surface depuis Marine Copernicus [8]

Les simulateurs existants dédiés à la robotique peuvent être classés en trois catégories principales en fonction du type d'environnement considéré : mobile (terrestre), aérien et marin. La plupart d'entre eux traitent des problèmes mono et multi-engins. Ils simulent également différents types d'acquisition de données à partir de nombreux capteurs et peuvent être codés dans différents langages (les plus populaires étant C++, Python et Java). Ils sont présentés par ordre croissant de complexité.

Premièrement, en robotique terrestre mobile, l'environnement, s'il est connu, peut être importé à partir de modèles numériques d'élévation, de maillages SDF, d'OpenStreetMap. Les simulateurs les plus utilisés sont Gazebo, CoppeliaSim [105, 122, 28], Webots et CARLA [32, 136, 36]. Il est à noter que Webots et Gazebo sont utilisés à la fois pour la robotique terrestre [131, 17, 123, 137, 62] et aérienne [65, 111, 59, 79, 84]. Deux autres simulateurs sont spécifiquement dédiés à la robotique aérienne : AirSim [112] et Flightmare [114]. Ils permettent de lancer la simulation d'environnements haute-fidélité comprenant des entrepôts, des forêts, etc. (voir Fig. 2.2 pour des exemples de simulation).

Enfin, en ce qui concerne l'environnement marin, ce dernier reste le plus complexe car il s'agit d'un environnement relativement inconnu et très fluctuant. Trois simulateurs peuvent être mentionnés : UUV Simulator [80], UWSim [102], StoneFish [31]. Ces simulateurs calculent la dynamique et les coefficients hydrodynamiques des véhicules sous-marins autonomes. Le modèle hydrodynamique du SeaExplorer n'a pas été implémenté dans ces simulateurs jusqu'à

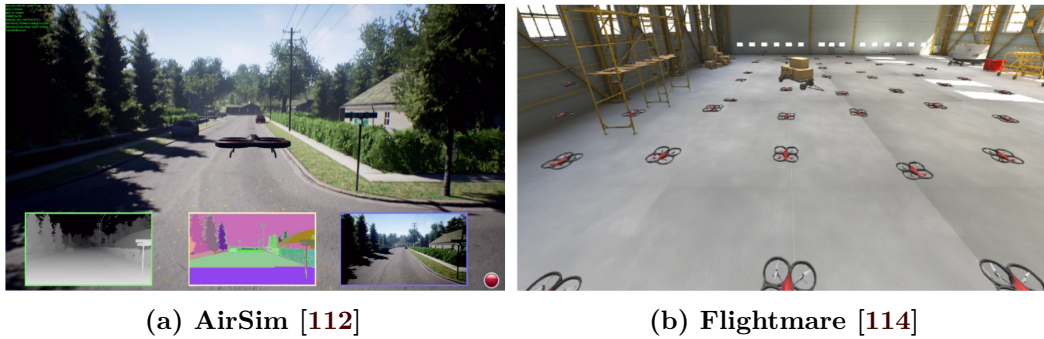


Figure 2.2 – Simulations sous AirSim et Flightmare

présent. Les propulseurs, les capteurs (DVL, capteurs de pression, USBL, sonars, système de communication acoustique, caméras, etc.) ainsi que des bras robotisés peuvent être simulés. Des captures d'écran de simulations sont données dans la figure 2.3.

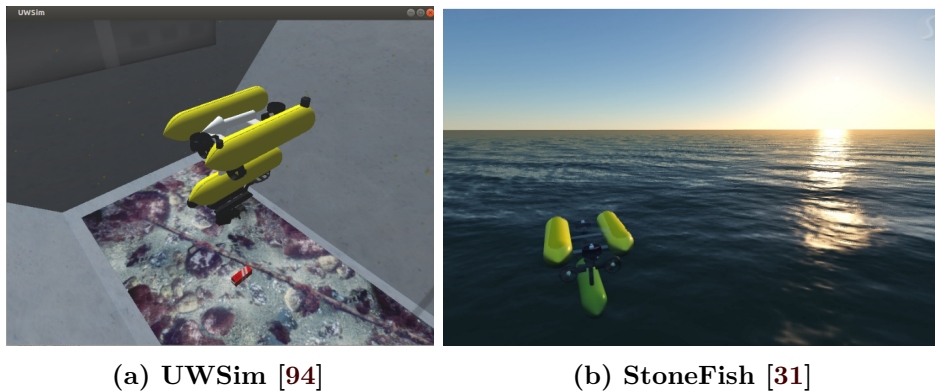


Figure 2.3 – Simulations sous UWSim et StoneFish

Ils simulent également des environnements sous-marins complexes et réalistes en prenant en compte les courants, les vagues, les fonds marins, les lacs, etc. Jusqu'à présent, ces simulateurs ne sont pas dédiés à la planification de trajectoire ni au routage des véhicules et ne fournissent pas les mesures importantes à prendre en compte dans ces problèmes comme la durée de la mission, l'énergie restante et la distance parcourue.

Dans notre cas, l'objectif principal a été d'introduire un nouveau simulateur de mission pour les planeurs SeaExplorers dans un environnement à grande échelle spatio-temporelle. Il s'agit d'un problème récurrent, comme le soulignent des publications récentes telles que [98, 54]. Il existe également un réel besoin pour ce type de simulateur afin d'aider les pilotes du SeaExplorer à préparer la mission (mode hors ligne) mais aussi pendant l'exécution de la mission (mode en ligne). En effet, les planeurs peuvent opérer pendant plusieurs semaines/mois en ayant à faire face à différents types de courant ou différentes densités d'eau qui affectent le déroulement de la mission. Le simulateur que nous avons développé prend en compte : des données environnementales en format "NetCDF" qui peuvent être issues de la base de données Marine Copernicus [8], les profils de vol des planeurs SeaExplorer, une configuration mono ou

multi-véhicules en fonction du type de mission, les résultats d’algorithmes de planification de trajectoire de haut niveau (i.e. chemin Hamiltonien [104] par exemple, etc.).

Le simulateur fournit des informations et des prévisions sur la consommation du planeur à l’aide de modèles sur sa mission simulée en fonction des capteurs équipés et du pack batterie sélectionné. Il permet également une interopérabilité avec le système de gestion de mission d’Alseamar GLIMPSE. En permettant d’automatiser certains calculs, il constitue une aide à la décision pour les utilisateurs finaux que sont les pilotes du SeaExplorer pendant la préparation de la mission (planification de la trajectoire et choix d’un plan de mission réalisable) et le déroulement de la mission (modèle interne et replanification). Ce simulateur fournit également un rapport présentant les grandeurs d’intérêt par le biais d’une interface homme-machine.

Lorsqu’au chapitre suivant, nous considérerons de la planification de trajectoire basée sur la théorie des graphes pondérés [21], nous montrerons qu’il est possible d’utiliser le simulateur afin d’établir les coûts entre les différents points d’intérêt (*waypoints*) en tenant compte de la distance, du temps de déplacement ou de la consommation d’énergie. Cela nous permettra alors de construire facilement la matrice d’adjacence liée au graphe et d’automatiser la construction du plan de mission (résolution d’un problème inverse). Le simulateur nous permet également de comparer les différents plans de mission dont nous pouvons disposer et qui peuvent être fournis soit par des algorithmes de planification de trajectoire plus ou moins complexes soit directement construits par des opérateurs humains e.g. les pilotes de planeurs (problème directe).

Réaliser des expérimentations en mer en déployant de vrais planeurs sous-marins est très onéreux tandis qu’en utilisant un simulateur le coût est pratiquement nul (le coût sera lié à l’énergie consommée par l’ordinateur pour réaliser la simulation de la mission envisagée). Un autre avantage est de pouvoir générer de nombreux scénarios de missions en jouant sur les zones étudiées, les routes suivies par les planeurs et sur les modèles d’environnement utilisés.

2.2 Développement du simulateur

2.2.1 Spécifications du simulateur

Le développement de ce simulateur de mission est basé sur la compréhension approfondie de ce qui a été décrit précédemment. Il est conçu de la même manière que le contrôle actuel des SeaExplorers (pilotage par le système de gestion de mission GLIMPSE). Cela signifie qu’il prend en compte les mêmes données d’entrée afin de pouvoir tester les résultats de la génération de trajectoire en mono et multi-engins. Cela signifie également que les caractéristiques importantes de GLIMPSE font partie intégrante du simulateur : calcul du cap du planeur pour le *waypoint* visé (sous-section 1.3.5), modification éventuelle du profil de navigation (sous-section 1.3.1), activation/désactivation des capteurs (profil de charge utile) (sous-section 1.3.5), activation/désactivation de la compensation du courant (son principe est décrit au

niveau de la sous-section 1.3.4). C'est la raison pour laquelle le développement du simulateur est basé sur le mode *mission plan* de GLIMPSE.

Ce mode est crucial pour la simulation de la mission d'un planeur que cela soit en mode mono ou en mode multi-engins. Dans ce mode, le véhicule doit valider de nombreux *waypoints* avec un ou plusieurs profils de navigation donnés. Il inclut également d'autres fonctionnalités qui ne sont pas encore disponibles via GLIMPSE mais qui se révèlent être d'une grande importance pour le déroulement d'une mission complète de SeaExplorer : le modèle hydrodynamique (détaillé dans la sous-section 1.3.3) et de consommation (détaillé dans la sous-section 1.3.5) du planeur, une modélisation de l'environnement (courant marin en 4D et niveaux de bathymétrie 3D), une gestion des flottes de planeurs quasiment en "temps réel" (état de la flotte recalculé avec un pas de temps de quelques secondes à comparer à une plongée de planeur d'une durée moyenne de 3h). Un exemple de carte de niveaux bathymétriques est donné dans la figure 2.4.

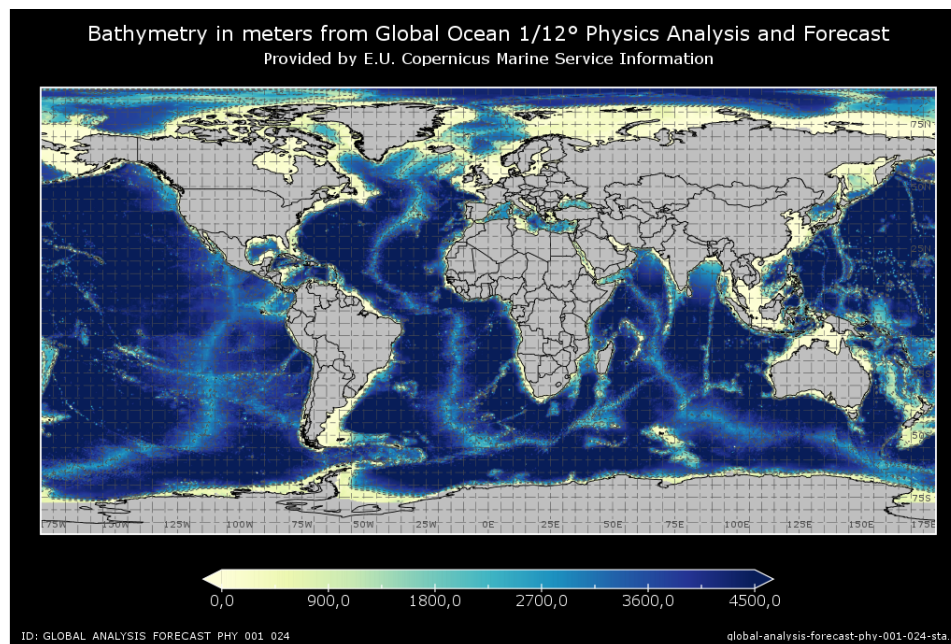


Figure 2.4 – Niveaux bathymétriques disponibles depuis Marine Copernicus [8]

Les modèles considérés dans le simulateur sont basés sur des statistiques de données expérimentales mesurées au cours de plusieurs missions. Cela signifie que pendant les phases de montée et de descente, la consommation est supposée être l'addition de la consommation de tous les composants qui ont été activés.

En raison des grandes distances que les planeurs SeaExplorer peuvent avoir à parcourir, il est important que le simulateur permette de générer les trajectoires sur le plan géographique et pas seulement sur le plan cartésien. La forme de la Terre et la position géographique de l'engin simulé peuvent affecter la précision de la trajectoire (cet aspect sera détaillé dans la section suivante). L'objectif de ce simulateur est de se rapprocher le plus possible de la

manière actuelle de piloter les planeurs de GLIMPSE. A partir de cette plateforme, il sera possible d'interagir avec des algorithmes de plus haut niveau pour la gestion de flotte de planeurs sous-marins de SeaExplorer. Notre simulateur est codé en langage Python objet pour des raisons de compatibilité avec le code embarqué de la plateforme. Il doit donc avoir un coût de calcul assez faible par rapport à la durée d'un "yo" de planeur (qui dure environ 3 heures). Un temps d'échantillonnage adaptatif est calculé dans le simulateur pour réduire le temps de calcul. Il consiste à calculer le pas de temps nécessaire pour que le planeur simulé atteigne les immersions disponibles dans l'ensemble de données de courant marin utilisé (échantillonnage spatial variable dans la colonne d'eau, voir sous-section 2.2.2). Le simulateur fournit également une interface homme-machine (IHM). Elle permet d'accéder facilement aux différents graphiques affichés par le système de gestion de mission GLIMPSE lors du pilotage d'un SeaExplorer à savoir :

- La trajectoire du véhicule dans le plan cartésien et géographique,
- Le niveau de la batterie qui diminue en fonction du temps,
- La consommation des parties navigation et charge utile qui varie en fonction du temps,
- Le cap visé et le cap suivi,
- Les phases de navigation,
- Un affichage de différentes mesures telles que le temps total de la mission simulée, la distance parcourue par le véhicule simulé, l'énergie disponible à la fin de la mission.

En plus de répondre à ces exigences, le simulateur doit inclure les trois fonctions décrites ci-dessous :

1. Pour une trajectoire à suivre et une configuration de charge utile données, le simulateur estime le temps de déplacement, l'énergie disponible et la distance parcourue. Lors de la phase de préparation, le simulateur est utilisé en mode direct pour aider le pilote à prendre une décision concernant la meilleure route à suivre et la meilleure configuration de la charge utile à utiliser (**phase de planification**).
2. Pendant la mission, le simulateur assiste les pilotes dans leurs **tâches de navigation** pour la définition du meilleur profil de vol et de la meilleure trajectoire à adopter en intégrant la bathymétrie environnante et les courants marins donnés par les cartes dédiées. En effet, selon l'importance des courants, il est parfois plus favorable de les éviter en adoptant un profil de vol qui limite les surfacages ou de les contrer avec des vitesses de plongée plus importantes.
3. En ce qui concerne la planification de la trajectoire, le simulateur peut intégrer la bathymétrie et le comportement du planeur simulé en tenant compte de l'environnement (courant marin donné par des cartes satellites) pour évaluer avec précision le coût du trajet d'un point A à un point B. En outre, le simulateur peut évaluer l'efficacité d'algorithmes de planification de trajectoire. Cela signifie que, d'une part, il fournit aux

algorithmes de haut niveau des données importantes relatives au coût du trajet, mais aussi il aide à comparer les différentes stratégies (chemins) pour répondre aux exigences d'une mission. Il remplace le pilote dans la phase de planification mais aussi dans la phase de navigation. L'objectif est de tendre vers un contrôleur de mission entièrement automatisé en mono et en multi-engins.

Les spécifications et la portée du simulateur ayant été détaillées, son architecture va maintenant être expliquée dans la section suivante.

2.2.2 Structure du simulateur

Ce simulateur est codé en Python objet et comprend plusieurs fichiers correspondant aux différentes classes qui ont été développées. L'architecture globale est structurée en trois niveaux baptisés *Mission level*, *Dive level* et *Glider level* (resp. Planification, Navigation, Contrôle sur la figure 1.29).

Le *Mission level* est centré sur un *Mission simulator* qui est alimenté par les entrées des utilisateurs ou par des algorithmes de haut niveau. La plupart des paramètres intéressants sont stockés dans la classe *Logs*, qui interagit avec l'IHM afin de fournir une visualisation des grandeurs (énergie consommée, distance parcourue, durée de la mission) et des graphiques importants (comme détaillé dans la section 2.2.1) pour aider les utilisateurs finaux dans leur choix et la validation d'un plan de mission donné. Cette fonction principale du *Mission simulator* gère l'enchaînement et la validation d'une séquence de *waypoints*. Ces derniers sont considérés comme atteints lorsque la distance entre la position géographique (latitude, longitude) du planeur et le *waypoint* cible est inférieure à la distance de validation.

En ce qui concerne l'enchaînement, la fonction appelle autant de fois que nécessaire la routine *Dive simulator*. Cette fonction est utilisée pour calculer les trajectoires d'un SeaExplorer au cours d'une plongée en tenant compte d'une position initiale en surface et d'un modèle de courant marin de la zone donnée en entrée du *Mission level*. Ces deux parties composent le deuxième niveau appelé *Dive level*. Ce dernier interagit avec le *Glider level* qui est le niveau le plus bas. Il prend en considération toutes les caractéristiques liées à un véhicule donné telles que le modèle de mouvement, le modèle de consommation et le modèle hydrodynamique qui seront présentés dans les sous-sections suivantes. Il garantit l'aspect modulaire du simulateur qui pourrait être appliqué à différents types de véhicules en changeant seulement les modèles de ce troisième niveau.

Une vue synoptique du principe fonctionnel du simulateur est fournie dans la Fig. 2.5.

Les principaux blocs fonctionnels sont maintenant détaillés.

Définition de la mission (premier niveau)

La simulation d'une mission de planeur nécessite la définition d'un objet *Mission* en entrée du *Mission level* et plus particulièrement en entrée du *Mission simulator*. La définition de cet

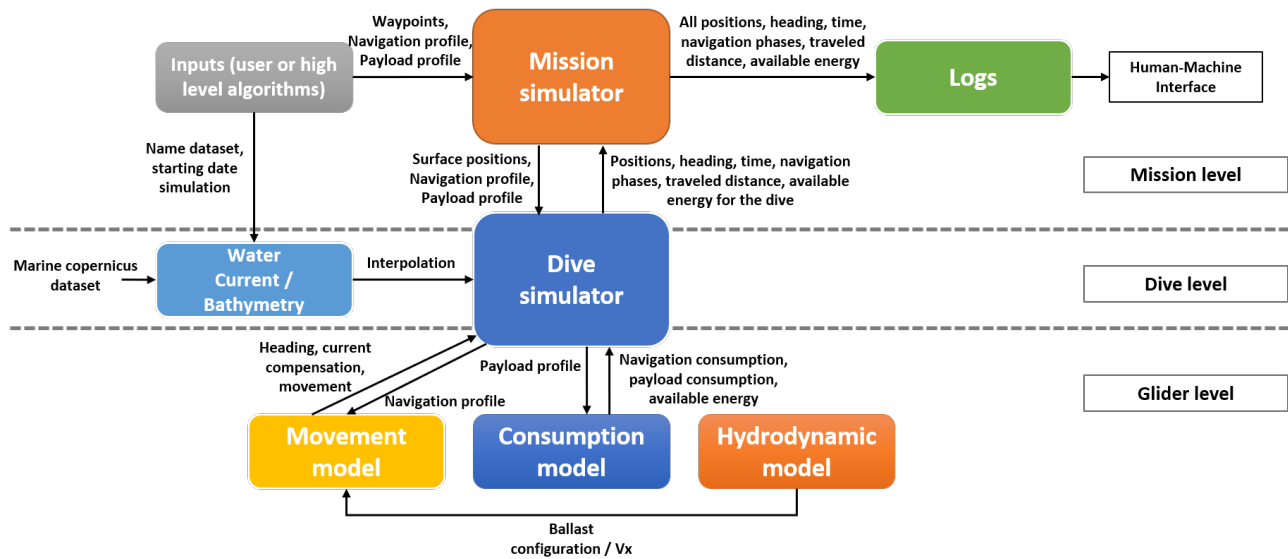


Figure 2.5 – Vue d’ensemble de la structure du simulateur

objet est similaire au mode *mission plan* expliqué dans la sous-section 1.3.5. Il prend en entrée une liste de *waypoints* cibles (wp) au format : $[Lat_{wp}, Lon_{wp}, V_d]$, où Lat_{wp} (resp. Lon_{wp}) représente la latitude (resp. la longitude) du *waypoint* ciblé et V_d la distance de validation. Il permet de définir les profils de navigation avec différents paramètres de vol que le véhicule doit adopter au cours d’un segment simulé : $[V_z, \alpha, z_t, z_b, z_s, sr, t_s]$ où t_s représente le temps d’attente lors d’un surfacage, les autres paramètres ayant été définis dans la sous-section 1.3.1. Les profils de charge utile sont également configurables en fonction de la définition des états d’activation/désactivation de l’altimètre, de la radio et de la charge utile. Enfin, un attribut “segment” constitue un paramètre crucial pour la définition d’une mission de planeur puisqu’il spécifie une séquence de *waypoints* en établissant une liste de *waypoints* initiaux, de *waypoints* à cibler avec le profil de vol et les numéros de charge utile considérés pour chaque segment à effectuer par le planeur simulé. Ce format a été adopté pour correspondre au module *mission plan* mis en œuvre dans le système de gestion de mission GLIMPSE. Cela facilite l’utilisation du simulateur par les pilotes de drones SeaExplorer et la simulation des listes de *waypoints* générées par les algorithmes de planification de trajectoire de haut niveau.

Au début de la simulation de la mission, une classe *AskUser* faisant partie des *Inputs* du premier niveau, demande des informations à l’utilisateur dans l’invite de commande. L’utilisateur peut alors choisir d’utiliser un fichier de courant marin et un fichier de bathymétrie au format “NetCDF” (*Network Common Data Form*, format généralement utilisé pour les données scientifiques multidimensionnelles) disponibles soit localement sur l’ordinateur de l’utilisateur à partir duquel la simulation est lancée, soit à partir d’un “*Files Transfer Protocol*” (protocole de communication destiné au partage de fichiers sur un réseau TCP/IP). Ce dernier récupère les produits au format NetCDF directement à partir de la base de données Marine Copernicus. Une fois le produit sélectionné, la date initiale doit être définie pour synchroniser l’heure de

début de la simulation avec le jeu de données de courant marin.

Les produits de courant marin disponibles dans Marine Copernicus (comme sur la figure 2.1) donnent accès aux composantes Est et Nord du courant marin mesuré ou modélisé ainsi qu'à sa position ($Lat_{current}$, $Lon_{current}$) et à son immersion. Les produits de bathymétrie également disponibles auprès de Marine Copernicus permettent d'accéder aux niveaux de bathymétrie en fonction de la position géographique. La gestion du courant et des niveaux de bathymétrie sur la zone du planeur simulé est réalisée par une fonction de la classe *Mission* détaillée dans le paragraphe suivant.

Enfin, le simulateur développé utilise le *multithreading* pour générer des simulations de trajectoires pour plusieurs planeurs avec différentes configurations et missions en mode multi-engins.

Modélisation environnementale (deuxième niveau)

Les informations sur les courants marins provenant des modèles peuvent être modélisées sous forme de cubes d'eau. Ces derniers sont disponibles à plusieurs dates en fonction du produit Marine Copernicus considéré.

La génération des trajectoires de SeaExplorer par le *Glider level* peut conduire à des positions qui ne sont pas parfaitement sur une position (Lat_{glider} , Lon_{glider}) et à une profondeur existante dans le jeu de données des courants marins. C'est la raison pour laquelle une méthode de la classe *Mission* permet de générer plusieurs types d'interpolation (linéaire, plus proche voisin, cubique ...) sur une grille 4D : temps, latitude, longitude, immersion. Néanmoins, l'interpolation au plus proche voisin est la moins coûteuse en termes de temps de calcul même si elle est aussi la moins précise.

Il est important de noter que dans la plupart des jeux de données disponibles sur les courants marins, l'échantillonnage spatial n'est pas constant, en particulier pour le vecteur "immersion". Ce dernier présente un échantillonnage spatial fin lorsqu'on est proche de la surface (0-300 m) puis cet échantillonnage s'agrandit au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la surface comme illustré sur la figure 2.6. Sur cette dernière les données de courant peuvent être représentées sous la forme d'un cube d'eau dans lequel on peut avoir accès à la composante Est et Nord du courant à une date n pour une position géographique et une immersion fixées.

Initialement, le simulateur devait fonctionner avec un pas de temps constant de 20 secondes, puisqu'il correspond au temps d'échantillonnage du planeur. Cependant, afin de réduire le temps de calcul, un pas de temps adaptatif a été mis en place (paramètre ajustable dans la définition de l'objet *Mission*).

Ce pas de temps adaptatif consiste à calculer le pas de temps nécessaire pour atteindre les différentes immersions disponibles sur le jeu de données de courants marins en tenant compte des immersions maximales, minimales et de surface commandées. Pour ce faire, les distances entre l'immersion du planeur et les immersions du jeu de données sont calculées et les différentes valeurs du pas de temps adaptatif sont calculées en divisant les distances par

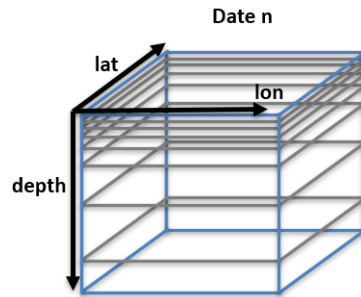


Figure 2.6 – Représentation des données de courant

la vitesse verticale du planeur simulé. Ce pas de temps adaptatif nous permet de limiter le nombre de position à effectivement calculer pendant la plongée du planeur que nous simulons. Il est important de noter que lors de la simulation des phases de navigation les plus énergivores (phases d'activation du ballast), le pas de temps est fixé à 20 secondes afin de garantir la précision du modèle de consommation. Nous considérons ici des hypothèses de stationnarité sur les modèles de courant utilisés entre les différentes immersions disponibles ainsi que sur les modèles comportementaux qui régissent la trajectoire du planeur simulé. Nous sommes conscients que ces hypothèses peuvent provoquer un biais de calcul lors de la simulation.

Ce pas de temps dit adaptatif réduit considérablement le temps de calcul du simulateur. Pour une simulation sur un ensemble de 400 *waypoints* avec un échantillonnage spatial de 10 *km* (afin d'avoir plusieurs plongées entre chaque *waypoint*), soit une grille carrée de 20 x 20 *waypoints*, le pas de temps constant de 20 secondes conduit à calculer les trajectoires en 32 secondes alors qu'il ne prend que 4 secondes avec un pas de temps adaptatif (testé sur un Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU, 16 GB de RAM). Cette gestion des courants marins dans la zone d'opération, basée sur des produits NetCDF, permet une modélisation de l'environnement différente de celle sur lesquels sont basés les autres simulateurs existants (cf. section 2.1).

Dans le cadre du modèle de courant marin sélectionné, il est également possible d'avoir accès aux niveaux de bathymétrie du produit Marine Copernicus. A chaque pas de temps, nous interpolons les données afin d'obtenir une estimation du niveau bathymétrique de la position géographique du planeur simulé. Au cours de la simulation, l'immersion maximale commandée est modifiée en fonction des valeurs interpolées afin de prendre en compte le fond marin.

Les données interpolées des niveaux de courant et de bathymétrie alimentent le *Dive simulator* qui envoie le profil de navigation souhaité au niveau le plus bas appelé *Glider level*. Il appelle les méthodes des trois modèles qui composent ce niveau afin de générer les trajectoires du planeur au cours d'une plongée et de renvoyer les principaux paramètres calculés au *Mission level*. Nous décrivons maintenant le niveau le plus bas qui est spécifique au véhicule que nous considérons, notre objet d'étude étant le SeaExplorer (toutefois notre simulateur est suffisamment générique et modulaire pour que d'autres planeurs puissent être ajoutés si

nécessaire).

Modélisation des trajectoires des planeurs (troisième niveau)

Les paramètres du profil de vol sont reçus comme argument par la classe *Movement model*, qui prend également en compte un cap désiré calculé au préalable par une méthode de la classe *Mission* (en utilisant les formules de Haversine [3] cf. équation (2.4)). Simultanément, la configuration du taux de remplissage du ballast du planeur pour la plongée est fournie par un modèle basé sur la connaissance de la classe *Hydrodynamic model* en fonction de la vitesse verticale et du *pitch* commandé. Le modèle hydrodynamique du planeur est directement incorporé dans cette classe, comme c'est le cas dans le planeur SeaExplorer (comme détaillé dans 1.3.3).

La classe *Movement model* nécessite donc un appel à l'*Hydrodynamic model* du véhicule pour définir la configuration du ballast que le véhicule simulé doit adopter et pour avoir une estimation de sa vitesse horizontale. La classe *Movement model* est utilisée pour décrire le comportement du planeur SeaExplorer. Par conséquent, un certain nombre de méthodes sont disponibles pour générer ses trajectoires. A noter que la méthode de discrétisation *Forward Euler* [103] est utilisée dans le simulateur. Certaines méthodes permettent également de changer les points du système de coordonnées entre le système de coordonnées du véhicule (voir Fig. 1.22), le système de coordonnées NED (*North-East-Down* [41]) et le système de coordonnées géographiques. Il est possible de représenter le système de coordonnées NED comme indiqué sur la figure 2.7.

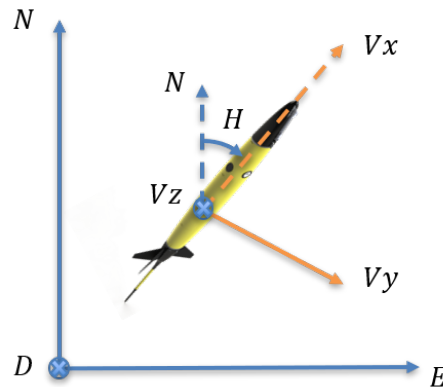


Figure 2.7 – Résolution statique et système de coordonnées NED

Le changement de système de coordonnées entre le planeur et le repère NED est donné par l'équation suivante (2.1) :

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(H^{(n)}) & \sin(H^{(n)}) & 0 \\ -\sin(H^{(n)}) & \cos(H^{(n)}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ E \\ D \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

où $H^{(n)}$ est le cap actuel dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport au Nord du planeur simulé à l'itération de temps n .

Pour atteindre un cap désiré, le cap est calculé grâce à l'équation (2.2) :

$$H^{(n)} = H^{(n-1)} + \frac{V_x}{T_r} \cdot dt \quad (2.2)$$

avec dt le pas de temps et T_r le paramètre *Turning radius*, c'est-à-dire le rayon de giration pris par le véhicule lorsqu'il plonge pour atteindre un cap calculé. Ce paramètre est fixé à ± 50 m pour tourner à gauche ou à droite et est intégré dans la classe *Movement model*. Il est important de noter que le cap initial commandé au planeur en surface est généré aléatoirement pour simuler une orientation du véhicule en fonction du vent présent dans la zone d'opération. Le mouvement du SeaExplorer est décrit par le système d'équations (2.3) suivant dans le système de coordonnées NED :

$$\begin{cases} dL = V_x \cdot dt \\ dN = \cos(H^{(n)}) \cdot dL \\ dE = \sin(H^{(n)}) \cdot dL \\ dD = V_z \cdot dt \end{cases} \quad (2.3)$$

avec dL , la longueur du déplacement 3D pendant le pas de temps dt considéré.

A partir de la gestion du cap du planeur et du calcul de son déplacement sur le plan cartésien, une méthode a été développée afin de passer du système de coordonnées NED au système de coordonnées géographiques grâce aux formules de Haversine (2.4) :

$$\begin{cases} Lat_{glider}^{(n)} = \arcsin(\sin(Lat_{glider}^{(n-1)}) \cdot \cos(\frac{dL}{E_r}) + \cos(Lat_{glider}^{(n-1)}) \cdot \sin(\frac{dL}{E_r}) \cdot \cos(H^{(n)})) \\ Lon_{glider}^{(n)} = Lon_{glider}^{(n-1)} + \arctan 2(\sin(H^{(n)}) \cdot \sin(\frac{dL}{E_r}) \cdot \cos(Lat_{glider}^{(n-1)}) \cdot \cos(\frac{dL}{E_r}) - \sin(Lat_{glider}^{(n-1)}) \cdot \sin(Lat_{glider}^{(n)})) \end{cases} \quad (2.4)$$

où E_r représente le rayon de la Terre et $Lat_{glider}^{(n-1)}$ (resp. $Lon_{glider}^{(n-1)}$) est la valeur de la latitude (resp. de la longitude) à l'itération précédente. Les formules de Haversine prennent pour modèle une planète Terre sphérique de rayon 6371 km, ce qui peut entraîner des erreurs de précision allant jusqu'à 0,3% sur d'assez grandes distances. Dans le simulateur, tous les calculs sont effectués sur un faible pas de temps et donc sur des distances assez courtes, ce qui implique que le simulateur est moins sensible à de telles erreurs, même lorsque le pas de temps adaptatif est utilisé.

Les trajectoires obtenues avec les équations détaillées ci-dessus ne prennent pas en compte l'influence des courants marins sur les trajectoires des planeurs. C'est pourquoi une notion de courant a été intégrée dans le simulateur dans la classe *Mission* (comme détaillé dans la sous-section 2.2.2). La classe *Movement model* utilise les informations sur le courant marin disponibles à partir de l'interpolation 4D, à savoir $E_{current}$ pour la composante Est et $N_{current}$ pour la composante Nord de la vitesse du courant (V_c) ainsi que la direction du courant (D_c) pour ses deux directions (dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord), afin de

calculer une dérive due au courant marin dans le système de coordonnées NED (2.5) :

$$\begin{cases} dN_{current} = V_c \cdot dt \cdot \cos(D_c) \\ dE_{current} = V_c \cdot dt \cdot \sin(D_c) \end{cases} \quad (2.5)$$

Il est alors possible d'avoir la trajectoire cible du véhicule (appelée *dead-reckoning trajectory*, trajectoire sans l'influence du courant marin) et la trajectoire sous l'influence du courant marin (appelée *current-corrected dead-reckoning trajectory*) à la fois sur le plan cartésien et sur le plan géographique.

Enfin, une méthode de la classe calcule l'ampleur et la direction du courant moyen perçu par le planeur au cours de la plongée précédente en se basant encore sur une hypothèse de stationnarité. Pour ce faire, nous calculons la différence entre la position en surface de la *current-corrected dead-reckoning trajectory* (trajectoire sous l'influence du courant) et la position en surface de la *dead-reckoning trajectory* (trajectoire sans l'influence du courant), de même que la différence de *bearing* entre ces deux positions. Une autre méthode permet de compenser ce courant moyen perçu par le véhicule dans le calcul du cap commandé comme le ferait un vrai SeaExplorer comme détaillé dans la section 1.3.4.

Avec ces équations, il est possible de générer le déplacement d'un SeaExplorer dans le système de coordonnées NED et de l'utiliser pour la gestion des phases de navigation du planeur. Comme décrit dans la sous-section 1.3.2, les phases de navigation dépendent du déplacement vertical du véhicule avec des instructions de surface, d'immersion maximale et d'immersion minimale. Le planeur doit respecter ces instructions lorsqu'il effectue son cycle de navigation dans la colonne d'eau. Cependant, il existe certaines phases (110, 115, 118) pendant lesquelles le véhicule n'a aucune consigne d'immersion à respecter (nous l'avons expliqué dans la sous-section 1.3.2). Pour la simulation, la durée de chaque phase est calculée à partir du volume de ballast et du débit de la pompe à huile contrôlée en flux.

Le système d'équations suivant (2.6) est alors pris en compte :

$$\begin{cases} T_{110} = \frac{B_s - B_d}{I_d} \\ T_{118} = \frac{B_u - B_d}{I_u} \\ T_{115} = \frac{B_s - B_u}{I_s} \end{cases} \quad (2.6)$$

avec B_s représentant la configuration du ballast à la surface (valeur fixe de 500cc), B_u et B_d étant respectivement les configurations du ballast vers le haut et vers le bas données par le modèle hydrodynamique en fonction de la vitesse verticale cible et du *pitch* cible. I_d (resp. I_u) est la valeur du débit de la pompe infléchissant vers le bas (resp. vers le haut). I_s est la valeur du débit de pompe infléchissant vers le haut en direction de la surface.

Modélisation de la consommation énergétique (troisième niveau)

Le défi consiste à optimiser la mission en fonction de trois paramètres de sortie que sont la durée de la mission, la distance totale parcourue, l'autonomie restante tout en gardant à l'esprit que le niveau d'énergie disponible de la batterie demeure l'élément le plus critique (une décharge profonde en dessous de 15% doit impérativement être évitée sous peine de ne plus pouvoir recharger la batterie). Pour ce faire, la classe *Consumption model* permet de calculer la consommation de la charge utile telle que définie dans la classe *Mission*. Une variable *payload_config* spécifie le type des capteurs embarqués sur le véhicule simulé avec leurs modes d'activation. Actuellement, 18 types de capteurs sont prédéfinis et sélectionnables au sein du simulateur permettant de réaliser des mesures de fluorescence, conductivité, température, profondeur, gaz, courant, irradiance, turbulence ... Le type de batterie équipant le planeur est également spécifié (rechargeable ou primaire).

Les différents paramètres de consommation d'énergie associés sont disponibles dans un fichier de paramètres qui comprend :

- Les valeurs de puissance des capteurs,
- La puissance mesurée sur plusieurs véhicules pour les différentes phases de navigation,
- Les valeurs de l'énergie disponible pour les différents packs de batteries.

Ainsi, une méthode a été développée pour déterminer la consommation d'énergie pendant la mission simulée de la partie navigation et de la partie charge utile du planeur.

La consommation d'énergie varie en fonction de la phase de navigation dans laquelle se trouve le planeur. Par exemple, il est plus coûteux d'activer les ballasts lorsque le véhicule est en profondeur plutôt qu'en surface en raison de la pression exercée sur le véhicule. Un modèle de représentation est utilisé dans le simulateur pour obtenir les valeurs de la puissance relative au ballast et à l'immersion. Ce modèle est également utilisé pour obtenir la valeur de la puissance relative au *pitch* pendant les phases de transitions, la valeur de la puissance associée au roulis étant une valeur constante pendant le virage du planeur simulé. Il est important de noter que le cap et le *pitch* simulés sont considérés comme invariants lorsque le cap et le *pitch* cibles sont atteints. La consommation de l'asservissement est considérée comme négligeable dans ce simulateur. La méthode développée dépend donc fortement de la gestion des phases de navigation du planeur dans la classe *Movement model*. Elle prend en compte la phase de navigation dans laquelle se trouvait le drone à l'étape précédente et calcule une consommation allouée à la partie navigation du véhicule en multipliant le pas de temps par la puissance associée à la phase de navigation.

Pour la partie attribuée aux capteurs optionnels du planeur, à savoir l'altimètre et la radio, il est nécessaire de calculer respectivement une consommation d'énergie en fonction de la phase de plongée (car l'altimètre n'est activé que pendant la plongée) et une autre en fonction de la phase de communication en surface (la radio n'est activée que lorsque le véhicule est en surface et commence à communiquer).

Pour les capteurs équipant le SeaExplorer simulé, il est possible de définir leurs états d'activation (par exemple s'ils sont nécessaires pendant les phases de descente, de transition ou de remontée). Ainsi, la consommation d'énergie de cette partie dépend des états d'activation des capteurs (qui peuvent varier au cours des phases de navigation). Par exemple, si un capteur n'est activé que pendant la descente, il est nécessaire de multiplier la puissance du capteur par le pas de temps si le véhicule se trouve dans les phases *Going down* (100) et *Inflexing down* (110). Si le capteur est activé pendant les phases de transitions, il faudra multiplier la puissance du capteur par le pas de temps de la phase *Transmitting* (116). Si le capteur est activé pendant l'ascension, il est nécessaire de multiplier sa puissance par le pas de temps calculé si le drone est en phase *Going up* (117), *Inflexing up* (118) ou encore *Surfacing* (115). Grâce à cette méthode, nous pouvons établir la consommation d'énergie de la partie navigation, de la partie optionnelle et des capteurs à chaque pas de temps, en tenant compte de la phase de navigation du drone. La consommation totale d'énergie est donnée par la somme de toutes ces contributions à la consommation d'énergie. L'énergie disponible est la différence entre l'énergie disponible de la batterie utilisée et la consommation totale d'énergie. L'énergie disponible est donc surveillée tout au long de la mission.

Sorties par l'intermédiaire d'une interface homme-machine (premier niveau)

Pendant la simulation de la mission, la classe *Logs* stocke toutes les variables calculées par la simulation : les positions du planeur dans le plan cartésien, dans le plan géographique que l'on tienne compte ou pas de l'influence du courant, les caps désirés, les caps suivis par le planeur simulé, les phases de navigation, le vecteur temps de la simulation, la consommation d'énergie, l'énergie disponible, et ainsi de suite. Cette classe permet d'avoir un suivi détaillé de l'ensemble de la simulation de la mission et d'avoir accès aux sorties importantes.

L'IHM développée pour notre simulateur est basée sur cette classe et sur l'importation de la bibliothèque graphique python *Tkinter*. Elle permet d'accéder aux trajectoires globales sur un plan géographique avec et sans l'influence du courant sur le planeur durant l'ensemble de sa mission (sur la figure de gauche de la Fig. 2.8, zoom sur une partie de la trajectoire globale). La trajectoire globale est dessinée au milieu en utilisant une variation linéaire de la couleur entre le vert (100% de la batterie) et le rouge (15% de la batterie), puis la couleur noire est utilisée en dessous de 15% de la batterie. L'énergie disponible en fonction du temps est affichée sur un troisième graphique (voir Fig. 2.8).

L'utilisateur final peut consulter la trajectoire effectuée par le planeur simulé dans un plan cartésien 2D ou 3D pour toutes les plongées (cf. Fig. 2.9) et surveiller les phases de navigation. Sur la trajectoire 3D, il est possible de voir des points rouges correspondant aux niveaux de bathymétrie interpolés comme expliqué dans la section 2.2.2.

Enfin, l'IHM fournit également un accès direct aux grandeurs importantes : temps de calcul nécessaire pour simuler une mission, temps mis par le véhicule pour effectuer la mission simulée, distance parcourue et pourcentage d'énergie disponible à la fin de la mission. L'objectif de

HMI SEAEXPLORER trajectory simulator

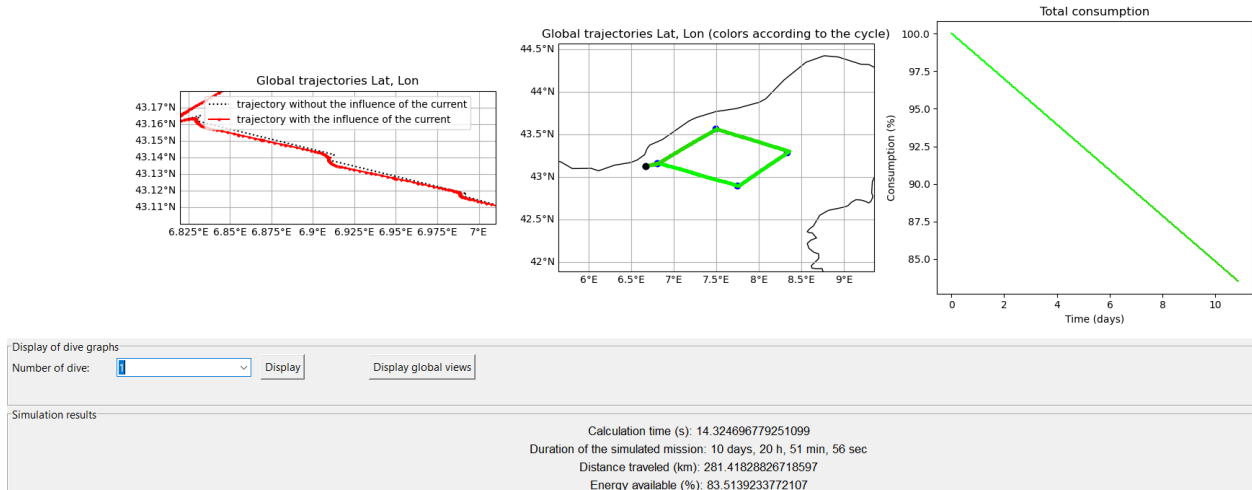


Figure 2.8 – Vue globale de l’IHM

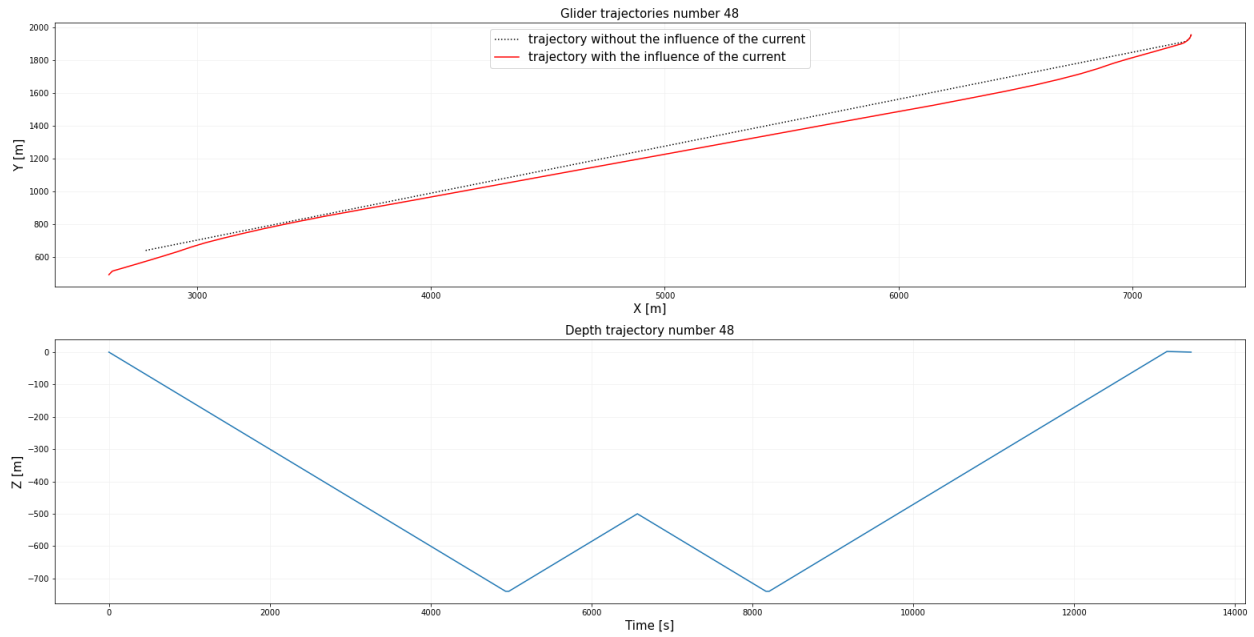
la section suivante est de valider le simulateur en confrontant les résultats d’une mission expérimentale réelle avec ceux obtenus grâce à la même mission que nous avons entièrement simulée.

2.3 Validation expérimentale et discussion

Le 19 janvier 2022, Alseamar a mené une mission au cours de laquelle un SeaExplorer a été déployé sur le transect *MOOSE T00* (série *DYFAMED*) entre Nice (Côte d’Azur) et Calvi (île de Corse) pendant une durée d’environ 14 jours. L’objectif de cette mission était de “mieux comprendre la variabilité à méso-échelle des processus hydrologiques et biogéochimiques de la mer Ligure” [72]. Cette mission est utilisée comme vérité terrain pour valider et évaluer la précision de notre simulateur. La mission du planeur SEA041 a été simulée avec les mêmes paramètres que ceux utilisés dans la mission réelle. La mission était composée de 2 allers-retours entre Nice et Calvi et d’un seul trajet vers Calvi (voir Fig. 2.10 pour un aperçu du suivi de cette mission par le système de gestion de mission GLIMPSE).

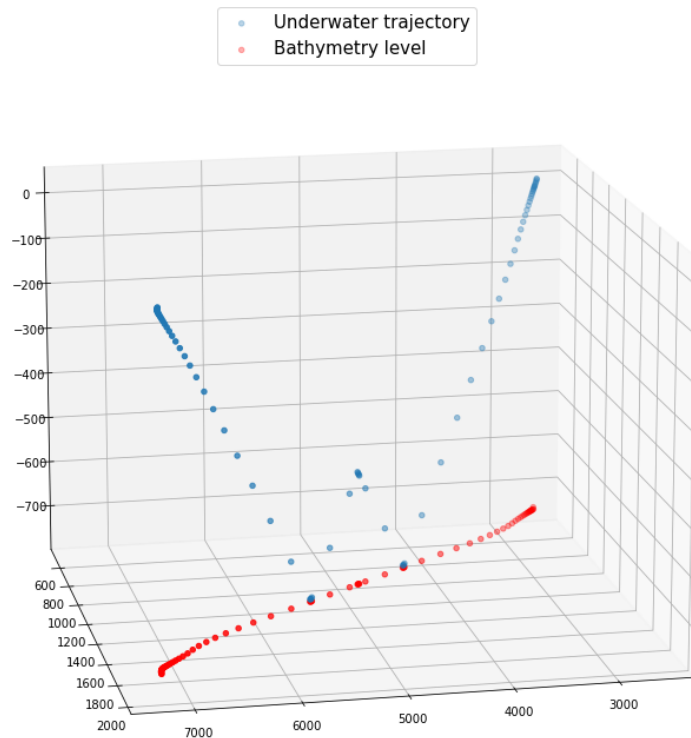
Le drone a été utilisé avec un angle de *pitch* de 20 degrés à 0.20 m/s en vitesse verticale tout en effectuant un seul “yo” de 0 à 1000 m à chaque plongée et en considérant un “ z_s ” de 10 m. Les capteurs embarqués étaient un capteur de fluorescence “FLBBCD”, un capteur “GPCTD” (mesure de la conductivité, de la température et de la profondeur par pompage), un capteur “RBR” (CTD) et un capteur d’oxygène “RinkoDO”. Ces paramètres de vol et configurations de charge utile ont donc été considérés comme des entrées pour le simulateur en utilisant un modèle de courant 4D [7] de la zone afin de générer la simulation la plus réaliste de la mission de SEA041.

Le planeur simulé a effectué 113 plongées contre 116 dans la mission réelle. Il est arrivé avec



(a) Trajectoire sur le plan cartésien

3D trajectory number 48 with the influence of the current



(b) Trajectoire 3D

Figure 2.9 – Trajectoires 2D et 3D du planeur simulé

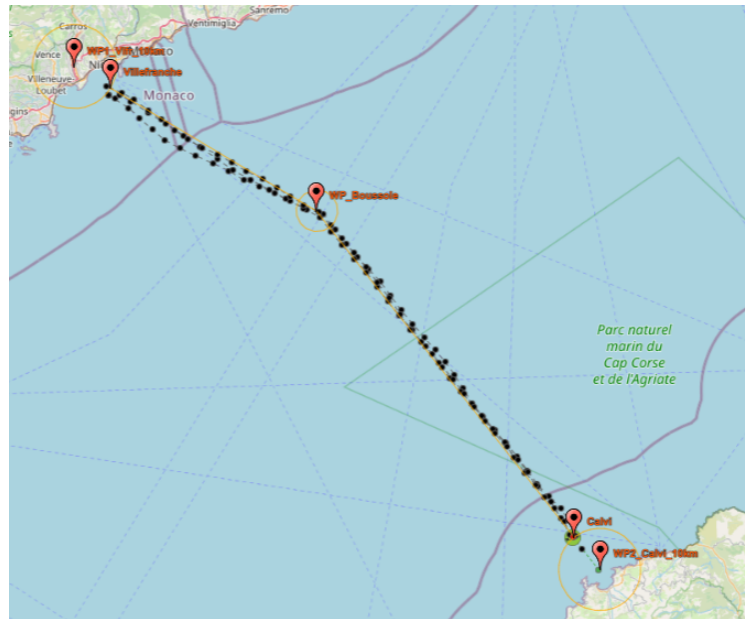


Figure 2.10 – La mission SEA041 vue depuis le système GLIMPSE

HMI SEAEPLORER trajectory simulator

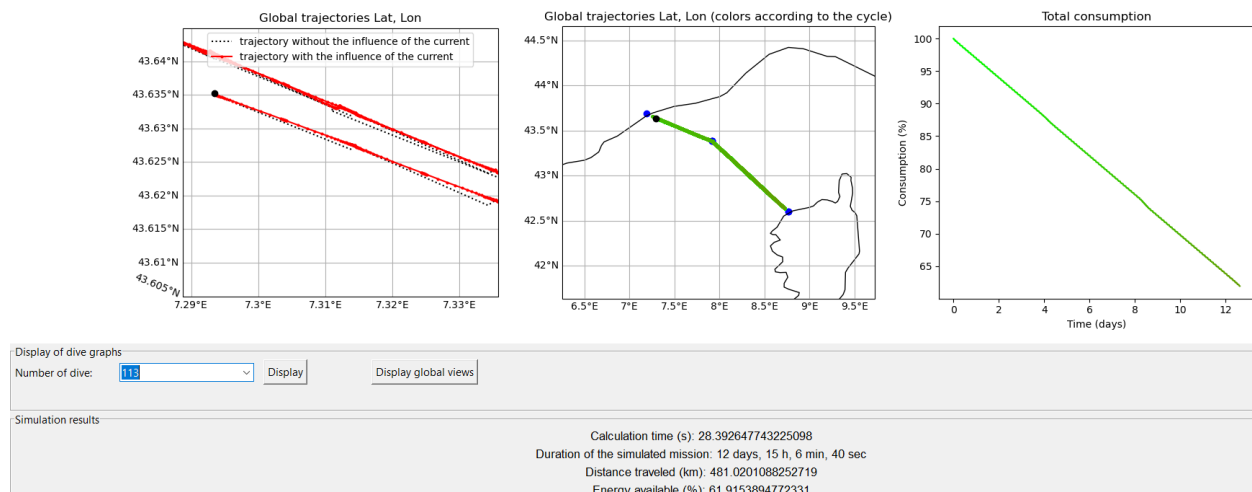


Figure 2.11 – Résultat de la simulation de la mission SEA041, 113 plongées

61.92% de batterie restante contre 59.85% dans la mission réelle (voir Fig. 2.11). Cela signifie qu'il y a une erreur d'environ 2,6% sur le nombre de plongées effectuées entre la simulation et l'expérimentation marine réelle et une erreur d'environ 1% sur l'énergie restante à la fin de la mission pour un nombre équivalent de plongées (voir Fig. 2.12 pour une comparaison de l'énergie restante entre la mission de SEA041 et celle de la simulation).

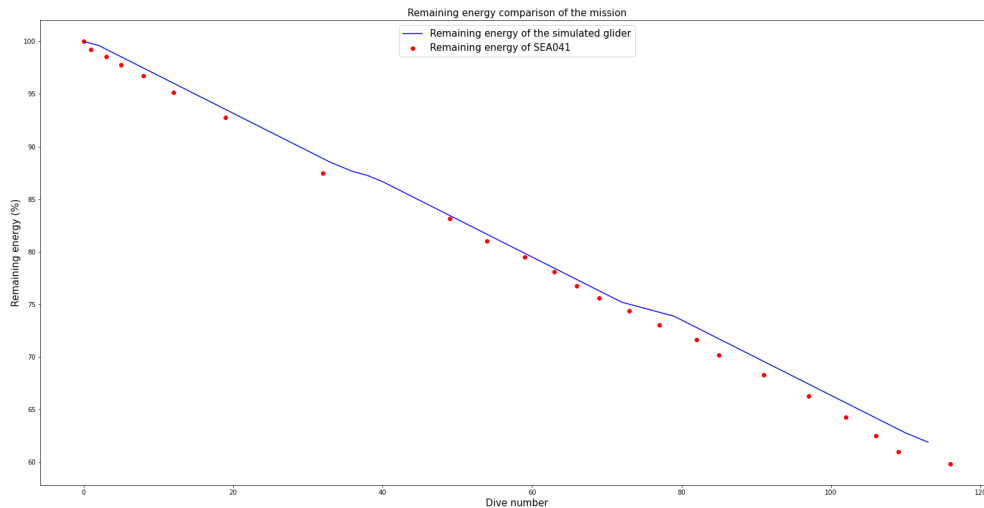


Figure 2.12 – Comparaison de l'énergie restante entre la mission réelle et celle qui a été simulée

Ces différences peuvent être dues à certains événements survenus lors du pilotage du planeur SEA041 tels que l'activation tardive de la compensation du courant marin réalisée à partir seulement de la plongée numéro 15 dans l'expérimentation réelle alors qu'elle a été activée dès le départ dans la simulation (la compensation du courant est activée ou désactivée sur l'ensemble de la mission dans le simulateur) et l'activation de l'altimètre lorsque le véhicule s'est approché des côtes (alors qu'il était désactivé tout le temps de la simulation).

Les résultats obtenus d'un point de vue des trajectoires suivies restent cohérents avec la mission réelle (comme le montre la figure 2.13 pour un transect donné) en dépit du fait que le planeur simulé soit plus rapide (ceci est probablement lié au délai d'activation de la compensation de courant dans la mission réelle).

Cette mission valide la pertinence et l'efficacité du simulateur en tant qu'outil pouvant être utilisé dans la préparation de la mission mais aussi dans la phase de supervision. En effet, il ne faut que 28 secondes pour générer une telle mission. Le simulateur peut également nous permettre de mettre en évidence l'influence de plusieurs paramètres du profil de vol, tels que la profondeur maximale ou le nombre de "yos" sous-marins. Ainsi, sur cet exemple, si nous augmentons le paramètre "sr" à 2, nous pouvons diminuer le nombre de plongées (avec surfacages) à 79 au lieu de 113 comme précédemment. La simulation montre sur la figure 2.14 que la même mission peut être réalisée plus rapidement (12 jours, 10 h, 46 min au lieu de 12 jours, 15 h, 6 min) mais que la consommation est plus élevée qu'auparavant (56,16% de batterie restante contre 61,92%).

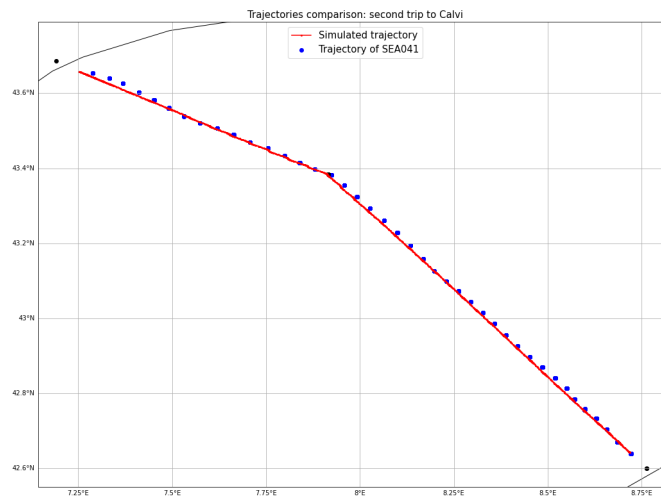


Figure 2.13 – Comparaison des trajectoires entre la mission simulée et la mission réelle sur un transect donné

HMI SEAEXPLORER trajectory simulator

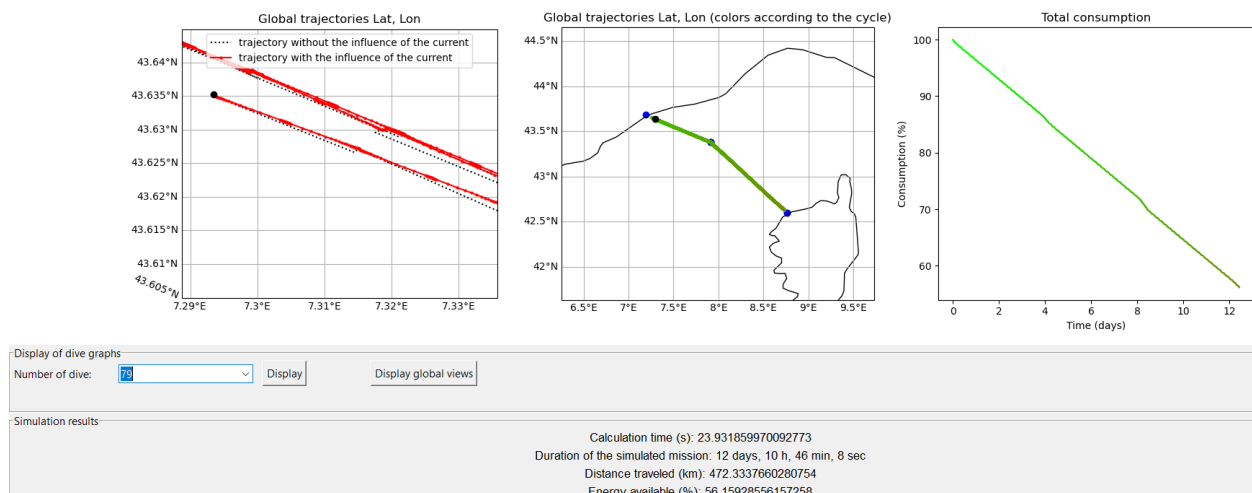


Figure 2.14 – Résultat de la simulation de la mission de SEA041 avec $sr = 2$, 79 plongées

Le simulateur peut également être utilisé pour l'étude ou le test de la composition d'une charge utile pendant la phase de préparation d'une mission. Par exemple, il est possible de jouer autant de scénarios que nécessaire avec différentes listes de capteurs afin de s'assurer de la validité d'un plan de mission. La figure 2.15 montre les sorties d'une simulation de mission SEA041 avec quatre capteurs supplémentaires équipant le planeur simulé : un capteur acoustique, un capteur de méthane, un capteur de turbulence et un capteur de nitrate.

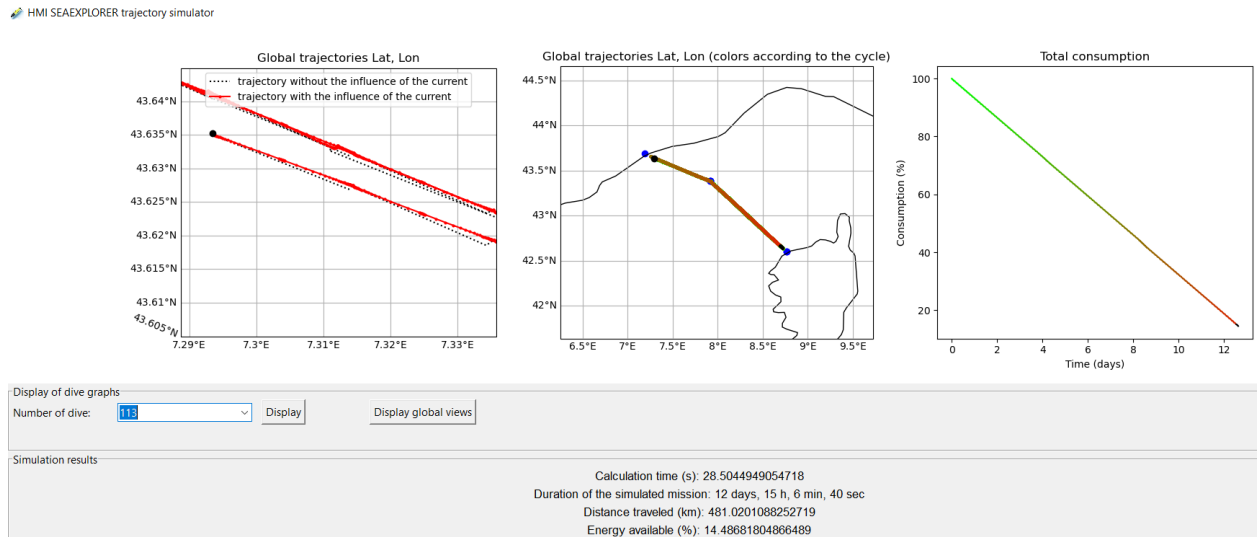


Figure 2.15 – Résultat de la simulation de la mission SEA041 avec quatre capteurs supplémentaires et 113 plongées

Avec cette configuration de charge utile, l'énergie disponible à la fin de la mission simulée est d'environ 14,49%. Comme indiqué précédemment, un niveau de batterie inférieur à 15% est critique pour la récupération du planeur, cette configuration de charge utile ne serait donc pas une option raisonnable pour la mission. Un résumé de ces tests se trouve dans le tableau 2.1.

	Mission réelle	Mission simulée	Simulation avec $sr = 2$	Simulation avec une charge utile augmentée
Numéro de plongée	116	113	79	113
Énergie disponible	59.85%	61.92%	56.16%	14.49%

Tableau 2.1 – Comparatif entre la mission réelle et les résultats de différents scénarios de simulation

Enfin, une étude statistique des temps passés dans les différentes phases de navigation entre la simulation et plusieurs missions réelles a été menée. En comparant plusieurs plongées sur plusieurs missions, nous avons remarqué environ 2 minutes de décalage dans la phase de descente, 2 minutes de décalage dans la phase de remontée, et 2-3 minutes de décalage en phase de communication en surface en moyenne. L'engin simulé est plus rapide que l'engin réel à hauteur de 10% sur les durées de mission. Cela peut être dû à une mauvaise couverture

satellite en mer ce qui peut conduire à des difficultés de communication et donc à une durée plus longue de l'engin réel en surface. Une différence entre le modèle hydrodynamique et la réalité (par exemple dans la prise en compte des variations de densité en mer) peut également produire ce phénomène.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les grands principes du développement de notre simulateur de mission dédié à la planification de trajectoire pour les planeurs sous-marins SeaExplorer. Il simule le mode de fonctionnement actuel du planeur conçu et produit par Alseamar (pilotage automatique par le système de gestion de mission GLIMPSE d'une mission définie manuellement). Il est destiné à être utilisé comme outil de préparation de mission, puis, par la suite, pour la supervision de mission.

Ce simulateur a été confronté à une mission expérimentale réelle qui a été réalisée en janvier 2022. Une comparaison a été effectuée sur les résultats obtenus, en utilisant les mêmes données d'entrée dans les deux cas. Les différentes données de sortie du simulateur sont parfaitement cohérentes avec les résultats observés et avec les données enregistrées lors de la mission considérée. Elles soulignent la pertinence de notre simulateur et sa validité en tant qu'outil de préparation de mission. En ce qui concerne l'étape suivante, à savoir la supervision de la mission, notre simulateur ouvre de nouvelles perspectives prometteuses en raison du faible temps de calcul nécessaire pour simuler une mission entière et jouer plusieurs scénarios.

Dans le chapitre suivant, nous allons maintenant montrer que ce simulateur peut également être utilisé pour établir des coûts de connexions entre waypoints ce qui va nous permettre de construire des méthodes de génération automatique de trajectoires en mode mono et multi-engins. Ce simulateur pourra également être utilisé en cours de mission (phase de supervision) afin de pouvoir tester différentes trajectoires possibles pour choisir la meilleure option.

Chapitre 3

Planification de trajectoire

Nous allons nous intéresser dans ce chapitre à la planification automatique de trajectoire dans le cadre d'un problème de "routage" (voir [127] pour une vue d'ensemble de ce type de problème). Ce problème dit VRP (*Vehicle Routing Problem* en anglais) est un problème d'optimisation combinatoire (sous-ensemble de l'optimisation mathématique) et de recherche opérationnelle qui s'inscrit dans la catégorie des problèmes de transport.

L'optimisation combinatoire consiste à rechercher la meilleure solution parmi un ensemble fini de possibilités [66]. Elle s'intéresse principalement à des problèmes discrets et son but est de trouver la combinaison optimale d'éléments, la permutation optimale d'objets ou la configuration optimale d'une structure, tout en respectant certaines contraintes. Ce type d'optimisation est beaucoup utilisé en logistique, en planification, en conception et routage de réseaux, en gestion de production, en informatique et dans d'autres domaines où des décisions doivent être prises pour maximiser ou minimiser une fonction objectif, tout en prenant en compte des contraintes spécifiques liées au problème qu'on considère.

Afin d'obtenir une solution optimale dans un ensemble discret et fini, une méthode consiste à examiner toutes les solutions possibles et à les comparer pour identifier la meilleure. Cependant, il se peut que le nombre de solutions possibles soit beaucoup trop élevé pour pouvoir les comparer dans un temps polynomial. Certains problèmes d'optimisation combinatoire peuvent être résolus de manière exacte en temps polynomial, grâce à des techniques telles que la programmation dynamique ou grâce à la reformulation en tant que problème d'optimisation linéaire. La plupart des problèmes d'optimisation combinatoire peuvent être formulés en utilisant la théorie des graphes ou de l'optimisation linéaire en nombres entiers. Toutefois, dans la plupart des cas, ces problèmes se révèlent NP-difficiles, nécessitant par conséquent l'utilisation d'algorithmes spécialisés pour les résoudre.

Parmi ces problèmes, nous nous sommes concentrés sur la résolution d'un VRP dans le cadre de la couverture de zone avec un ou plusieurs planeurs sous-marins. La couverture de zone ou *Coverage Path Planning* (CPP) [47] en anglais consiste à trouver un chemin qui passe par tous les points d'une zone ou d'un volume d'intérêt tout en évitant les obstacles possibles.

Ce type de problème de couverture de zone est assez fréquent dans les missions des planeurs sous-marins. Par exemple, lors de missions pétrolières et gazières dans lesquelles on recherche des sources de gaz ou des nappes pétrolifères, l'objectif est d'effectuer une acquisition de mesures en profondeur dans chacune des cases d'une zone prédéfinie afin de détecter un éventuel suintement d'hydrocarbures [82] qui pourrait indiquer la présence d'un gisement.

Dans ce contexte, notre objectif est alors de générer une trajectoire optimisée pour un seul planeur de même que pour un ensemble de plusieurs planeurs (ou flotte de planeurs). Pour ce faire, nous minimiserons alors une fonction de coût dépendant de l'une des grandeurs suivantes : **la durée de la mission, la consommation d'énergie ou la distance parcourue** par l'ensemble des engins. L'approche que nous avons développée se fonde sur la théorie des graphes pour résoudre une généralisation du problème du voyageur de commerce (*Traveling Salesman Problem*, TSP [63]) dans un contexte multi-engins (VRP). Dans un problème VRP, l'objectif est de trouver des itinéraires optimaux pour plusieurs véhicules visitant un ensemble de lieux. Lorsqu'un seul engin est considéré, le problème se réduit alors au problème du voyageur de commerce.

Nous montrerons que la méthode que nous avons développée permet d'automatiser la construction du plan de mission de la flotte de planeurs, c'est-à-dire de calculer les trajectoires optimisées au sens d'un certain critère pour l'ensemble des planeurs de la flotte. Pour atteindre cet objectif, elle s'appuie sur le simulateur développé à l'origine pour les planeurs SeaExplorer qui prend en compte un environnement variable en 4D de la zone à couvrir pouvant contenir des zones d'exclusion. Nous montrerons dans ce chapitre comment la méthode proposée peut prendre directement en compte le courant marin dans la fonction de coût utilisée.

Nous expliquerons également que cette nouvelle approche permet également de trouver les points de déploiement et de récupération optimaux si nécessaire ainsi qu'une estimation de la taille de la flotte. Dans un deuxième temps, il est également possible d'optimiser localement le profil de vol de chaque planeur sur chaque segment de la trajectoire qu'il devra parcourir afin d'optimiser sa consommation d'énergie.

Enfin, pour confirmer la pertinence et l'efficacité de la méthode proposée, des simulations numériques seront proposées (puis au chapitre 4 une expérimentation réelle sera conduite). Les résultats obtenus seront comparés à l'expertise d'un véritable pilote de planeur et à une approche plus classique, qui ne prend en compte que la distance entre les *waypoints* de la zone d'opération.

3.1 État de l'art des algorithmes de planification de trajectoire existants

Les planeurs sous-marins autonomes (AUG) sont une solution efficace pour plusieurs types de missions militaires ou civiles, impliquant soit un seul véhicule, soit une flotte de véhicules. Deux types de réseaux de planeurs peuvent être envisagés : le réseau coordonné et le réseau coopératif non conscient [13]. Dans le cas de réseaux coordonnés, chaque planeur influence le comportement des autres planeurs (par exemple : une relation maître-esclave ou la tenue d'une formation selon une certaine forme géométrique (triangle, peigne, etc.)). Dans le cas d'un réseau coopératif, chaque planeur exécute sa propre partie d'une mission globale sans influencer la mission des autres planeurs. En mono et multi-engins, le but de la plupart des missions de planeurs est de mettre à jour les données océanographiques fournies par des modèles physiques ou des images satellites. En multi-engins, les zones considérées sont souvent très étendues, si bien que l'autonomie énergétique d'un seul planeur ne permettrait pas de couvrir.

Pour réaliser ces missions, des algorithmes de planification de trajectoire prenant en compte un environnement variant dans le temps sont souvent considérés [68, 25, 76, 69, 67, 49, 120, 55]. Dans ce cas, le but est de trouver le chemin optimal entre deux points : un point de départ et un point d'arrivée. La couverture de zone [91, 61, 14, 56] s'avère être un type de mission très important notamment pour la cartographie (couverture des surfaces bathymétriques [46]), l'exploration ou la recherche en haute mer (pour exemple dans le cas du pétrole et du gaz [82] pour la recherche de suintements d'hydrocarbures). Dans ce problème particulier, un réseau coopératif non conscient est généralement utilisé. Pour les planeurs sous-marins, c'est d'autant plus le cas qu'ils ne surfacent pas tous au même moment et qu'ils sont dans l'incapacité de communiquer les uns avec les autres (communication asynchrone via une base à terre).

Dans le cas mono-engin, le planeur doit effectuer une acquisition de mesure en profondeur en validant une fois toutes les cellules de la grille correspondant à la zone d'opération. Dans le cas multi-engins, les cellules de la zone à couvrir sont réparties entre les différents planeurs. De telles missions impliquent souvent l'investigation de zones de plusieurs centaines de kilomètres de large avec un échantillonnage spatial d'environ 12 km (permettant au planeur d'effectuer plusieurs plongées entre le centre des cases de la zone). Les plongées classiques vont jusqu'à 1000 m de profondeur avec une durée de mission pouvant dépasser un mois. Le plan de mission comporte donc souvent un grand nombre de *waypoints*. La plupart du temps, le plan de mission est élaboré par les pilotes de planeurs mais cette étape préliminaire peut devenir une tâche extrêmement complexe car les trajectoires des planeurs sont sensibles aux courants marins en raison de leur faible vitesse. Pour cette raison, la variabilité spatio-temporelle de l'environnement 3D dans lequel les planeurs évoluent doit être prise en compte dans le processus de préparation de la mission. Cette tâche devient encore plus difficile dans le cas

de la gestion de flotte de planeurs. Jusqu'à présent, il n'existe pas de méthodes et d'outils proposés dans la littérature pour aider les pilotes dans cette tâche.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la phase de préparation de mission (mode hors-ligne) qui consiste à produire de manière automatique le plan de mission optimal pour la flotte. La supervision de la mission elle-même (mode en ligne) dont le but est de faire face à d'éventuels événements inattendus tels que la perte, la panne ou l'alarme d'un planeur ou la variabilité des conditions environnementales (grandes variations de courant dans toute la colonne d'eau) sera également abordée dans ce chapitre.

Les algorithmes de planification de trajectoire en couverture de zone existants dédiés à la robotique peuvent être classés de différentes manières : stochastiques versus déterministes ou classiques versus heuristiques. Dans [124], il est choisi de comparer les algorithmes classiques aux algorithmes heuristiques, tous deux pouvant être déterministes ou stochastiques (cf. Figure 3.1).

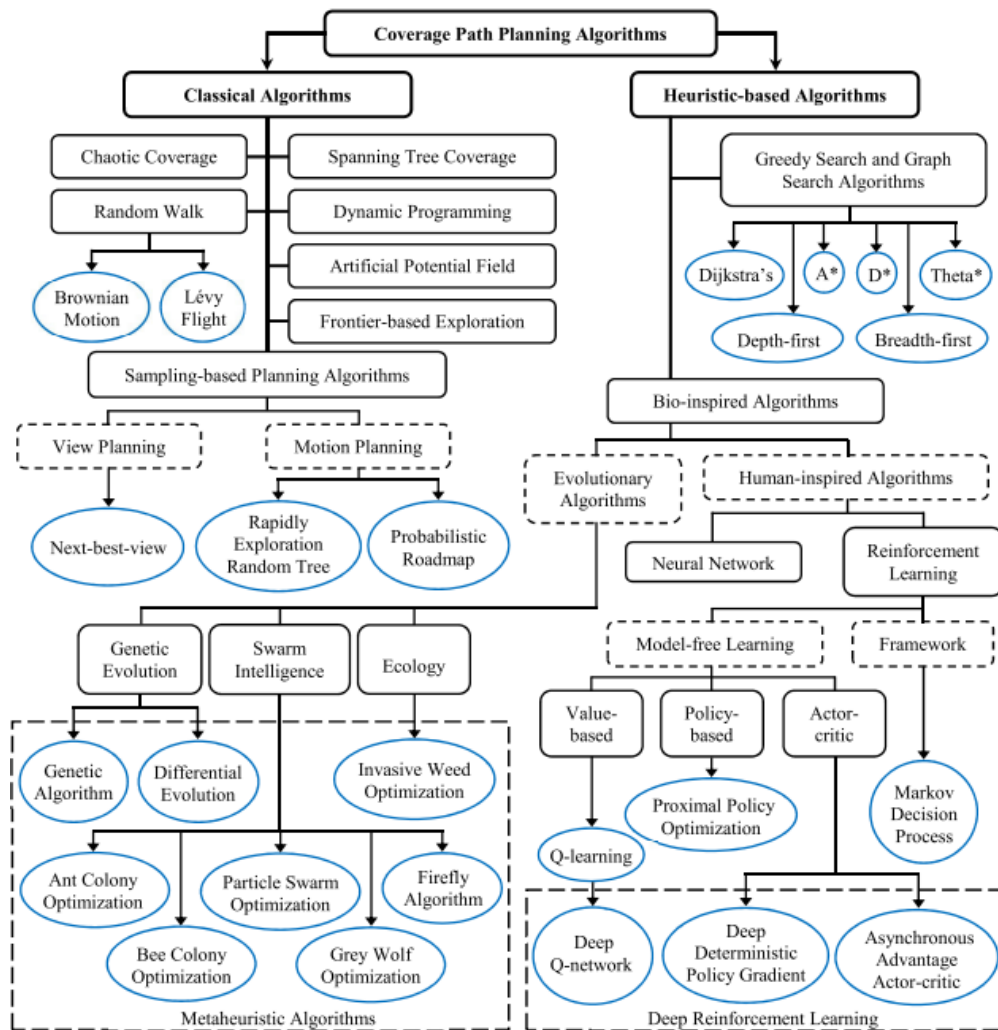


Figure 3.1 – Classification des algorithmes de planification en couverture de zone (CPP) [124]

Les algorithmes classiques visent à trouver la solution optimale, c'est-à-dire la meilleure solution possible selon des critères donnés. Ils sont appropriés pour des problèmes où il est possible d'explorer exhaustivement toutes les solutions possibles et garantissent souvent la solution optimale, mais peuvent nécessiter beaucoup de temps de calcul, en particulier pour les problèmes complexes. Parmi ces algorithmes, on peut trouver la marche aléatoire (RW) [16, 35, 64], le *Spanning-Tree Coverage* (STC) [43, 57], la programmation dynamique (*Dynamic Programming* - DP) [132] et bien d'autres.

Les algorithmes heuristiques quant à eux sont des méthodes plus flexibles dont l'objectif est de trouver une solution proche de l'optimum dans un délai raisonnable, sans réelle garantie de trouver la solution optimale. Ils sont couramment utilisés pour des problèmes complexes pour lesquels il n'est pas possible d'examiner toutes les solutions en un temps raisonnable. Ils se basent souvent sur des règles empiriques, des approximations, ou des stratégies de recherche intelligentes pour converger rapidement vers une solution acceptable. Parmi ces algorithmes appliqués aux problématiques de couverture de zone, on peut citer l'algorithme glouton [133], les algorithmes de recherche de graphe tels que le *Depth-First Search* (DFS), l'algorithme de Dijkstra, A* [75], D* [117], Theta* [88]. Les différences notables entre ces algorithmes sont leur coût en temps de calcul et leurs cas d'application. Si le problème du *Coverage Path Planning* a été largement étudié dans les domaines de la robotique aérienne et terrestre, il l'est moins dans le domaine de la robotique sous-marine.

Concernant ce dernier domaine, plus spécifiquement pour les véhicules sous-marins autonomes (AUV), la plupart des algorithmes CPP se concentrent davantage sur la définition de la zone d'opération que le calcul des trajectoires elles-mêmes puisque des zones complexes sont souvent considérées. Des méthodes de couverture par décomposition cellulaire [45, 44], décomposition cellulaire en boustrophédon [29] ou le *Gladius Bio-inspired Neural Network* (GBNN) [138] peuvent alors être utilisées pour la définition de zone à parcourir. Puis une trajectoire en boustrophédon est souvent suggérée pour couvrir les différentes régions constitutives de la zone complexe à couvrir, ces régions ayant été obtenues au moyen des méthodes précédemment citées.

Dans notre cas, l'accent n'est pas mis sur la définition de la zone d'opération elle-même mais sur la génération de trajectoire pour chaque planeur. La zone d'opération que nous considérons est une carte quadrillée construite en discrétisant l'environnement sous-marin en cellules de même taille et forme sur une même zone. Chaque cellule possède alors deux états possibles : obstacle (zone d'exclusion) ou cible.

Concernant le CPP dans le cas particulier des planeurs sous-marins, relativement peu de solutions ont été proposées. Une comparaison de différents solveurs génériques sur un TSP asymétrique avec les mêmes points de départ et d'arrivée préfixés est effectuée dans [14]. Mais pourtant, les auteurs ne considèrent qu'un seul planeur dans une zone limitée à un maximum de 30 waypoints.

Dans [61, 56], une solution d'optimisation bio-inspirée des colonies de fourmis est proposée,

mais l'impact des courants marins n'est pas pris en compte et les cellules peuvent être revisitées plusieurs fois. Dans notre cas, la méthode proposée se base sur une modélisation du problème du voyageur de commerce asymétrique, mais nous opérons en contexte multi-véhicules si bien que nous le traitons comme un problème VRP. Pour le résoudre nous proposons une approche fondée sur la théorie des graphes.

La nouveauté de notre approche est l'utilisation du simulateur que nous avons développé comme modèle interne direct pour mieux prendre en compte les données environnementales de la zone à couvrir (courants marins, niveaux bathymétriques, zones d'exclusion) et les contraintes de consommation d'énergie liées aux planeurs SeaExplorer (une décharge profonde en dessous 15% doit être bannie). Nous montrerons ainsi que notre méthode permet de fournir un point de déploiement et de récupération optimal et de calculer une trajectoire optimisée entre ces points pour chaque véhicule tout en assurant la couverture de toute la zone. Lorsque ces points de déploiement et de récupération sont fixés pour des raisons pratiques de mise en œuvre opérationnelle (par exemple il est plus simple de déployer près de la côte qu'en très haute mer), elle génère la trajectoire la plus optimisée pour chaque planeur entre ces points. Notre approche permet également le dimensionnement de la flotte en évitant les niveaux d'énergie critiques pour chaque planeur. Enfin, le profil de vol tout au long de la mission pour chaque engin peut être ajusté dans une seconde étape lors d'une optimisation locale. Mais avant d'introduire notre nouvelle méthode, commençons par rappeler des notions nécessaires de théorie des graphes et de modélisation des problèmes de routage de véhicules.

3.2 Rappels de théorie des graphes et problème de routage

Notions de théorie des graphes

Dans le cas de la couverture d'une zone d'opération avec un ou plusieurs planeurs sous-marins, cette zone peut être représentée par une grille de $N \times M$ *waypoints* (noté NM) à visiter par la flotte de planeurs. L'étendue de la zone est donnée par un vecteur de dimension N pour les latitudes et par un vecteur de dimension M pour les longitudes. Cette grille peut être représentée par un graphe dont les nœuds sont les *waypoints* considérés.

Comme indiqué dans [27], un graphe $G = (V, E)$ est une structure mathématique composée de deux ensembles V et E , respectivement appelés sommets ou nœuds (*vertices*, V) et arêtes ou arcs (*edges*, E). Chaque arête est associée à des sommets, qui correspondent aux *waypoints* au centre des cellules de la grille.

En théorie des graphes, une matrice d'adjacence est utilisée pour représenter quels sommets d'un graphe sont adjacents à quels autres sommets. La matrice d'adjacence est une matrice

carrée $NM \times NM$, notée $\mathbf{A} = (a_{ij})$ dont les éléments sont définis par :

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{s'il existe une arête entre le nœud } j \text{ et le nœud } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

Pour créer les arêtes entre les sommets du graphe généré et remplir la matrice d'adjacence, différents types de "voisinages" (N) peuvent être considérés sur la grille de *waypoints* avec un maillage cartésien tel qu'on utilise usuellement pour discrétiser une zone géographique (plan ou géodésique) :

1. N4 : connexions en ligne et en colonne, seuls les quatre plus proches voisins sont considérés
2. N8 : connexions en ligne, en colonne et en diagonale, les huit voisins les plus proches sont considérés
3. N16 : les connexions en ligne, en colonne, en diagonale ainsi que les connexions N4 de chaque diagonale
4. Graphe complet : toutes les connexions entre tous les nœuds du graphe sont admissibles

Cette notion de connectivité [52] est largement utilisée dans les problèmes de détection et fermeture de contours. La figure 3.2 donne un aperçu des connexions qu'il est possible d'avoir entre les nœuds. Un exemple de calcul de matrices d'adjacence sur une zone d'opération comprenant 25 *waypoints* pour les différents types de voisinage est donné en annexe A.

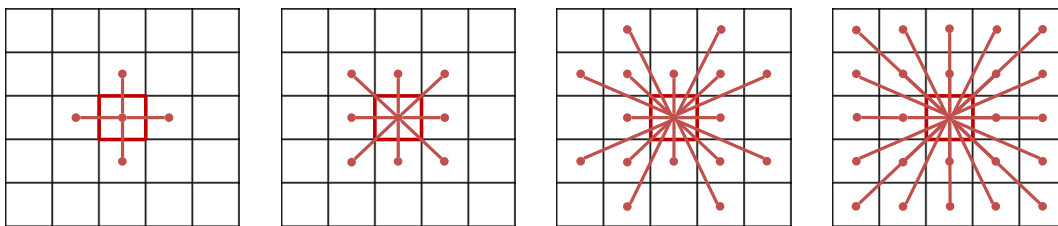


Figure 3.2 – Voisinages 4, 8, 16, graphe complet

Il est possible d'associer un poids w_{ij} à chaque arête d'un graphe afin de représenter des distances, des coûts de trajet entre les nœuds (i et j) lorsque l'on passe par ces arêtes (ces coûts peuvent être liés à un simple calcul de distance ou à d'autres grandeurs (temps, etc...)). Il est donc possible de représenter un graphe non orienté pondéré (les arêtes n'ont pas de direction) en calculant un poids sur les arêtes entre les nœuds. On peut alors construire une matrice d'adjacence pondérée associée au graphe. Cette dernière est également une matrice

carrée $NM \times NM$ $\mathbf{A} = (a_{ij})$ dont les éléments sont définis par :

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 < w_{ij} < z & \text{s'il existe une arête entre le nœud } j \text{ et le nœud } i \\ 0 & \text{si } i = j \\ z & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

avec z un nombre fixe avec une valeur élevée.

Modélisation des problèmes de routage

Les problèmes de routage sont liés à la logistique et impliquent la nécessité pour un ou plusieurs véhicules de parcourir un réseau de transport afin de livrer des marchandises à des clients ou de couvrir les itinéraires du réseau. Le VRP a été largement étudié dans le passé [26] de par sa complexité de résolution et les multiples applications pratiques dans le domaine de la logistique. Cette seconde dimension concerne les avantages économiques et environnementaux associés à la réduction des coûts de transport. La résolution de ce type de problème consiste à déterminer un ensemble d'itinéraires, chacun effectué par un seul véhicule qui commence et finit à son propre dépôt, de telle sorte que toutes les exigences des clients soient satisfaites, que toutes les contraintes opérationnelles soient respectées et que le coût global du transport soit minimisé. Le VRP a été initialement défini par G. B. Dantzig et J. H. Ramser dans [34] comme *The Truck Dispatching Problem* qui est une généralisation du problème du voyageur du commerce. Ce dernier étant une variante simplifiée du VRP en ce sens qu'elle n'implique plus qu'un seul véhicule.

D'après [70], le VRP classique peut être défini de la façon suivante :

Soit $G = (V, A)$ un graphe où $V = 1..n$ est un ensemble de sommets représentant les n villes dont le point de départ (appelé aussi "dépôt") est situé au sommet 1, et A l'ensemble des arcs. Pour tous les arcs (i, j) avec $i \neq j$, il est possible de définir une matrice d'adjacence pondérée non négative $C = (c_{ij})$. Dans certains contextes, c_{ij} peut être interprété comme un coût de déplacement ou comme un temps de trajet entre les nœuds du graphe. Le VRP consiste à concevoir un ensemble d'itinéraires de véhicules à moindre coût de telle sorte que :

1. Chaque ville de V (ne comprenant pas le dépôt) soit visitée exactement une fois par un seul véhicule
2. Tous les itinéraires des véhicules commencent et se terminent au dépôt
3. Certaines contraintes soient satisfaites

Parmi les contraintes existantes, on peut citer des restrictions sur la capacité des engins [70] : une demande d'un certain volume à transporter est attachée à chaque ville (ne comprenant pas le dépôt) et la somme des poids de tout itinéraire de véhicule ne doit pas dépasser la capacité du véhicule. Les VRP soumis à des contraintes de capacité sont appelés "CVRP". On peut également trouver des variantes du VRP dont la contrainte est de respecter une durée totale de trajet pour chaque engin à ne pas dépasser ("DVRP"). On peut aussi définir

des fenêtres temporelles sur certaines villes à visiter (“VRPTW”). On peut également trouver des relations de précédence entre les paires de villes : la ville i peut devoir être visitée avant la ville j (pour ne pas avoir à décharger pour récupérer quelque chose situé au fond du véhicule de transport par exemple). Ces différentes contraintes permettent de définir des variantes du VRP. Plusieurs formulations mathématiques de ces variantes sont données par [71], à titre d'exemple nous donnerons ici une modélisation du VRP connu sous le nom de *vehicle flow formulations* qui est un modèle fréquemment utilisé pour les versions de base du VRP. D'après [127], cette modélisation utilise des variables entières, associées à chaque arc ou arête du graphe, qui comptent le nombre de fois que l'arc ou l'arête est traversé par un véhicule. Ils sont particulièrement adaptés aux cas où le coût de la solution peut être exprimé comme la somme des coûts associés aux arcs.

Ce modèle peut être décrit par une formulation en tant que programme en nombres entiers. Dans cette dernière, c_{ij} représente le coût du passage du nœud i au nœud j , x_{ij} est une variable binaire qui prend la valeur 1 si l'arc allant de i à j est considéré comme faisant partie de la solution et 0 sinon, K est le nombre de véhicules disponibles et $r(S)$ correspond au nombre minimum de véhicules nécessaires pour desservir l'ensemble S . Il est également supposé que 0 est le nœud de dépôt. Cette formulation est donnée par [127] :

$$\text{Minimisation : } \min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{ij} \quad (3.3)$$

$$\text{Sous contraintes : } \sum_{i \in V} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = K, \quad \forall i \in V \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = K, \quad \forall j \in V \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(S), \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (3.8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V \quad (3.9)$$

Les contraintes spécifient les conditions que la solution doit satisfaire. Les contraintes 3.4 et 3.5 stipulent qu'un arc entre et sort de chaque sommet associé à un client. Les contraintes 3.6 et 3.7 stipulent que le nombre de véhicules quittant le dépôt est le même que le nombre de véhicules y entrant. La contrainte 3.8 représente une contrainte de réduction de capacité (*capacity cut constraints* en anglais) qui imposent que les itinéraires soient connectés et que la demande sur chaque itinéraire ne dépasse pas la capacité des véhicules. Enfin, la dernière contrainte (3.9) spécifie que les variables x_{ij} sont binaires : si une connexion entre les villes i et j est établie, la variable vaut 1 et elle vaut 0 sinon.

Une grande variété de solveurs ont vu le jour dans le but d’obtenir des solutions approchées de variantes du VRP ([95] par exemple). Dans le cadre de ces travaux de thèse, c’est le solveur développé par Google que nous avons choisi d’utiliser. Il sera présenté dans la sous-section 3.4.4.

3.3 Contraintes et objectifs dans le cas de la gestion d’une flotte de planeurs

Nous nous concentrons sur le problème de génération de trajectoire de planeurs sous-marins, en considérant des missions de type couverture de zone. Il s’agit de visiter une seule fois tous les points d’une zone discrétisée selon un échantillonnage spatial donné en tenant compte de la bathymétrie et des éventuels obstacles tels que les bordures de côtes ou les zones interdites à la navigation. Pour cela, nous allons intégrer les conditions environnementales et plus particulièrement les courants évoluant dans le temps et sur l’ensemble de la colonne d’eau grâce à la base de données Marine Copernicus [8]. Comme montré dans le chapitre précédent, les résultats d’une mission testée au moyen du simulateur que nous avons développé sont très proches de ceux obtenus lors de la mission réelle, ce qui confirme la pertinence et la bonne calibration de ce dernier. De plus, notre simulateur permet de calculer les grandeurs d’intérêt liées à toutes les trajectoires possibles d’un ou de plusieurs planeurs sous-marins sur la zone considérée ce qui en fait un outil intéressant pour le domaine de la planification de trajectoire. En effet, en se basant sur le modèle comportemental du planeur et sur le modèle de l’environnement dans lequel il évolue (bathymétrie 3D et courant marin en 4D), le simulateur permet le calcul des principales grandeurs d’intérêt : le temps de parcours, la consommation d’énergie, la distance parcourue pour une trajectoire donnée pour plusieurs profils de vol entre n’importe quel *waypoint* et ses voisins. Il permet donc de facilement construire des matrices d’adjacence de graphes pondérés qui sont la représentation utilisée pour minimiser le coût du parcours par rapport à la grandeur retenue : distance, temps, énergie. Nos objectifs sont de fournir la **taille de la flotte nécessaire** à la mission et de **produire des trajectoires optimales ou légèrement sous-optimales en mono ou multi-engins**. La contrainte principale est liée à l’**autonomie des véhicules** : nous devons éviter un niveau de batterie inférieur à 15% pour chaque planeur. Le premier critère d’optimisation que nous utilisons est la **minimisation de la durée de la mission**. En considérant ces contraintes et objectifs, la méthode que nous présentons dans la suite de ce document permet également de déterminer **les points optimaux de déploiement et de récupération**. Toutefois, si ces points sont pré-fixés pour des questions de mise en oeuvre pratique de la mission, nous montrerons que la méthode proposée fonctionne également (les trajectoires calculées sont justes un peu moins optimales). Notre approche répond donc aux besoins de préparation de mission de planeurs (dimensionnement de la flotte, choix des points de déploiement et de récupération et calcul de

trajectoires optimales ou légèrement sous-optimales).

Au-delà de l'obtention de la trajectoire optimisée (niveau de planification), l'utilisation du simulateur contribue également à améliorer la tâche de navigation en évaluant l'efficacité de différents profils de vol. En effet, pour éviter un courant marin trop fort à faible profondeur, il est parfois plus rentable d'évoluer à plus grande profondeur. C'est pourquoi, après une première phase d'optimisation globale, les paramètres de vol de chaque véhicule peuvent être encore affinés sur chaque segment du plan de mission généré en effectuant une seconde passe d'optimisation mais basée, cette fois, sur un critère énergétique. Ainsi la trajectoire optimisée peut être transférée au système de gestion de mission GLIMPSE avec un profil de vol adapté tout au long de la trajectoire. Pour construire automatiquement le plan de mission, nous proposons de combiner notre simulateur et la méthode de génération de trajectoire que nous proposons et que nous allons maintenant détailler dans la section suivante.

3.4 Détails des approches de génération automatique de trajectoire

Une architecture pour répondre aux besoins de couverture de zone a été développée en Python objet. Elle prend comme modèle d'entrée une zone à couvrir représentée par un maillage cartésien de *waypoints* (grille) à visiter par un planeur sous-marin. Comme expliqué précédemment dans la sous-section 3.2, cette grille est représentée par un graphe dont les nœuds sont les *waypoints* considérés.

Une matrice d'adjacence (cf. sous-section 3.2) est construite à partir de cette modélisation en utilisant différents types de voisinage (cf. sous-section 3.2) entre les nœuds. Sur la base des connexions créées entre les nœuds et à partir des grandeurs d'intérêt, il est possible d'établir un coût sur ces connexions. Ceci est représenté par une matrice pondérée (cf. sous-section 3.2). Ce coût peut être obtenu par différentes méthodes. Nous pouvons soit utiliser notre simulateur de missions de planeur sous-marin comme modèle interne direct, soit effectuer une estimation de coût en distance ou de coût en temps entre les nœuds reliés par des arêtes. Ces méthodes seront présentées dans la sous-section 3.4.3.

Ensuite, un solveur générique nommé OR-Tools [42] est utilisé pour résoudre le problème ainsi modélisé. Le résultat est un chemin réalisable et optimisé au sens de la grandeur considérée passant par tous les nœuds du graphe défini. Enfin, il est possible de tester cette trajectoire sur notre simulateur de missions de planeur sous-marin afin de comparer les grandeurs d'intérêt obtenues et de confirmer la pertinence de la trajectoire construite.

La figure 3.3 présente un diagramme synoptique de l'architecture de planification de trajectoire en couverture de zone que nous suggérons.

Les principales fonctions sont maintenant détaillées dans les parties suivantes.

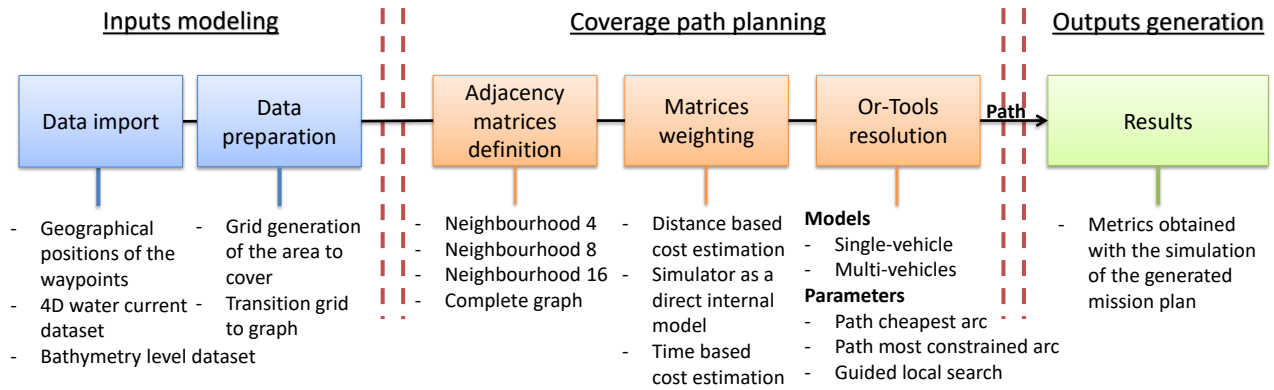


Figure 3.3 – Vue d’ensemble de l’architecture proposée pour la couverture de zone

3.4.1 Préparation des données d’entrées

Pendant la phase de préparation de mission, les pilotes de SeaExplorer définissent chaque *waypoint* à cibler par leurs coordonnées de latitude et de longitude et par une distance de validation associée.

Les planeurs sous-marins sont très sensibles aux courants marins. Pour piloter correctement les planeurs SeaExplorer, le pilote doit prendre en considération un environnement variable 4D (latitude, longitude, immersion et temps) qui peut contenir des zones d’exclusion telles que les côtes proches ou les zones à faible bathymétrie ou les zones interdites à la navigation. La méthode développée prend en entrée les positions géographiques des *waypoints* (vecteurs de N latitudes et M longitudes) à atteindre par le planeur, un jeu de données 4D sur les courants marins et un jeu de données 3D sur la bathymétrie au format NetCDF de la zone d’intérêt. Elle génère une grille de $N \times M$ de la zone à couvrir avec les NM *waypoints*. Leur distance de validation est le centre des cellules de la grille. Une préparation du jeu de données 4D des courants marins est menée afin d’obtenir un courant 3D sur la zone d’opération : en chacun des points du cube d’eau sur les dates disponible dans le jeu de données 4D (voir la Fig. 3.4), on effectue une moyenne sur le temps des composantes Est et Nord des courants de chaque points.

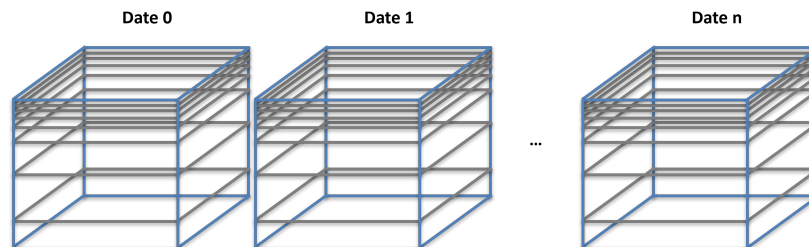


Figure 3.4 – Modélisation des données de courant pour plusieurs dates

Pendant la phase de génération de la grille, la méthode utilise le jeu de données sur les courants marins et le jeu de données sur les niveaux de bathymétrie pour vérifier si tous les points de passage sont accessibles ou si certains d’entre eux font partie des zones d’exclusion. Si un point de passage doit être exclu de la zone, il est retiré de la grille. Une fois la grille de la zone d’opération créée, un graphe peut être généré à partir duquel il sera possible de construire différentes matrices d’adjacence (cf. section 3.2 et 3.4.3) est possible d’obtenir une matrice d’adjacence comme expliqué précédemment.

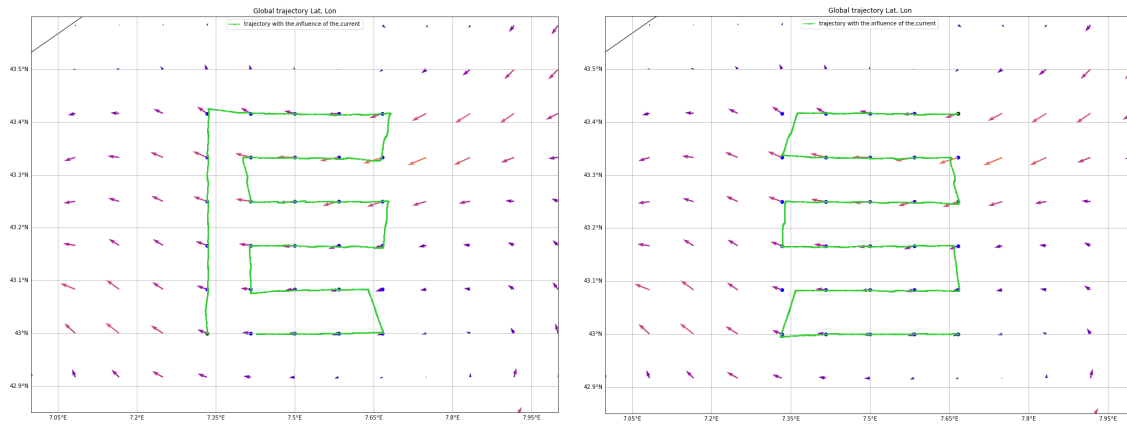
3.4.2 Principe de la construction d’un chemin hamiltonien : vers une première solution au problème de routage

Nous nous sommes d’abord intéressés à la recherche d’un chemin hamiltonien [104]. Le but est de converger vers un chemin qui passe par tous les nœuds une seule fois d’un graphe prédéfini une fois. Dans le cadre de cette première étude, nous ne considérons pas de matrices d’adjacence pondérées mais plutôt des matrices d’adjacence prenant en compte uniquement les connexions entre les *waypoints* de la zone d’opération au voisinage 4 (matrices dont les éléments sont égaux à 0 ou à 1). D’autres types de voisinage auraient pu être utilisés.

Pour la simulation, une zone à couvrir a été sélectionnée entre Nice et Calvi. Cette zone est composée de 30 nœuds à visiter par un planeur, ces nœuds constituant des points de passage avec une distance de validation de 2500 m.

La méthode développée considère une matrice d’adjacence construite automatiquement en tenant compte des connexions au voisinage N4 (voir la sous-section 3.2) entre les nœuds de la zone d’intérêt et un point de déploiement qui a été fixé. L’objectif est alors de déterminer l’ordre de passage par tous les nœuds permettant d’assurer la construction d’un chemin hamiltonien. Cet ordre de succession est utilisé pour définir un objet “mission” dans le simulateur. Ainsi, il est possible d’utiliser le simulateur en complément de cette méthode pour valider les trajectoires générées et prédire les grandeurs importantes relatives à la mission : sa durée, la distance parcourue et l’énergie qui sera consommée pour la réaliser (cf. Tableau 3.1). En jouant sur le point de déploiement initial, nous avons construit différentes trajectoires avec le planificateur de trajectoires hamiltoniennes. Dans l’exemple présenté, deux points distincts ont été fixé, l’un au Sud-Ouest de la zone (Fig. 3.5 (a)) et l’autre au Nord-Est (Fig. 3.5 (b)). Nous pouvons vérifier à travers cet exemple qu’il y a des écarts importants sur la distance de déplacement, 20.29 km, et sur la consommation d’énergie, 1,43%, comme l’indique le tableau 3.1. Dans cette simulation, le même profil de vol a été utilisé que lors de la mission du planeur SEA041 (présentée dans la section 2.3). Cette simulation utilise le même jeu de données 3D que celui utilisé pour la simulation de la mission de SEA041, et par ailleurs, dans la zone considérée, le glider rencontre des courants relativement importants car il traverse le courant Liguro-Provençal.

Sur la figure 3.5, les courants de surface (même si le simulateur utilise quant à lui un modèle



(a) Résultat de la génération du chemin hamiltonien à partir du nœud 0

(b) Résultat de la génération du chemin hamiltonien à partir du nœud 29

Figure 3.5 – Trajectoires générées par l’algorithme du chemin hamiltonien

Nœud de départ	Durée de la mission simulée	Distance parcourue	Énergie disponible
0	5.67 jours	86.93 km	83.18%
29	5.19 jours	66.64 km	84.61%

Tableau 3.1 – Comparaison des résultats entre deux chemins hamiltoniens possibles

4D) ont été représentés par des vecteurs de différentes longueurs en fonction de leur intensité, et leur orientation est donnée par leurs composantes Nord et Est. Le tableau 3.1 met en évidence le fait que le courant marin est assez important et qu’il peut avoir un impact majeur sur les trajectoires des véhicules simulés et en particulier sur la durée de la mission, la distance de déplacement et l’énergie disponible à la fin de la mission.

D’après les résultats obtenus, un boustrophédon commençant au Nord de la zone serait une meilleure option qu’une trajectoire toujours en boustrophédon mais commençant au Sud-Ouest. Ceci est dû à la présence d’un important courant descendant du Nord-Est au Sud-Ouest. La différence d’énergie disponible peut sembler faible à première vue, mais il est important de garder à l’esprit que les planeurs SeaExplorer sont généralement utilisés pour de longues missions de plusieurs mois et cette différence pourrait devenir réellement significative au bout de quelques semaines de mission.

On observe donc que **le point de déploiement joue un rôle déterminant** dans la réussite de la mission, ce qui souligne aussi l’intérêt de notre simulateur pour choisir les meilleures trajectoires en sortie de méthodes de planification de trajectoire.

3.4.3 Construction de différentes matrices d’adjacence pondérées

La présence de forts courants marins dans la zone d’opération reste la principale contrainte des missions des planeurs sous-marins : il est moins coûteux d’aller dans le sens du courant que contre lui. C’est pourquoi il est pertinent de remplacer le poids binaire dans la matrice

d'adjacence par un poids ayant une réelle signification physique. Ainsi, nous suggérons de prendre en compte le modèle comportemental du planeur et le modèle de l'environnement (bathymétrie 3D et données 4D de courant marin) pour simuler une trajectoire de planeur sous l'influence du courant et aussi proche que possible de la réalité.

Nous avons développé trois approches différentes pour calculer les poids w_{ij} des matrices d'adjacence pondérées (voir la sous-section 3.2). Elles seront successivement présentées dans les trois sous parties suivantes. La première méthode consiste à utiliser la formule Haversine [3] pour calculer les distances entre tous les nœuds du graphe complet généré. Les deux autres méthodes exploitent un modèle de courant marin moyenné sur la durée de la mission prévue (voir sous-section 3.4.1). Nous sommes obligé d'utiliser une information moyenne sur le courant car il n'est pas possible de savoir à l'avance quelle sera la séquence optimale de *waypoints* et donc quand le planeur simulé passera effectivement par un *waypoint* donné de la zone à couvrir. La deuxième méthode est basée sur le simulateur présenté dans [81] et la dernière repose sur une estimation de coût en temps. Les matrices d'adjacence pondérées construites avec ces deux dernières méthodes sont asymétriques puisque le coût entre le nœud i à j n'est pas le même que le coût entre le nœud j à i du fait de l'influence du courant, alors que celle construite avec la première méthode est symétrique.

Estimation du coût en distance

A partir de la zone à couvrir utilisée en entrée du modèle, on extrait les positions géographiques de tous les *waypoints* composant la grille. A partir de ces positions, une formule d'Haversine est utilisée pour calculer la distance entre les nœuds du graphe complet généré à partir de la zone à couvrir. La distance entre deux *waypoints* i et j est donnée par l'équation (3.10) :

$$w_{ij} = D_{ij} = E_r \cdot (2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a})) \quad (3.10)$$

avec $a = \sin^2(\frac{Lat_j - Lat_i}{2}) + \cos(Lat_i) \cdot \cos(Lat_j) \cdot \sin^2(\frac{Lon_j - Lon_i}{2})$, E_r représente le rayon de la Terre (rayon moyen = 6 371 km), Lat_i and Lon_i (resp. Lat_j and Lon_j) sont les positions géographiques du *waypoint* i (resp. *waypoint* j).

Cette méthode permet de calculer la distance réalisée sur chaque connexion de la matrice d'adjacence. Dans ce cas là, l'optimisation est effectuée sur la distance parcourue par les planeurs SeaExplorer qui est minimisée.

Utilisation du simulateur comme modèle interne direct

Il a été démontré dans le chapitre précédent que notre simulateur de mission de planeurs sous-marins est pertinent et fiable pour estimer les paramètres les plus importants tels que le niveau de la batterie, la durée de la mission et la distance parcourue par le planeur SeaExplorer sur la base du modèle comportemental du planeur et des modèles de l'environnement dans lequel il évolue. Il est possible de simuler n'importe quelle trajectoire avec différents profils de

vol entre n'importe quels *waypoints*.

Notre méthode de planification de trajectoire en couverture de zone a été conçue pour appeler ce simulateur afin de calculer le poids de chaque arête en prenant comme données d'entrée la zone d'opération et la matrice d'adjacence du graphe généré. Pour chaque arête, la méthode utilise les coordonnées géographiques des deux nœuds connectés par l'arête considérée pour lancer une simulation d'un SeaExplorer sur une trajectoire rectiligne entre ces deux nœuds avec un profil de vol donné. Une fois la simulation terminée, la méthode enregistre le résultat de la grandeur qui sera impliquée dans la fonction de coût à minimiser. Cette grandeur est utilisée comme poids w_{ij} sur l'arête considérée. Avec cette méthode, on passe par tous les éléments de la matrice d'adjacence pour établir la valeur de tous les poids de la matrice d'adjacence pondérée.

Estimation du coût de trajet en temps de parcours

La méthode précédente fondée sur l'utilisation du simulateur en modèle direct reste assez coûteuse en temps de calcul si bien qu'on limite l'utilisation de cette méthode aux voisinages 8 et 16 pour rester sur des temps de calcul inférieurs à 1h.

C'est pourquoi nous avons développé une autre méthode basée sur des approximations qui permet de générer une matrice d'adjacence pour un graphe complet. Cette méthode consiste à calculer une estimation des temps nécessaires pour effectuer une trajectoire rectiligne entre toutes les paires de nœuds connectés par les arêtes. De manière similaire à la méthode précédente, cette méthode de planification de trajectoire passe en revue tous les éléments de la matrice d'adjacence afin de calculer le poids de chaque arête, mais au lieu d'utiliser le simulateur comme modèle interne direct, il utilise une projection vectorielle entre le vecteur de déplacement V_d , le vecteur de courant marin moyen V_c (avec α l'angle entre V_c et V_d) et le vecteur de vitesse du planeur V_g (voir Fig. 3.6).

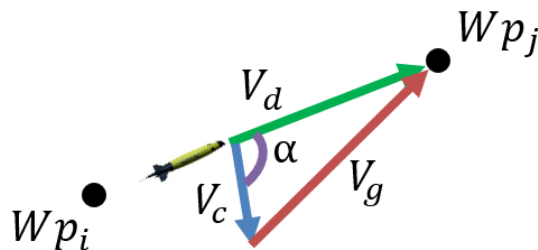


Figure 3.6 – Projection vectorielle

En utilisant les coordonnées géographiques des deux waypoints Wp_i et Wp_j et en calculant la distance D_{ij} et la *heading* (dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord) entre eux, nous calculons la distance d nécessaire pour estimer le vecteur courant moyen sur la

colonne d'eau (voir Fig. 3.7). Ce vecteur dépend d'une discrétisation spatiale fixe N . Tous les $d = \frac{D_{ij}}{N}$ entre les Wp_i et Wp_j un vecteur moyen du courant sur la colonne d'eau en fonction d'une profondeur maximale ciblée est calculé. Il s'agit d'une moyenne des composantes Est (E_i avec $i = [0, N]$) et Nord (N_i avec $i = [0, N]$) des courants disponibles à chaque point disponible dans la colonne d'eau, pondérée par la hauteur de la couche correspondante (H_i pour $i = [0, N]$).

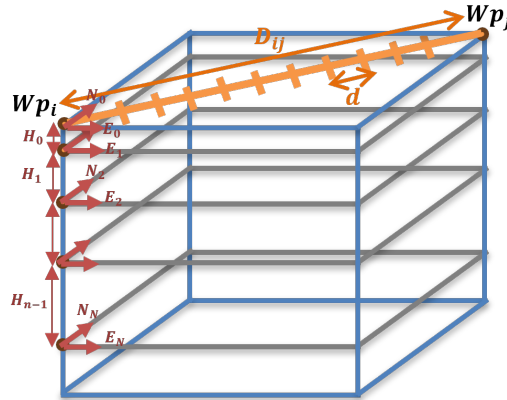


Figure 3.7 – Calcul de la moyenne pondérée du courant

Des interpolations 2D sont effectuées pour récupérer le niveau de bathymétrie sur la position géographique actuelle afin de ne pas dépasser la bathymétrie disponible et l'immersion commandée. Une moyenne des courants marins calculés le long de la route entre les deux waypoints est générée, c'est la valeur de la norme pour le vecteur de courant moyen V_c .

La norme du vecteur V_g correspond à la vitesse horizontale du SeaExplorer. Elle est calculée à partir du modèle hydrodynamique qui fait intervenir la vitesse verticale cible et le *pitch* cible comme données d'entrée. En utilisant la projection vectorielle décrite à la figure 3.6, l'objectif de cette méthode est de trouver les deux racines du polynôme d'ordre 2 en V_d suivant : $V_d^2 + V_d(-2V_c \cos(\alpha)) + (V_c^2 - V_g^2) = 0$ afin d'obtenir la norme du vecteur de déplacement, V_d . Ensuite, le coût en temps de chaque arête (graphe complet) est obtenu avec : $w_{ij} = \frac{D_{ij}}{V_d}$.

Cette méthode moins coûteuse en termes de temps de calcul que la méthode présentée précédemment. Toutefois, la contrepartie est qu'elle permet de ne construire des chemins optimisés au sens du temps de mission uniquement. Il est également possible d'utiliser cette méthode pour compléter la matrice d'adjacence pondérée obtenue avec le simulateur en tant que modèle interne direct. Au lieu d'utiliser une valeur élevée fixe pour z , il est possible de la calculer grâce à cette méthode afin d'obtenir un graphe complet.

Une fois la matrice d'adjacence construite il est possible de résoudre un VRP. Pour pouvoir traiter des cas à grands nombres de Waypoints, nous utilisons le solveur OR-Tools.

3.4.4 Résolution OR-Tools

OR-Tools est un solveur open-source développé par Google [42]. Il s’agit d’une suite logicielle pour l’optimisation dans les domaines de la programmation par contraintes, de la programmation linéaire, du routage de véhicules, etc.

Notre méthode utilise le solveur de routage de véhicules d’OR-Tools qui peut générer un itinéraire optimisé, un itinéraire étant une séquence de nœuds à visiter. Tout d’abord, il crée un modèle de données qui stocke les données du problème à résoudre. Dans notre cas, le problème à résoudre est de trouver un chemin optimisé selon la grandeur considérée qui passe par tous les nœuds de la zone d’opération une seule fois, qu’il s’agisse d’un seul planeur ou d’une flotte de planeurs. Le modèle de données est composé du nombre de véhicules à utiliser, d’un paramètre *depot* qui correspond à l’emplacement de départ et d’arrivée de l’itinéraire et d’une matrice de coûts qui, dans notre cas, est la matrice d’adjacence pondérée générée par rapport à l’une des 3 grandeurs d’intérêt que nous considérons et qui sera minimisée par le solveur.

Une fois le modèle de données instancié, la méthode crée un modèle de routage grâce au module “pywrapcp” de l’API. Le solveur de routage de véhicules utilise une fonction “transit callback” pour prendre n’importe quelle paire de nœuds et retourner le coût des arêtes entre ces nœuds en récupérant cette information directement dans notre matrice d’adjacence pondérée. Dans le cas d’une planification de trajectoire pour plusieurs véhicules, un paramètre de *dimension* est ajouté dans les paramètres du solveur qui calcule le coût cumulé de la route parcourue par chaque véhicule. Ce paramètre permet au solveur de trouver un itinéraire ayant approximativement le même coût global pour chaque véhicule de la flotte. Si une optimisation sur le temps de parcours est sélectionnée, les engins composant la flotte arriveront au point de récupération quasi-simultanément.

Le processus de recherche du solveur est basé sur une approche de type *first solution strategy*. De cette manière, le solveur trouve une solution initiale qui sera optimisée au cours de la recherche. Plusieurs méthodes heuristiques sont disponibles dans le solveur, telles que “PATH_CHEAPEST_ARC” ou “PATH_MOST_CONSTRAINED_ARC”, dont les descriptions sont données dans [4].

Il est également possible d’utiliser comme paramètre une recherche locale telle que la métaheuristique “GUIDED_LOCAL_SEARCH” afin d’échapper aux minima locaux au cours du processus de recherche. Une limite de temps pour le solveur doit alors être fixée lorsque cette métaheuristique est utilisée.

A l’origine, la partie du solveur consacrée au routage des véhicules a été conçue pour résoudre le problème du voyageur de commerce, qui correspond à la recherche du meilleur itinéraire (le plus court) passant par tous les nœuds du graphe une fois et revenant au point de départ (on effectue alors un cycle). Toutefois, pour définir des lieux de départ et d’arrivée différents pour chaque véhicule impliqué dans le problème, il reste possible de modifier le modèle de

données fourni en entrée au solveur. Un chemin est alors construit puisqu'il n'y a pas de retour au nœud de départ. Pour ce faire, deux vecteurs contenant les indices des emplacements de départ et d'arrivée doivent être ajoutés au modèle de données.

Mais au lieu de fixer les points de déploiement et de récupération pour générer un tel chemin, une autre approche est envisageable. Nous pouvons revenir à la recherche d'un cycle mais ajouter un nœud de départ et un nœud d'arrivée fictifs dans le graphe utilisé initialement pour créer la matrice d'adjacence. Ce nœud fictif sera supprimé ultérieurement. Pour être intégré dans la matrice d'adjacence pondérée, il doit avoir des arêtes connectées à tous les autres nœuds du graphe, mais ces arêtes doivent avoir un poids nul. Cela revient donc à ajouter une ligne et une colonne de zéros dans la matrice d'adjacence pondérée du graphe. En plaçant le *depot* à ce nœud fictif, le solveur trouvera un cycle commençant au nœud fictif et se terminant au même nœud. En supprimant la première et la dernière étape de l'itinéraire généré, le nœud fictif est éliminé et il devient possible de trouver les meilleurs nœuds de déploiement et de récupération.

3.4.5 Génération des données de sorties

La route obtenue pour chaque planeur de la flotte est sauvegardée par la méthode et est convertie en un objet *Mission* pour chaque planeur en tant qu'entrée du simulateur de mission des planeurs sous-marins. Notre simulateur repose sur l'utilisation du *multithreading* pour générer des simulations de trajectoires pour la flotte de planeurs afin de simuler le plan de mission global après que ce dernier ait été optimisé.

A partir de la grille de la zone d'opération à couvrir (section 3.4.1), la méthode a accès à toutes les positions géographiques des *waypoints* composant cette grille ainsi qu'à leur distance de validation (V_d). La méthode génère ainsi une liste de *waypoints* cibles au format : $[Lat_{wp}, Lon_{wp}, V_d]$, où Lat_{wp} (resp. Lon_{wp}) représente la latitude (resp. la longitude).

Après avoir créé la liste des *waypoints*, elle génère l'attribut *segment* de l'objet *Mission* en tant qu'entrée du simulateur. Cet attribut consiste à définir une liste de *waypoints* initiaux, de *waypoints* à cibler avec un numéro de profil de vol donné et un numéro de charge utile donné pour chaque segment à effectuer par le planeur simulé sur la route optimale générée. Le même profil de vol (vitesse verticale, *pitch*, immersions, nombre de "yos", temps à la surface pour communiquer) et le même profil de charge utile (activation/désactivation des capteurs) donnés en entrée de la méthode pour la création de la matrice d'adjacence sont utilisés pour la génération des sorties.

Par conséquent, le jeu de données des niveaux de bathymétrie et le jeu de données des courants marins sont les mêmes que ceux utilisés dans la génération des matrices d'adjacence pondérées avec le simulateur. Au lieu d'utiliser un modèle de courant marin moyenné sur la durée de la mission planifiée, une date de début est donnée en entrée du simulateur afin d'avoir une réelle variation spatio-temporelle du courant influençant la trajectoire du planeur simulé. Cela

permet d'établir une prédiction des grandeurs d'intérêt telles que le niveau de la batterie, la durée de la mission et la distance parcourue par le planeur simulé qui soient le plus proches de la vérité terrain comme montré dans le chapitre précédent.

3.4.6 Seconde étape d'optimisation : profils de vol adaptatifs

La méthode de planification de trajectoire proposée génère une trajectoire optimisée pour chaque planeur de la flotte en minimisant l'une des trois grandeurs suivantes : la durée de la mission, la distance parcourue par le planeur ou la consommation d'énergie. Si l'optimisation du plan de mission a été réalisée par rapport à l'une des 2 premières, il reste possible, dans une deuxième étape, d'effectuer une optimisation locale de la consommation d'énergie cette fois-ci. Différents profils de vol doivent être prédéfinis pour la simulation de la trajectoire optimisée. Habituellement, lors des missions de pilotage de planeurs, les pilotes ont tendance à utiliser trois modes de pilotage différents : un mode lent pour économiser l'énergie, un mode normal qui correspond à la vitesse nominale et un mode rapide qui permet d'échapper aux forts courants marins.

L'optimisation locale de la consommation d'énergie est basée sur le lancement, pour chaque segment, d'autant de simulations que de profils de vol prédéfinis. On note que le profil de vol lent, qui est le plus économe, peut s'avérer plus énergivore sur un segment du fait d'un temps de parcours accru à cause de courants défavorables. Chaque simulation est réalisée avec un profil différent afin d'évaluer lequel est le plus intéressant en termes d'économie d'énergie pour le planeur simulé.

Dans notre cas, cela correspond au test de trois modes de pilotage différents pour chaque segment de la trajectoire optimisée en modifiant la vitesse verticale du planeur simulé ainsi que son angle de *pitch* et son nombre de "yos" (paramètre *sr*). Ensuite, le meilleur profil de vol est conservé avec sa position de surface et sa date d'arrivée afin de poursuivre les simulations pour le segment suivant.

Les différents profils de vol sont donnés en entrée de la méthode avec les vitesses verticales et les angles de *pitch* en fonction du mode de pilotage :

- Profil de vol lent : $V_z = 0.10 \text{ m/s}$, $pitch = 15^\circ$,
- Profil de vol normal : $V_z = 0.15 \text{ m/s}$, $pitch = 20^\circ$,
- Profil de vol rapide : $V_z = 0.25 \text{ m/s}$, $pitch = 30^\circ$.

Au cours de la simulation, la profondeur maximale commandée est modifiée en fonction des valeurs interpolées des niveaux de bathymétrie de l'ensemble des données afin de prendre en compte le profil du fond marin.

Le profil de vol adaptatif est également composé d'un nombre de "yos" sous l'eau qui dépend du niveau de bathymétrie. Les planeurs SeaExplorer sont généralement utilisés entre 0 et 1000 m de profondeur. Si cette immersion maximale n'est pas atteignable par le planeur, ce dernier parcourra une distance horizontale plus courte. C'est la raison pour laquelle les pilotes

de planeurs ont tendance à ajouter des “yos” afin de conserver approximativement la même distance horizontale parcourue entre deux remontées à la surface. Leur nombre dépend du niveau de bathymétrie disponible sous la position du planeur.

Par exemple, si le niveau de bathymétrie est de 500 m , au lieu de régler un seul “yo” de $0 - 1000\text{ m}$, les pilotes modifient le réglage pour un double “yo” de $0 - 500\text{ m}$ avec une immersion minimale (z_t) en fonction des besoins d’échantillonnage de la mission.

Afin d’automatiser cette prise de décision, un calcul adaptatif du paramètre de “multi-yos” (sr) a été implémenté dans la méthode : cela correspond à la division entière de 1000 m par le niveau de bathymétrie disponible à la position de surface du planeur simulé. Un exemple est présenté à la figure 3.8 avec un niveau de bathymétrie de 327 m . Dans cet exemple on montre que pour conserver la même distance parcourue horizontalement, le planeur doit effectuer 3 “yos”.

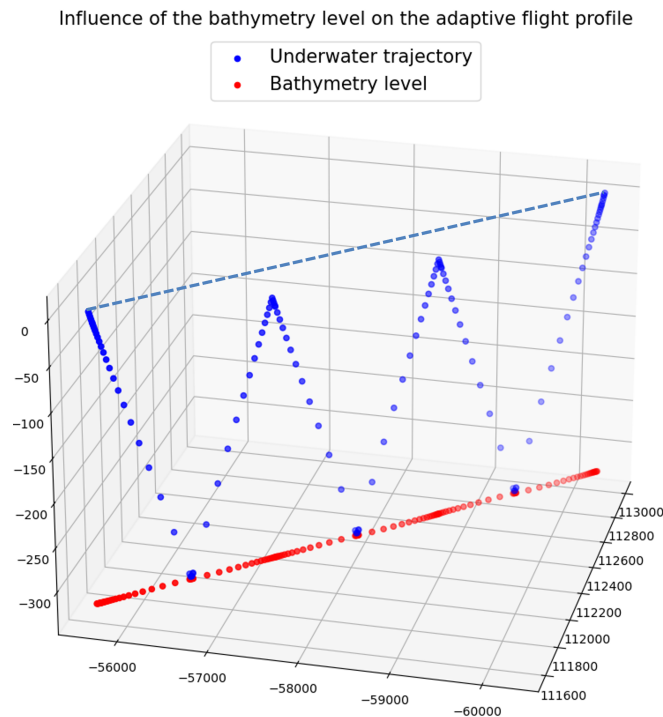


Figure 3.8 – Influence du niveau de bathymétrie sur le profil de vol adaptatif

Cette méthode génère une minimisation locale de la consommation d’énergie sur chaque segment du parcours en jouant sur la vitesse verticale, l’angle de *pitch* et le nombre de “yos” sous l’eau en fonction du niveau bathymétrique. Il génère un attribut “segment” optimisé qu’il est possible de jouer par la suite sur le simulateur de mission de planeurs sous-marins. Cette minimisation locale de l’énergie est utilisable en mode “en ligne”, c’est-à-dire pendant la mission (supervision). Un courant marin mis à jour le long des trajectoires de chaque planeur peut être utilisé afin d’adapter le profil de vol de la flotte.

3.4.7 Résumé de la méthodologie globale proposée

Les fonctions détaillées précédemment sont utilisées selon une méthodologie spécifique décrite dans la Fig. 3.9.

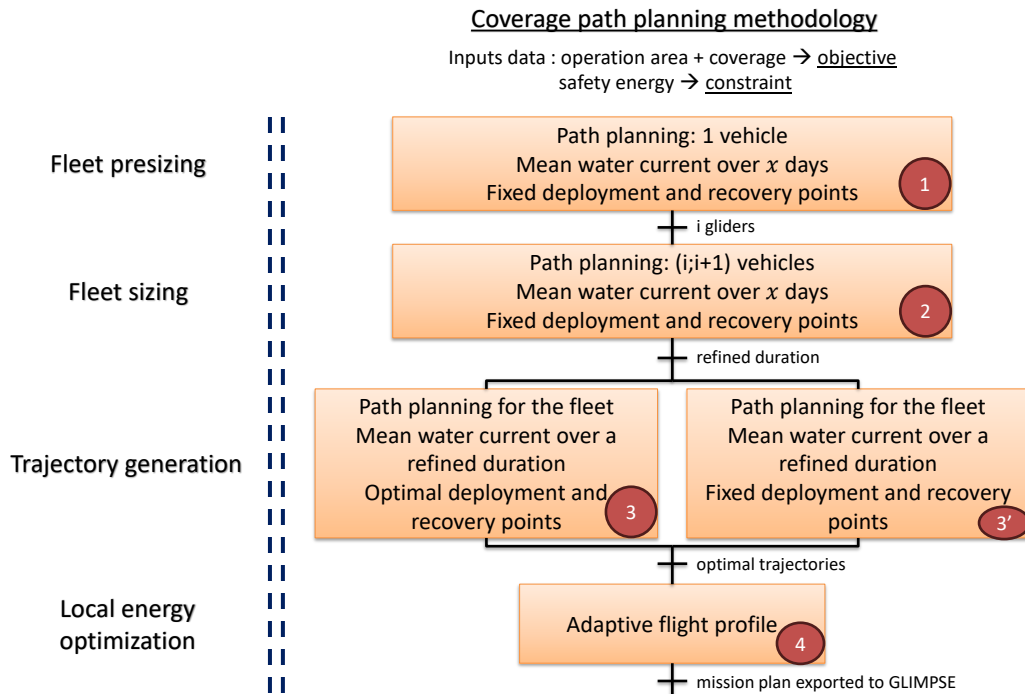


Figure 3.9 – Méthodologie de planification de trajectoire en couverture de zone

Cette méthodologie est utilisée dans la phase de préparation de mission pour définir la taille optimale de la flotte de planeurs sous-marins afin de couvrir la zone d’opération donnée en entrée du modèle. Pour établir le plan de mission de la flotte de planeurs dans une mission de couverture de zone, nous procédons selon les étapes suivantes.

La première étape de la Fig. 3.9 consiste à prédimensionner la flotte : une première trajectoire est générée pour un seul véhicule afin d’estimer le coût énergétique pour couvrir l’ensemble de la zone. Pour ce faire, un courant marin moyen sur la durée estimée x de la mission est utilisé pour la génération des matrices d’adjacence.

Cette durée dépend de la date de début de la mission et du modèle de courant marin utilisé. Parfois, le modèle de courant peut ne pas avoir autant de données de prévision disponibles. N’ayant pas de projection jusqu’à la date de début de mission envisagée, les données de courant des années précédentes sont utilisées sous réserve de la validation d’un océanographe. Si un seul planeur ne peut pas accomplir la mission par manque d’autonomie énergétique, alors le déficit énergétique de celui-ci (E) contribue à calculer le nombre entier minimal de planeurs (i) à utiliser pour couvrir toute la zone (en respectant la contrainte énergétique de 15% pour chaque planeur), soit $i > \left(\frac{|E|+15}{85}\right) + 1$. En utilisant i engins, il se peut que les marges de sécurité en termes d’énergie restante disponible ou de temps de parcours soient trop faibles.

C'est la raison pour laquelle on peut choisir de considérer $i + 1$ engins.

L'**étape 2** de la Fig. 3.9 consiste en la génération de trajectoires pour la flotte de i ou $i + 1$ planeurs. Cette génération utilise le même modèle de courant moyen avec la même durée supposée que celui utilisé à l'étape précédente. Cependant, la durée des missions obtenue grâce au test de ces trajectoires est utilisée pour calculer une durée affinée.

Les points de déploiement et de récupération optimaux peuvent être obtenus dans l'**étape 3** car le modèle de courant moyen sur la durée raffinée est utilisé et conduit à une génération de trajectoires améliorées. Si l'**étape 3'** est sélectionnée, les trajectoires sont générées entre les points de déploiement et de récupération fixés avec un modèle de courant moyen sur la durée affinée.

Une fois les trajectoires optimisées obtenues, une optimisation énergétique locale est possible en jouant sur le profil de vol à utiliser sur chaque segment des trajectoires obtenues (**étape 4**).

Enfin, le plan de mission correspondant à chaque planeur de la flotte est exporté vers le système de gestion de mission d'Alseamar "GLIMPSE" (GLider Mission Piloting SystEm [19]) afin de piloter la flotte de SeaExplorer.

3.4.8 Modules de supervision

Lors de la phase de supervision, l'algorithme veille au bon déroulement du plan de mission généré lors de la phase de planification en suivant les comportements des engins composant la flotte. Les trajectoires générées prennent en compte un courant moyen de la zone sur la durée de la mission prévue. Il est possible que la situation change en cours de mission, par conséquent il est nécessaire d'actualiser les données de courant utilisées et de régénérer des matrices d'adjacence et des trajectoires afin de prendre en compte la variabilité temporelle et spatiale du courant.

Si un engin n'arrive pas à atteindre un *waypoint*, il est possible de régénérer les trajectoires de la flotte en prenant en compte les cases déjà validées par les engins. Il suffit de les supprimer du graphe généré en planification de mission et générer des matrices d'adjacence et lancer des résolutions afin d'obtenir des trajectoires actualisées pour la flotte de planeurs.

Au cours de la mission, on peut également utiliser le simulateur afin de déterminer les dates de fin de mission de chaque engin. S'il y a trop de désynchronisation entre les engins, il est envisageable, en l'absence de contrainte énergétique à respecter, de jouer sur les profils de vol pour accélérer ou ralentir certains planeurs. Cette phase d'optimisation en cours de mission permettrait de respecter une date d'arrivée sur le *waypoint* final pour la flotte de planeurs.

3.5 Simulations numériques et discussion

Dans cette étude, nous considérons une zone d’opération située au large de la côte islandaise. Cette zone est très perturbée en termes de courants marins avec des zones de faible niveau bathymétrique. Une mission de couverture de zone est considérée sur une grille de 211 cellules démarrant le 25 octobre 2021. Les dimensions de la zone d’opération sont $201 \text{ km} \times 333 \text{ km}$ avec un espacement de 12.57 km entre les noeuds le long de l’axe longitudinal et 27.8 km entre les noeuds le long de l’axe latitudinal. Un courant marin moyen sur la durée de la mission est représenté par un champ de vecteurs en gris sur les figures. La longueur des vecteurs est proportionnelle à la norme du courant marin. L’énergie disponible du planeur simulé est également représentée sur les figures en utilisant une variation linéaire de la couleur entre le vert (100% de batterie) et le rouge (15% de batterie) puis la couleur noire est utilisée en dessous de 15% de batterie.

3.5.1 Génération de trajectoire dans le cas mono-engin

Trajectoire générée par un pilote

Tout d’abord, compte tenu de la zone d’opération à couvrir, un pilote a été chargé de préparer cette mission. Il devait définir un itinéraire optimal en termes de temps pour un planeur. Il pouvait commencer et terminer la mission où il le souhaitait. Pour ce faire, il avait accès à l’ensemble des données 4D des courants marins de la zone et aux niveaux de bathymétrie de cette dernière. Comme le montre la figure 3.10, il a décidé de choisir un nœud de départ (représenté par une étoile bleue) au Nord-Ouest de la zone et un nœud d’arrivée (représenté par une étoile rouge) au Sud-Est. Il a défini une trajectoire en boustrophédon pour le planeur avec un profil de vol normal.

Cette trajectoire a été jouée sur notre simulateur de mission de planeurs sous-marins avec la date de début de la simulation et le jeu de données 4D de courant marin [7] utilisé dans la phase de préparation de la mission par le pilote. Les grandeurs de sortie ont été générées en 483 secondes et peuvent être consultées au niveaux du tableau 3.2 page 99. Cette trajectoire générée par le pilote sera comparée à notre méthode dans le paragraphe suivant.

Optimisation sur la distance et le temps de parcours

Compte tenu des nœuds de départ et d’arrivée sélectionnés par le pilote, nous avons décidé d’utiliser notre méthode de planification de trajectoire de couverture afin d’obtenir une trajectoire optimisée en distance et une trajectoire optimisée en temps pour un seul planeur avec un profil de vol normal entre ces deux nœuds, mais en jouant sur les paramètres de la planification de trajectoire en couverture de zone. Le résultat donné au niveau de la Figure 3.11 a été obtenu avec une matrice d’adjacence générée à partir d’un **graphe complet** et en

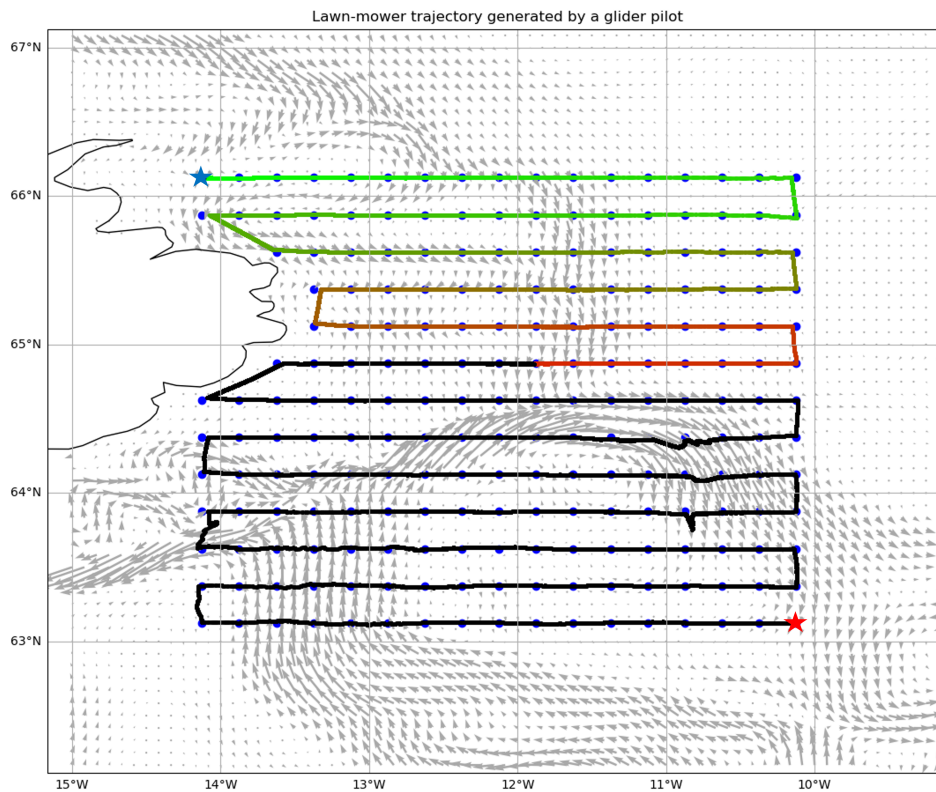


Figure 3.10 – Trajectoire en boustrophédon générée par un pilote de planeur

utilisant l'estimation de **coût en distance** afin de générer la matrice d'adjacence pondérée utilisée comme entrée de la résolution. Cette dernière a été conduite pendant 900 secondes, en utilisant l'heuristique "PATH_MOST_CONSTRAINED_ARC" et la métaheuristique "GUIDED_LOCAL_SEARCH". On note que le chemin trouvé est identique à celui du pilote. La deuxième trajectoire illustrée à la Fig. 3.12 a été obtenue avec une matrice d'adjacence générée avec le **voisinage N8** et en utilisant le **simulateur** comme modèle interne direct afin de générer la matrice d'adjacence **pondérée en temps** de parcours utilisée comme entrée de la résolution. Cette dernière a été conduite pendant 900 secondes en utilisant les mêmes heuristiques et métaheuristiques que pour la trajectoire précédente.

Les chemins obtenus ont été testés sur le simulateur avec les mêmes données d'entrée que la simulation du plan de mission décrite précédemment. Les mesures générées sont présentées dans le tableau 3.2.

La comparaison de notre méthode de planification de trajectoire en couverture de zone avec l'expertise d'un véritable pilote de planeur souligne la force de la méthode pour la préparation de la mission.

D'après le tableau 3.2, la trajectoire optimisée en temps générée par la méthode suggérée permet d'économiser environ 43 jours sur 144 jours de mission initialement planifiée avec les mêmes points de déploiement et de récupération que ceux fixés par le pilote. Ceci est dû à la complexité pour le pilote de définir une trajectoire qui prenne en compte les forts courants

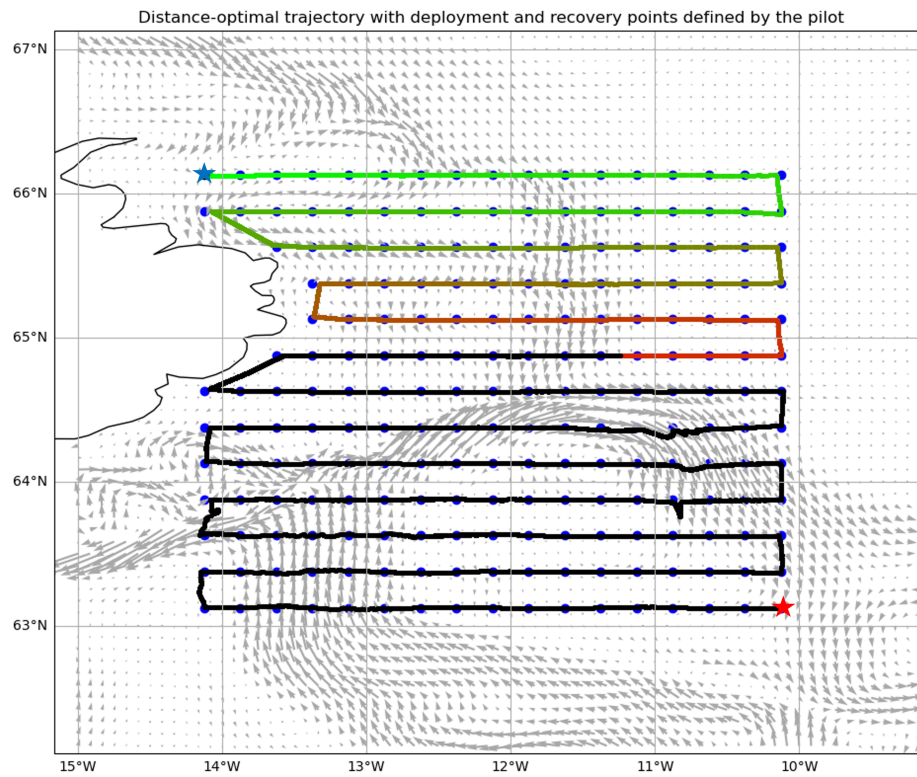


Figure 3.11 – Graphe complet + estimation de coût en distance

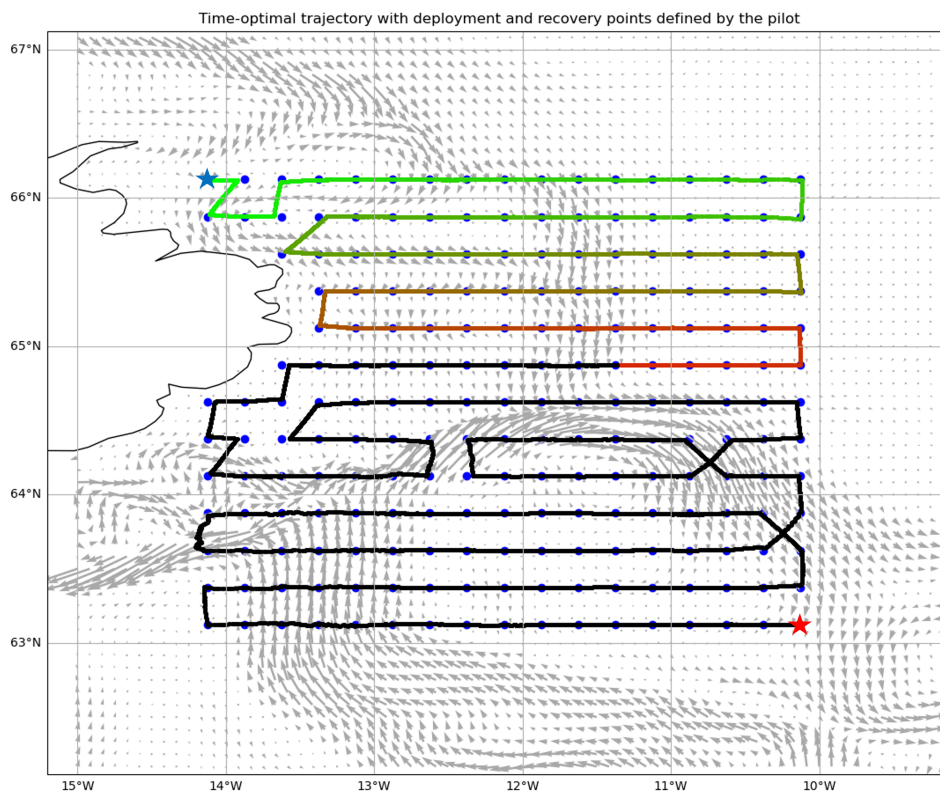


Figure 3.12 – N8 + simulateur

marins auxquels le planeur pourrait être confronté tout au long de sa trajectoire. La méthode a été conçue de manière à prendre en compte le courant directement par le biais de la matrice d'adjacence pondérée.

Il est également possible de remarquer que lorsque les distances entre les *waypoints* de la zone à couvrir sont utilisées pour remplir les matrices d'adjacence, la trajectoire obtenue est la même que la trajectoire en boustrophédon tracée par le pilote comme observé au niveau des figures 3.10 et 3.11 dans le cas mono-engin. Cela signifie qu'inconsciemment, la trajectoire la plus économique pour un pilote en terme de temps revient à trouver la trajectoire la plus courte en terme de distance. Nous allons montrer que ce n'est pas nécessairement le cas.

Comme le montre la figure 3.12, la trajectoire générée par l'algorithme suit souvent les vecteurs de courant. Si ce n'est pas le cas, la trajectoire est plus coûteuse localement, mais elle est finalement optimale au niveau global. En comparant la trajectoire générée par le pilote et la trajectoire optimisée en temps obtenue grâce à la méthode, on remarque que sur un total de 210 segments, environ 72% d'entre eux sont dans la même direction, 22% sont les mêmes mais dans la direction opposée et seulement 6% d'entre eux sont dans une direction totalement différente.

Optimisation des points de déploiement et de récupération

Précédemment, les nœuds de départ et d'arrivée étaient fixés par le pilote. Comme expliqué dans la section 3.4.4, l'algorithme peut également être utilisé pour déterminer les points de déploiement et de récupération optimaux dans la zone d'opération. Cette caractéristique de notre méthode a été utilisée dans le cas étudié avec un profil de vol normal. Le résultat est fourni à la figure 3.13.

Ce résultat a été obtenu avec une matrice d'adjacence générée avec un **voisinage N8** et en utilisant le **simulateur** comme modèle interne direct puis complété avec la méthode d'estimation du **coût en temps** afin d'obtenir une matrice d'adjacence sur un **graphe complet**.

Les mesures de sortie obtenues en simulation cet itinéraire sur le simulateur sont présentées dans le tableau 3.2 avec un temps d'exécution de 900 secondes en utilisant l'heuristique "PATH_MOST_CONSTRAINED_ARC" et la métaheuristique "GUIDED_LOCAL_SEARCH".

La prise en compte intelligente des courants marins permet à la méthode d'obtenir une trajectoire plus optimisée que celle d'un pilote. La trajectoire obtenue avec une génération optimale de points de déploiement et de récupération présentée sur la figure 3.13 permet d'économiser environ 46 jours de mission par rapport à la trajectoire du pilote. Bien que le déploiement du planeur simulé vers le centre de la zone et sa récupération au Nord-Est de la zone soient plus optimaux, cette solution n'est pas très pratique ou économique dans la plupart des cas opérationnels pour lesquels on préfère généralement des déploiements à proximité de la côte.

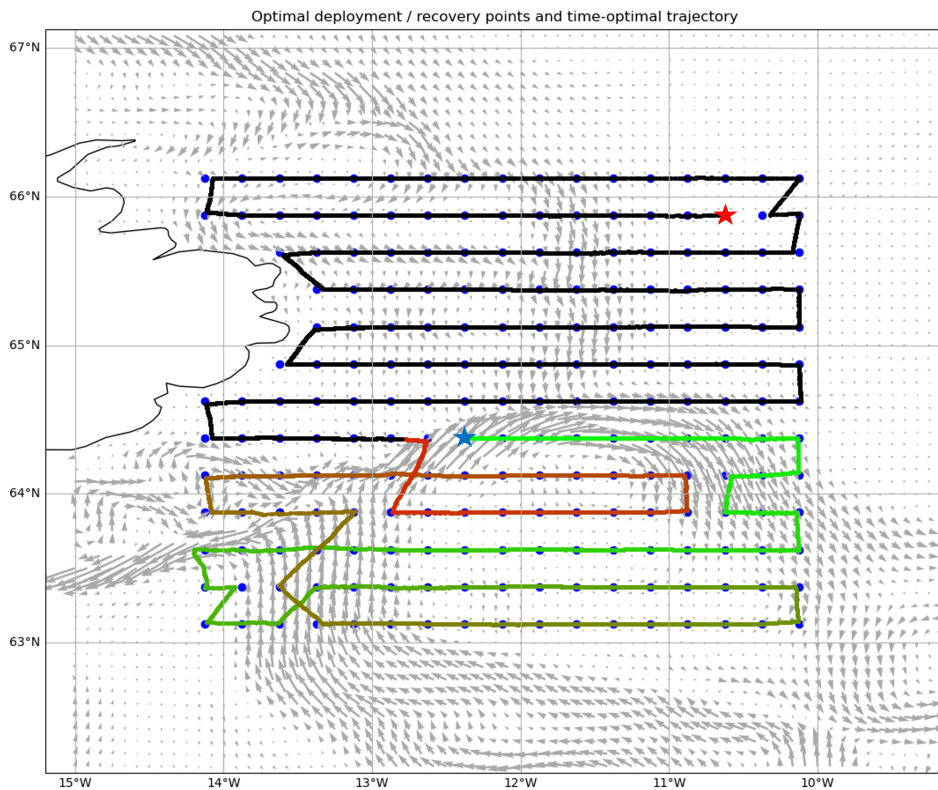


Figure 3.13 – N8 + simulateur + estimation de coût en temps

Génération d'un profil de vol adaptatif

Sur la base de cet itinéraire généré entre les points de déploiement et de récupération optimaux trouvés par la méthode, un profil de vol adaptatif a été généré sur la zone d'opération. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 3.14. Chaque profil de vol, sur un segment donné, est représenté par une couleur.

En jouant sur les différents modes de pilotage (vitesse verticale et angle de *pitch*) et sur le nombre de “yos” sous-marins en fonction des niveaux de bathymétrie, il a été possible de tester la liste des profils de vol générés sur le simulateur et d'obtenir les grandeurs d'intérêt correspondantes présentées dans le tableau 3.2.

En ce qui concerne la consommation d'énergie, il est possible que la génération d'un profil de vol adaptatif sur la trajectoire précédente illustrée sur la figure 3.13 permette d'économiser beaucoup d'énergie puisque la vitesse verticale, l'angle de *pitch* et le nombre de “yos” sous-marins du planeur sont ajustés sur chaque segment de la route. Sur la figure 3.14, plus le planeur se déplace avec le courant marin, plus l'utilisation de profils de vol lents ou normaux est efficace sur le plan énergétique. Cependant, sur certains segments, le planeur peut avoir besoin d'utiliser le profil de vol rapide pour traverser un courant plus fort. Ce profil de vol adaptatif permet d'économiser 37.63% en termes d'énergie disponible pour le planeur simulé, même si cela se fait au détriment de la durée de la mission qui est légèrement augmentée

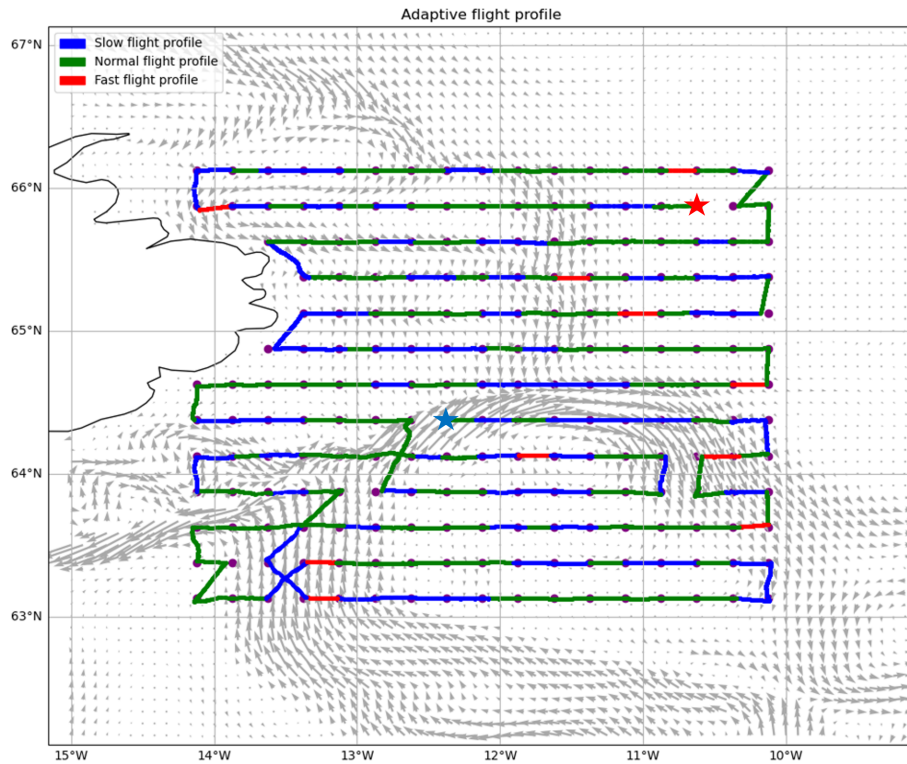


Figure 3.14 – Profil de vol adaptatif : minimisation de la consommation d’énergie

(environ 5 jours).

Grandeurs de sorties des simulations numériques

Le tableau 3.2 représente l’ensemble des résultats obtenus lors des simulations numériques dans le cas mono-moteur :

Méthodes	Durées de la mission simulée	Gains	Énergies disponibles
Trajectoire en boustrophédon définie par le pilote	144 jours, 12 heures, 24 minutes	N/A	-214.72%
Trajectoire optimisée en distance avec des points de déploiement et de récupération fixés par le pilote	144 jours, 12 heures, 24 minutes	N/A	-214.72%
Trajectoire optimisée en temps avec des points de déploiement et de récupération fixés par le pilote	101 jours, 6 heures, 36 minutes	-43 jours	-130.63%
Trajectoire optimisée en temps avec des points de déploiement et de récupération optimaux	98 jours, 16 heures, 18 minutes	-46 jours	-130.69%
Profil de vol adaptatif sur la trajectoire optimisée en temps avec des points optimaux	103 jours, 19 heures, 5 minutes	N/A	-93.06%

Tableau 3.2 – Comparaison des mesures dans le cas mono-moteur

Comme le montre ce tableau, toutes les trajectoires optimisées en temps générées avec notre méthode, bien qu’elles soient optimales, conduisent toutes à une énergie disponible négative pour le planeur simulé. Cela signifie que la zone d’opération est trop vaste pour être entièrement couverte par un seul planeur, une flotte de planeurs est donc nécessaire. Dans le cas d’une

flotte de planeurs, il est possible de tester une variété de configurations avec la méthode développée en jouant sur le nombre de véhicules, les profils de vol, etc.

3.5.2 Génération de trajectoire dans le cas multi-engins

Optimisation sur la distance et sur le temps pour une flotte de 3 et de 4 planeurs

Les résultats obtenus dans le cas mono-engin mettent clairement en évidence l'intérêt de notre méthode pour générer des trajectoires optimisées en mono-engin. Ils soulignent également la pertinence de la gestion de la flotte lorsque la zone d'opération est trop large pour être couverte par un seul véhicule à la vue des déficits énergétiques.

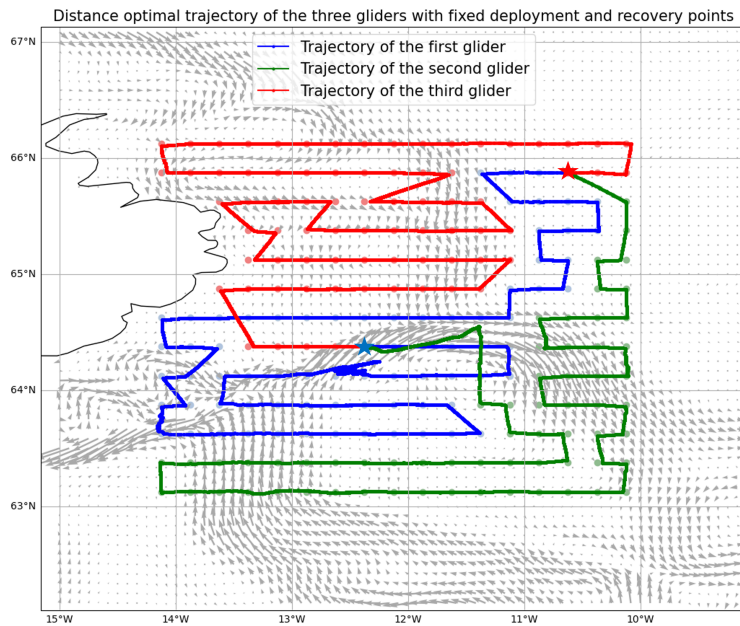
Dans cette optique, une trajectoire optimisée en distance et une trajectoire optimisée en temps ont été générées pour chaque véhicule composant une flotte de 3 et 4 véhicules avec un profil de vol normal à l'aide de notre méthode de planification de trajectoire. Les points optimaux de déploiement et de récupération générés pour le cas mono-engin ont été pris comme points de départ et d'arrivée fixes de la flotte de 3 planeurs dont les trajectoires sont illustrées à la figure 3.15. Le problème est maintenant trop difficile pour être résolu par un pilote de planeur et ne peut plus être comparé à une expérience pilote.

Pour la flotte de 4 planeurs, un nœud de départ et un nœud d'arrivée ont été fixés près de la côte, ce qui est plus réaliste dans le contexte d'une mission de planeur pour des raisons économiques évidentes. Les trajectoires correspondantes sont représentées sur la Fig. 3.16.

Les mesures de sortie des trajectoires optimisées en temps présentées dans le tableau 3.3 page 103 ont été obtenues avec une matrice d'adjacence générée avec un **voisinage 8** et en utilisant le **simulateur** comme modèle interne direct complété avec la méthode d'estimation du **coût en temps** afin d'obtenir une matrice d'adjacence sur un **graphe complet**. Les mesures de sortie des trajectoires optimisées en distance ont été obtenues avec une matrice d'adjacence générée à partir d'un **graphe complet** et en utilisant l'estimation de **coût en distance**.

Ces grandeurs d'intérêt sont les résultats du test des trajectoires obtenus pour chaque planeur composant les flottes sur le simulateur. Les routes ont été générées en 2400 secondes en utilisant l'heuristique "PATH_CHEAPEST_ARC" et la métaheuristique "GUIDED_LOCAL_SEARCH".

Comme le problème est trop difficile à résoudre par un pilote de planeur, la distance entre les *waypoints* a été utilisée pour remplir les matrices d'adjacence afin d'obtenir des trajectoires optimisées en distance pour une flotte de trois planeurs comme illustré sur la Fig. 3.15 (a) et pour une flotte de quatre planeurs comme le montre la Fig. 3.16 (a). Les trajectoires obtenues sont plus affectées par le courant marin. Les mesures de sortie présentées au niveau du tableau 3.3 montrent clairement que ne pas prendre en compte le courant lors de la génération des matrices peut conduire à des trajectoires plus coûteuses en temps. Sans tenir compte du courant, il est également possible qu'un des véhicules de la flotte de planeurs termine sa mission dans un état critique, comme le montrent les niveaux d'énergie inférieurs à 15% des



(a) Graphe complet + estimation du coût en distance



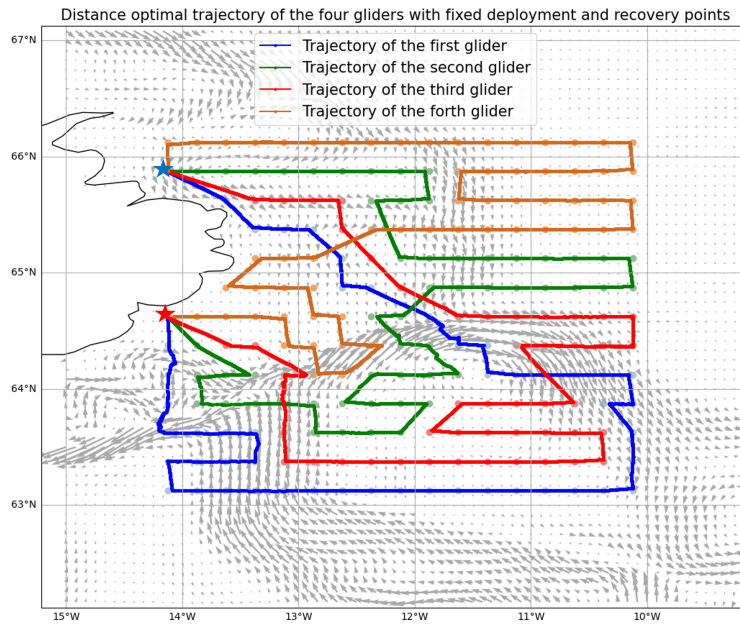
(b) N8 + simulateur + estimation du coût en temps

Figure 3.15 – Trajectoire de la flotte de 3 planeurs

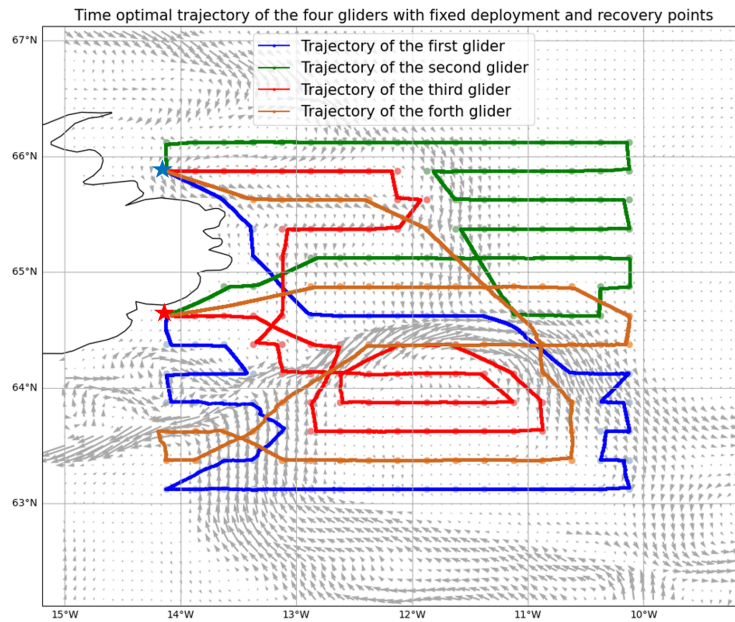
véhicules 1, 2 et 3 (pour la flotte de trois planeurs) et du véhicule 4 pour la flotte de quatre planeurs.

Génération d'un profil de vol adaptatif pour les flottes de 3 et 4 planeurs

En jouant sur les différents modes de pilotage et sur le nombre de “yos” sous-marins (paramètre *sr* 1.3.1) en fonction des niveaux de bathymétrie pour chaque planeur des flottes de 3 et 4 planeurs, il a été possible de tester les listes de profils de vol générées sur le simulateur.



(a) Graphe complet + estimation du coût en distance



(b) N8 + simulateur + estimation du coût en temps

Figure 3.16 – Trajectoire de la flotte de 4 planeurs

Les paramètres de sortie de ces tests sont présentés dans le tableau 3.3.

En s'appuyant sur les résultats du cas mono-engine, la meilleure trajectoire en termes d'énergie disponible avec -93.06% d'énergie laisse supposer que 3 planeurs pourraient suffire pour couvrir l'ensemble de la zone. Ceci est illustré dans le tableau 3.3, en utilisant un profil de vol adaptatif sur les trajectoires optimisées en temps générées pour les mêmes points optimaux de déploiement et de récupération que ceux obtenus dans le cas mono-engine. Il en résulte un plan de mission réalisable pour les trois planeurs de la flotte afin de couvrir l'ensemble de

la zone (la contrainte des 15% d'énergie disponible est bien évitée). Cela souligne l'utilité de notre méthode comme outil pour définir précisément la taille de la flotte nécessaire pour couvrir la zone d'opération.

Comme dans cette configuration un des engins de la flotte de 3 planeurs termine sa mission avec 15.64% d'énergie et pour anticiper tout risque au cours de la mission comme la perte d'un planeur, il pourrait être préférable d'utiliser 4 planeurs. Avec le plan de mission optimisé en temps généré par la méthode, chaque véhicule de la flotte de 4 planeurs arrive au point de récupération près de la côte à peu près en même temps et prend entre 31 et 33 jours pour compléter sa trajectoire générée. Ce plan de mission réduit considérablement la durée de la mission de couverture de la zone d'opération par rapport au cas mono-engin et offre d'avantage de marge de sécurité par rapport à l'utilisation d'une flotte de 3 planeurs. Comme dans le cas mono-engin, l'utilisation d'un profil de vol adaptatif permet de réaliser un gain d'autonomie énergétique sur chaque véhicule de l'ordre de 10% mais au détriment de l'optimalité temporelle initialement trouvée.

Grandeurs de sorties des simulations numériques

Le tableau 3.3 synthétise l'ensemble des résultats obtenus lors des simulations numériques dans le cas multi-engins :

Méthode	Engins	Durées de la mission simulée	Énergies disponibles	Gains
Trajectoires optimisées en distance des 3 planeurs avec les points de déploiement et de récupération optimaux obtenus dans le cas mono-engin	Engin 1	64 jours, 8 heures, 36 minutes	-37.51%	N/A
	Engin 2	48 jours, 4 heures, 20 minutes	14.16%	N/A
	Engin 3	41 jours, 17 heures, 15 minutes	-19.65%	N/A
Trajectoires optimisées en temps des 3 planeurs avec les points de déploiement et de récupération optimaux obtenus dans le cas mono-engin	Engin 1	42 jours, 17 heures, 18 minutes	-5.38%	N/A
	Engin 2	41 jours, 5 heures, 2 minutes	18.59%	N/A
	Engin 3	40 jours, 23 heures, 9 minutes	0.65%	N/A
Deuxième étape : Profil de vol adaptatif sur les trajectoires des 3 planeurs	Engin 1	43 jours, 0 heures, 25 minutes	18.92%	+24.3%
	Engin 2	42 jours, 22 heures, 2 minutes	30.35%	+11.76%
	Engin 3	41 jours, 16 heures, 15 minutes	15.64%	+14.99%
Trajectoires optimisées en distance des 4 planeurs avec des points de déploiement et de récupération près de la côte	Engin 1	31 jours, 22 heures, 44 minutes	22.23%	N/A
	Engin 2	33 jours, 19 heures, 3 minutes	18.79%	N/A
	Engin 3	32 jours, 10 heures, 34 minutes	25.10%	N/A
	Engin 4	40 jours, 0 heures, 15 minutes	0.40%	N/A
Trajectoires optimisées en temps des 4 planeurs avec des points de déploiement et de récupération près de la côte	Engin 1	31 jours, 1 heures, 55 minutes	18.28%	N/A
	Engin 2	31 jours, 4 heures, 12 minutes	27.84%	N/A
	Engin 3	32 jours, 10 heures, 12 minutes	18.52%	N/A
	Engin 4	33 jours, 21 heures, 19 minutes	26.48%	N/A
Deuxième étape : Profil de vol adaptatif sur les trajectoires des 4 planeurs	Engin 1	35 jours, 14 heures, 18 minutes	28.85%	+10.57%
	Engin 2	33 jours, 12 heures, 8 minutes	36.46%	+8.62%
	Engin 3	34 jours, 12 heures, 51 minutes	32.58%	+14.06%
	Engin 4	34 jours, 13 heures, 50 minutes	39.57%	+13.09%

Tableau 3.3 – Comparaison des mesures dans le cas multi-engins

Comparaison entre données de courant 4D et 3D

Enfin, les trajectoires optimisées en temps des quatre planeurs avec un point de déploiement et un point de récupération près de la côte ont été jouées sur un modèle de courant moyenné sur 32 jours au lieu d'utiliser un jeu de données de courant en 4D. Ces trajectoires ont été

simulées afin de montrer l’impact de la variabilité spatio-temporelle du milieu marin. Les mesures de sortie sont présentées dans le tableau 3.4.

Méthodes	Engin	Durée de la mission simulée	Énergie disponible
Trajectoires optimisées en temps des 4 planeurs jouées sur un courant 4D	Engin 1	31 jours, 1 heures, 55 minutes	18.28%
	Engin 2	31 jours, 4 heures, 12 minutes	27.84%
	Engin 3	32 jours, 10 heures, 12 minutes	18.52%
	Engin 4	33 jours, 21 heures, 19 minutes	26.48%
Trajectoires optimisées en temps des 4 planeurs jouées sur un courant 3D	Engin 1	30 jours, 19 heures, 39 minutes	20.91%
	Engin 2	31 jours, 20 heures, 53 minutes	24.11%
	Engin 3	32 jours, 7 heures, 9 minutes	17.02%
	Engin 4	32 jours, 18 heures, 19 minutes	27.90%

Tableau 3.4 – Comparaison des mesures entre les trajectoires simulées sur un jeu de données de courants 4D et 3D

La comparaison entre les trajectoires des quatre planeurs simulés sur un jeu de données de courant 4D et 3D illustre que l’approximation qui consiste à utiliser un courant 3D (moyenné sur le temps) pour générer les matrices d’adjacence pondérées est valide en raison des similitudes entre les mesures de sortie présentées dans le tableau 3.4. Toutefois cette approximation est valide du fait de l’absence de forte variabilité spatio-temporelle du courant marin de la zone d’opération sur cet exemple.

En cas d’important changement climatique durant la mission, il serait alors important de modifier le plan de mission initialement établie : rôle de la méthode de supervision (mode en ligne). Une des possibilités réside en le déclenchement d’une alerte dans le cas d’une dérive de planeur (un planeur de la flotte n’arrive pas à valider son *waypoint* ciblé) ou les conditions climatiques réelles s’éloignent trop du modèle de courant utilisé. Pour contrer ça, il est possible de mettre à jour le modèle de courant marin utilisé quotidiennement dès que les données de prévision sont disponibles afin de régénérer une trajectoire optimisée pour la flotte de planeurs compte tenu des waypoints déjà visités.

Enfin, sur un processeur Intel(R) Core(TM) i7-9750H, 16 GB de RAM, 5 minutes ont été nécessaire pour simuler la trajectoire complète d’un planeur, et environ 10 minutes pour le plan de mission de 4 planeurs. Le temps de calcul global (temps d’exécution de la résolution plus la simulation de la mission générée) s’élève au maximum à 50 minutes, ce qui est bien inférieur à la durée entre deux surfaçages d’un planeur SeaExplorer (environ 3 heures) nous laissant le temps de replanifier la mission pour la flotte de planeurs.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle méthode dédiée à la planification de trajectoire en couverture de zone pour les flottes de planeurs sous-marins. Cette méthode est basée sur la théorie des graphes et sur le simulateur de missions de planeurs sous-marins développé pour les planeurs SeaExplorer. Ce dernier prend en considération un environnement

variable en 4D et les niveaux de bathymétrie de la zone à couvrir, ce qui en fait l'outil idéal pour calculer les poids des arêtes du graphe qui permettent de remplir la matrice d'adjacence. Le simulateur peut également s'utiliser afin de valider le plan de mission généré par notre méthode de planification de trajectoire (en couverture de zone).

En combinant les données d'entrée de la zone d'opération, la définition des matrices d'adjacence, leur version pondérée et la résolution basée sur un solveur générique, la méthode suggérée produit automatiquement une trajectoire optimisée pour chaque véhicule de la flotte dans la zone à couvrir sachant que cette dernière peut contenir des zones d'exclusion telles que des côtes ou des zones interdites à la navigation.

Les trajectoires générées s'avèrent beaucoup plus pertinentes que celles fournies par les pilotes de planeurs. Il est également possible de calculer les points de déploiement et de récupération optimaux sur cette zone. Enfin, dans un second temps, après la génération de ces trajectoires optimisées, un profil de vol adaptatif peut être obtenu. Cette méthode permet de générer une liste optimale de profils de vol à utiliser sur chaque segment parcouru par chaque planeur afin d'optimiser localement la consommation d'énergie durant leur mission. De nombreuses configurations sont testées sur la méthode afin de définir précisément la taille de la flotte de planeurs.

La méthode développée dans le cadre de cette thèse pour des planeurs SeaExplorer pourrait très bien s'appliquer à des AUV. Cela permettrait alors d'optimiser leur durée de mission, car certains de ces engins peuvent également être sensibles aux forts courants dans le cadre de leurs missions de cartographie des fonds marins.

Le chapitre suivant présente les résultats d'une expérimentation réelle menée en s'appuyant sur l'approche proposée pour établir le plan de mission suivi par quatre planeurs SeaExplorer. Ce chapitre montera l'intérêt de la méthode suggérée, que cela soit en terme de dimensionnement de la flotte, de construction des trajectoires ou encore de suivi des grandeurs d'intérêt en fonction du temps.

Chapitre 4

Validation expérimentale en mission réelle

Une mission réelle pour l'élaboration d'un modèle de propagation acoustique a eu lieu du 10 au 21 juillet 2023 au large de La Londe-les-Maures (83) en Méditerranée. Elle a nécessité la réalisation d'une couverture de la zone désirée avec une flotte de planeurs équipés d'un capteur GPCTD (*Glider Payload Conductivity Temperature Depth*) pour recueillir des données de température, conductivité et profondeur. Cette mission a été l'occasion de tester en conditions réelles la méthode développée dans le cadre de la préparation et de la conduite de mission. Ainsi nous avons dimensionné la taille de la flotte avant d'établir les routes optimisées au regard de la durée totale de la mission tout en prenant en compte le courant prédit et un objectif de retour quasi-simultané de tous les engins en un point unique de déploiement/récupération préalablement choisi. A titre expérimental, il a été décidé d'inclure une zone d'exclusion rectangulaire dans laquelle la navigation des planeurs est bannie.

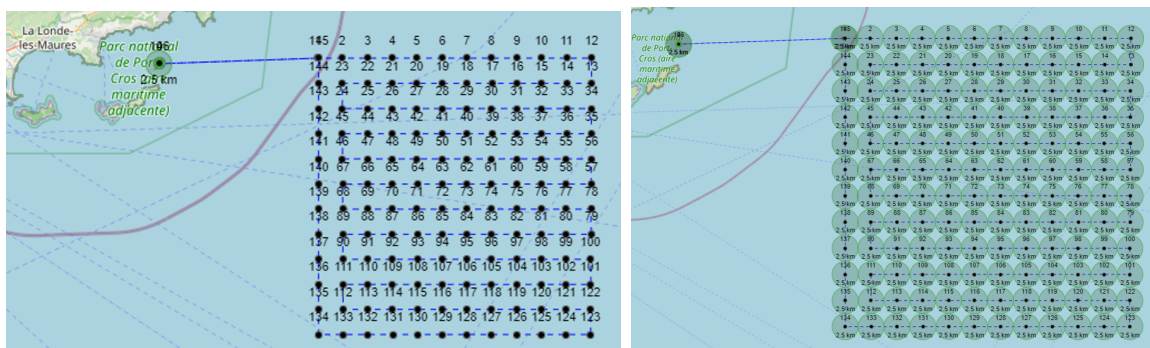
La zone à couvrir fait 55 km de côté et représente un volume de 2800 km³ qui a été exploré en 7 jours par 4 planeurs en complète autonomie (e.g. pas la moindre intervention d'un pilote de glider durant la totalité de la mission). Les trajectoires générées ont été suivies par les engins et ont permis d'éviter une zone interdite à la navigation, d'éviter des sorties de zone et du sur-échantillonnage (plusieurs passage par les même point d'une grille).

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue la phase de préparation de la mission au travers du choix de la zone d'opération. L'utilisation du simulateur et de notre méthode de génération de trajectoire a ensuite permis de générer un plan de mission pour la flotte des 4 planeurs impliqués. La préparation des quatre planeurs SeaExplorer ainsi que leur déploiement sur zone seront également présentés. Enfin, les résultats de la mission seront mis en évidence au travers de la comparaison entre la simulation et la mission réelle. Les perspectives d'améliorations de la méthode seront ensuite discutées.

4.1 Choix et présentation de la zone d’opération

La phase de préparation de mission consiste tout d’abord à définir la zone d’opération dans laquelle les engins pourront évoluer à concurrence de leur 12 jours de disponibilité. Pour des raisons de logistique et de sécurité, le déploiement des engins a été fixé au large de La Londe-les-Maures en Méditerranée (Var, France). L’équipe “mer” d’Alseamar, composée de techniciens de haut niveau qui sont également pilotes de SeaExplorer, a pour objectif de préparer les planeurs sous-marins pour leurs missions opérationnelles et de déployer les engins en mer. Lors de la fin du processus de production d’un SeaExplorer, des tests d’acceptation en usine (*Factory Acceptance Test - FAT*) sont réalisés. Cette étape sert à vérifier que l’équipement fonctionne correctement selon les spécifications de conception. Les engins testés sont généralement déployés en mer Méditerranée par l’équipe “mer”.

Une première simulation nous a permis de montrer que la zone choisie pouvait être couverte par 3 engins pendant 12 jours. Pour des raisons de sécurité calendaires, il a été décidé d’accorder la possibilité d’étendre la flotte à 4 planeurs de sorte à réduire la durée totale de la mission. La zone est quadrillée avec des distances entre *waypoints* voisins (au sens du voisinage 4) de 5 km (voir Fig. 4.1). Chaque case ainsi représentée ne doit être visitée qu’une seule fois et cela sera effectif dès lors qu’un engin passera dans son rayon de validation que nous avons choisi de fixer à 2.5 km dans cette mission.



(a) Localisation de la zone

(b) Grille à couvrir

Figure 4.1 – Zone d’opération se trouvant à l’Est du point de déploiement

Pour pouvoir simuler la mission, un modèle de courant 4D en mer Méditerranée [9] ainsi que les niveaux bathymétriques associés ont été utilisés. Ce modèle de courant permet d’avoir accès, sur toute la colonne d’eau, à la composante Est et Nord du courant moyenné sur une journée. Ces données sont disponibles depuis le 01/11/2020 jusqu’à nos jours avec 9 jours de prévisions. Dans un premier temps nous avons supposé que le planeur simulé suivait un profil de vol normal (i.e. $V_z = 0.15 \text{ m/s}$, $pitch = 20^\circ$) et qu’il embarquait un seul capteur à savoir une GPTCD sur un simple parcours en boustrophédon sur la zone envisagée à l’Est du point de déploiement.

La trajectoire simulée est présentée au niveau de la Fig. 4.2. Pour chaque date, un vecteur

moyen du courant sur la colonne d'eau en fonction d'une profondeur maximale ciblée est calculé comme détaillé dans la section 3.4.3. Pour toutes les dates disponibles sur le jeu de données de courant, un courant moyen est calculé en moyennant les informations de courant pour toutes les positions géographiques et niveaux d'immersions disponibles. Ce courant moyen sur toute la durée de la mission est représenté par des vecteurs qui sont tracés en gris et superposés à nos figures. La zone sélectionnée à l'Est du point de déploiement situé

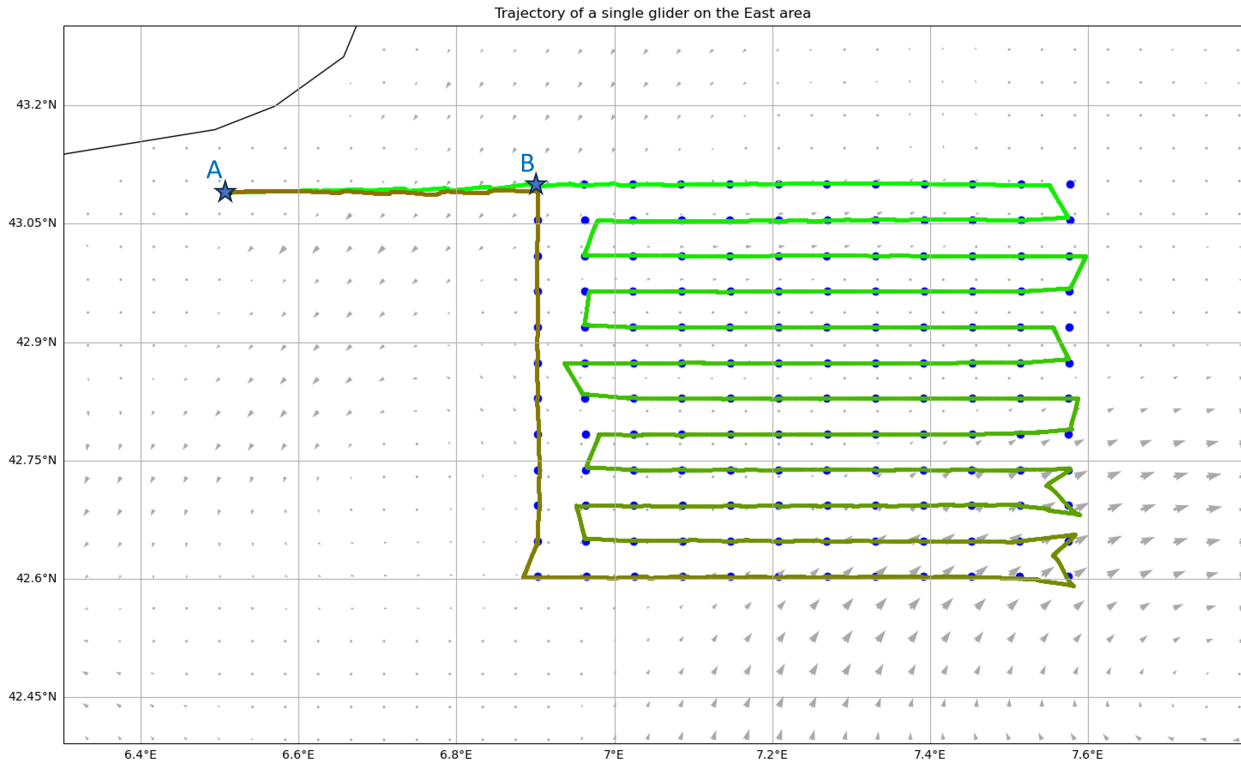


Figure 4.2 – Simulation de la trajectoire à l'Est

entre Cavalaire-sur-Mer et l'île du Levant présente une variabilité de courant intéressante pour évaluer la pertinence de notre méthode (voir Fig. 4.2) car elle est sujette au courant liguro-provençal perturbant le Nord-Ouest de cette dernière et comporte également des “gyres” (tourbillons résultant de la convergence de plusieurs courants marins [108]). La figure 4.3 confirme la présence de ces courants sur l'année 2022 de par le calcul d'un courant moyen pondéré sur la colonne d'eau (jusqu'à 1000m de profondeur) sur les dates prévues de la mission en mer : du 10 au 21 juillet.

Afin d'analyser la variabilité temporelle et spatiale du courant, et ses potentiels impacts sur la mission, d'autres simulations ont été conduites sur la zone sélectionnée avec le même parcours en boustrophédon mais sur des données de courant marin correspondant à différentes dates de début de mission. Les résultats de ces tests se trouvent dans le tableau 4.1.

Bien que les phénomènes océaniques évoluent dans le temps en termes de localisation et d'amplitude, on constate que leur présence est assez prévisible et que par ailleurs, la variabilité de leur caractéristiques n'impactent que modérément sur une mission de couverture de zone

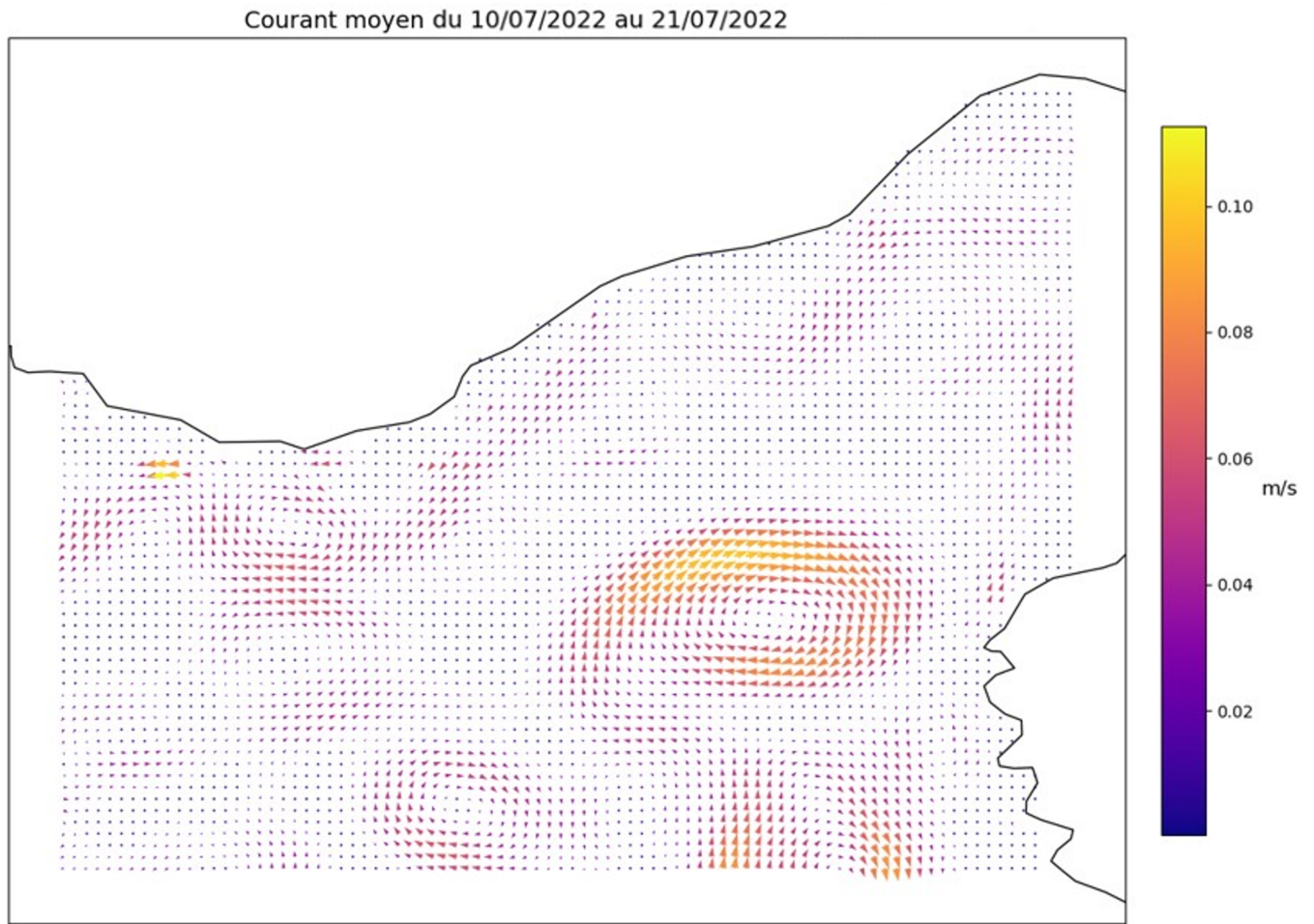


Figure 4.3 – Courant moyen pondéré

Périodes	Durées de la mission simulée
Juillet 2022	28 jours, 15 heures, 28 minutes
Mai 2022	28 jours, 0 heure, 14 minutes
Avril 2022	27 jours, 16 heures, 37 minutes
Janvier 2022	29 jours, 1 heures, 6 minutes
Octobre 2021	27 jours, 19 heures, 44 minutes
Juillet 2021	27 jours, 15 heures, 31 minutes

Tableau 4.1 – Influences saisonnières sur la durée de mission

définie de façon naïve par un boustrophédon.

De plus, pour vérifier la pertinence d'éditer une route à partir des données de courant prédites sur l'horizon de cette mission (9 jours), nous avons comparé le temps de parcours entre chaque *waypoint* avec le courant défini en 4D et le courant défini en 3D (données 4D moyennées sur 9 jours).

Pour cela nous avons calculé le coefficient de corrélation de Pearson qui examine la relation de ressemblance entre deux variables statistiques et détermine l'influence de l'une sur l'autre. Cette relation est donnée par l'équation (4.1) :

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4.1)$$

avec *cov* la covariance, σ_X (resp. σ_Y) l'écart-type des temps mis pour valider les *waypoints* en utilisant un courant 4D (resp. courant 3D sur la durée de la mission prévue). Nous avons obtenu un coefficient de Pearson de 0.93, ce qui indique une forte relation linéaire positive entre les deux populations et donc une faible variabilité temporelle du courant sur la durée de la mission. Ainsi, il est raisonnable et pertinent de considérer les prédictions à l'horizon de la mission et de moyenner les données de courant sur les colonnes d'eau pour calculer les poids des matrices d'adjacence.

4.2 Planification des trajectoires en amont de mission

4.2.1 Mission à 3 planeurs

Nous allons maintenant utiliser notre méthode de génération de trajectoire détaillée dans le chapitre précédent afin de générer un plan de mission optimisé en temps pour la flotte sur la durée de la mission prévue. Avant cela, il est important de noter que, pour cette mission, les pilotes de SeaExplorer ont décidé que la flotte de planeurs devrait rallier le Nord-Ouest de la zone (Point B) après avoir été déployée afin d'éviter tout risque d'alarme ou de perte d'un engin (cf. Fig. 4.2).

La flotte devra ensuite couvrir la grille générée avant de revenir au point d'entrée sur zone au Nord-Ouest (point B) pour enfin rejoindre le point de récupération (Point A, identique au point de déploiement). Cette décision implique que les trajectoires générées avec notre méthode doivent correspondre à un cycle démarrant au Nord-Ouest de la zone. Ces trajectoires doivent permettre aux engins de couvrir l'ensemble de la grille avant de revenir au Nord-Ouest sachant qu'il faut à peu près 1 jour de mission pour un planeur pour aller du point de déploiement A au point d'entrée sur zone B. Il est nécessaire que la mission ne dépasse pas les 12 jours prévus par conséquent les trajectoires doivent garantir une optimisation du temps de parcours tout en faisant en sorte d'avoir un retour plus ou moins synchronisé de la flotte au point de récupération pour faciliter la récupération des engins par l'équipe "mer".

Notre méthode de génération de trajectoire a donc été utilisée une première fois avec les données de 2022 correspondant à la même période que la mission prévue afin d’avoir une idée de la faisabilité de la mission avec une flotte de planeur. L’objectif final est de générer les trajectoires pour la flotte la veille du déploiement avec les 9 jours de prévision sur les données de courant disponibles sur le jeu de données utilisé [9].

Le résultat fourni au niveau de la figure 4.4 a été obtenu à partir d’une matrice d’adjacence générée depuis un graphe complet et en utilisant l’estimation de coût en temps avec un profil de vol normal. Le courant marin moyen sur la durée de la mission en 2022 est représenté par un champ de vecteurs en gris sur la figure. Le tableau 4.2 présente les principales grandeurs d’intérêt de cette mission simulée qui sont les résultats du test des trajectoires obtenues pour chaque planeur composant la flotte. Une “mesure de la synchronisation” des planeurs a été mise en place dans le tableau, elle consiste au calcul de l’écart entre la date d’arrivée du premier et du dernier engin au point de récupération.

Les routes ont été générées en 2400 secondes en utilisant l’heuristique “PATH_CHEAPEST_ARC” et la métaheuristique “GUIDED_LOCAL_SEARCH” avec des points de départ et d’arrivée sur zone fixés au Nord-Ouest de la grille. L’optimisation des trajectoires est réalisée sur la grille d’opération à couvrir mais pour la simulation, le trajet de la flotte du point de déploiement au point d’entrée sur zone ainsi que le trajet de la flotte du point d’entrée sur zone jusqu’au point de récupération une fois la grille couverte sont simulés afin d’avoir une estimation de durée de mission la plus réaliste possible. Les trajectoires obtenues permettent de respecter la contrainte temporelle des 12 jours de mission en mer avec un ralliement au point de récupération quasi simultané.

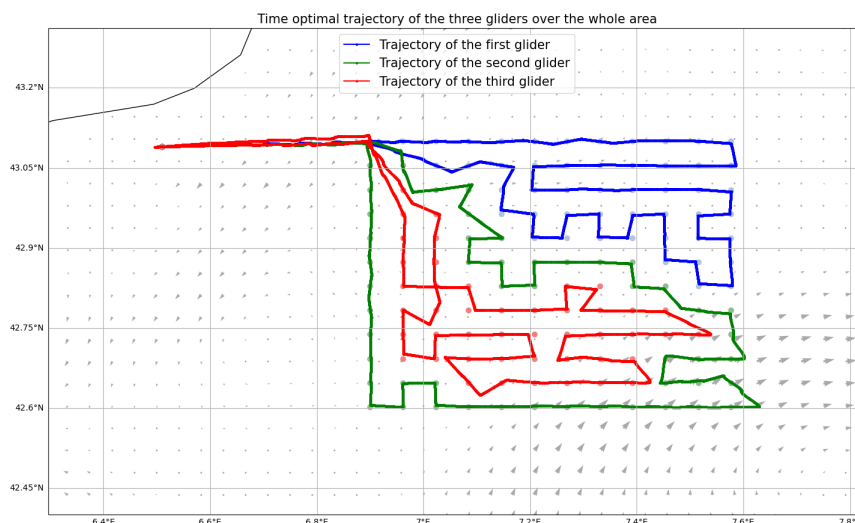


Figure 4.4 – Trajectoires des 3 planeurs sur toute la zone

Afin de comparer ces trajectoires, une trajectoire en boustrophédon a été générée pour chaque planeur de la flotte pour mettre en évidence l’apport de notre méthode. Les résultats de cette

simulation de trajectoire sont donnés au niveau de la figure 4.5 et les mesures de sortie sont disponibles dans le tableau 4.2. On peut voir que l'utilisation de boustrophédons avec un profil de vol normal comme le ferait classiquement un pilote de planeur n'est pas applicable dans notre cas au vue des durées de mission simulées qui dépassent la contrainte des 12 jours de mission en mer en plus de perdre une arrivée sur zone quasi-simultanée à l'échelle du planeur (16h avec notre méthode contre environ 3 jours d'écart avec des boustrophédons). De plus, on peut voir que les trajectoires sont très sensibles au courant de part leurs déviations à l'Est de la zone d'opération.

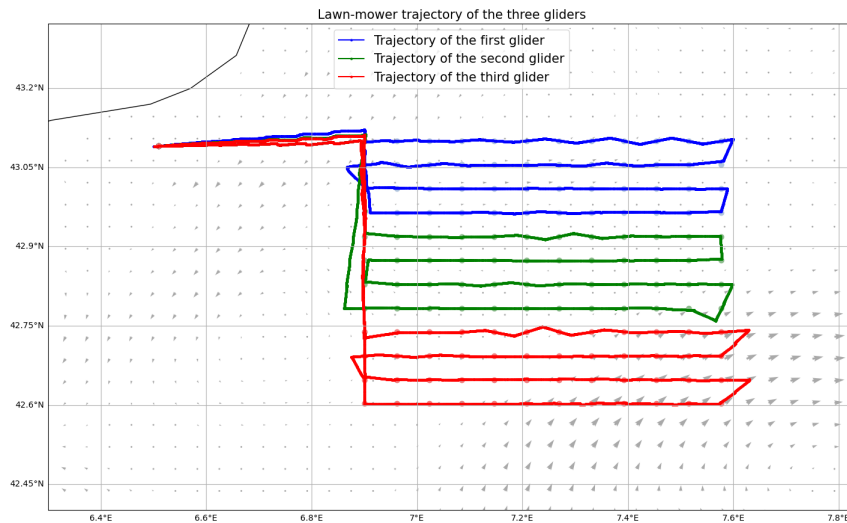


Figure 4.5 – Boustrophédons des 3 planeurs sur toute la zone

Méthode	Engins	Durées de la mission simulée	Énergies disponibles	Synchronisation
Trajectoires optimisées en temps des 3 planeurs sur toute la zone d'opération	Engin 1	10 jours, 16 heures, 29 minutes	77.74%	15 heures, 54 minutes
	Engin 2	11 jours, 4 heures, 36 minutes	76.72%	
	Engin 3	11 jours, 8 heures, 25 minutes	76.39%	
Boustrophédons des 3 planeurs sur toute la zone d'opération	Engin 1	10 jours, 20 heures, 59 minutes	77.37%	3 jours, 11 heures, 46 minutes
	Engin 2	12 jours, 7 heures, 16 minutes	74.42%	
	Engin 3	14 jours, 8 heures, 46 minutes	70.15%	

Tableau 4.2 – Durées de mission et énergies disponibles pour chacun des 3 planeurs obtenues avec notre méthode et avec une méthode plus classique de parcours en boustrophédon

Le point d'entrée sur zone est fixé par les pilotes de planeurs obligeant ainsi notre méthode à générer des trajectoires qui respectent un cycle pour couvrir la zone d'opération. Nous avons voulu en profiter pour vérifier si nous étions en capacité de gérer une zone d'exclusion sur la zone d'opération. C'est pourquoi une zone composée de 9 cases (3 x 3 *waypoints*) au Nord-Est de la zone d'opération a été définie arbitrairement comme interdite à la navigation pour la flotte de planeurs lors de la mission du 10 au 21 juillet 2023. Ceci rend encore plus délicat la planification de trajectoire lorsque celle-ci est planifiée par un opérateur humain.

Nous avons donc retiré les *waypoints* correspondant du graphe de la zone d'opération et avons

utilisé notre méthode pour à nouveau générer des trajectoires lesquelles sont visualisables au niveau de la Figure 4.6. Dans cet exemple les trajectoires ont été obtenues en considérant un coût en temps au niveau de la matrice d’adjacence et un graphe complet avec un profil de vol normal pour les engins. Les grandeurs d’intérêt de cette mission simulée sont disponibles dans le tableau 4.3. Ce sont les résultats du test des trajectoires obtenus pour chaque planeur composant la flotte sur le simulateur. Les routes ont été générées en 2400 secondes en utilisant l’heuristique “PATH_CHEAPEST_ARC” et la métaheuristique “GUIDED_LOCAL_SEARCH” avec des points de départ et d’arrivée sur zone fixés au Nord-Ouest de la grille et en prenant en compte la zone d’exclusion au Nord-Est de la zone d’opération.

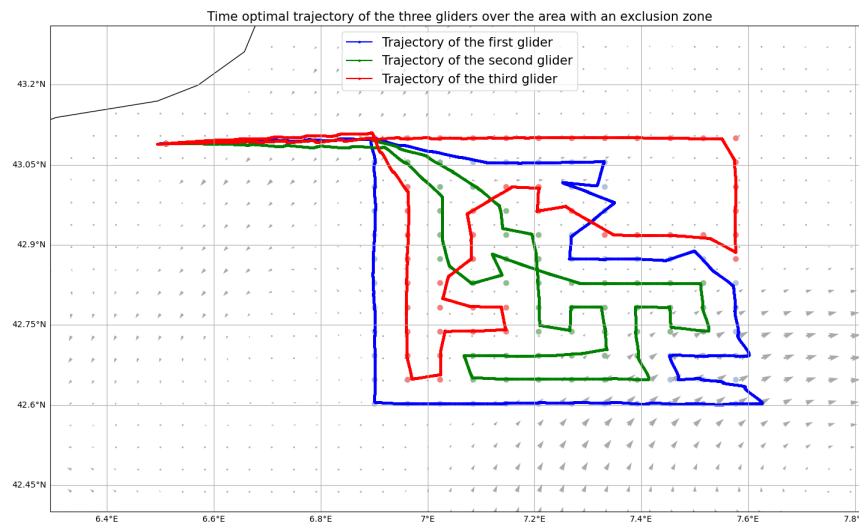


Figure 4.6 – Trajectoires des 3 planeurs avec une zone d’exclusion

4.2.2 Adaptation du profil de vol

Sur la base de cette trajectoire et en jouant sur les profils de vol, une seconde étape d’optimisation locale de l’énergie consommée a pu être réalisée. Les résultats obtenus en sortie de simulation sont fournis au niveau du tableau 4.3.

La zone à couvrir par la flotte présente des niveaux bathymétriques qui sont supérieurs à 1000 m de profondeur, par conséquent le nombre de “yo” sous-marins des engins ne varie pas sur la mission envisagée. De plus, l’absence d’importante variabilité spatio-temporelle du courant sur la durée de la mission conduit à très peu de changements de profil de vol dans cette seconde étape d’optimisation. En effet, sur la plupart des segments des engins composant la flotte, c’est le profil de vol normal qui est le plus approprié pour minimiser la consommation localement. Le profil de vol rapide n’est jamais utilisé ce qui est dû à l’absence de trop fort courant et le profil de vol lent est lui aussi très peu utilisé ce qui est dû à l’absence de courant qui pourrait aider les planeurs dans leurs trajectoires. C’est pourquoi dans le tableau, on peut voir que cette phase d’optimisation ne permet pas de gagner énormément

d'énergie sur l'ensemble de la mission simulée et qu'en plus cela se fait au détriment de la durée de la mission qui a tendance à s'allonger. C'est la raison pour laquelle le profil de vol adaptatif n'a pas été utilisé lors de la mission opérationnelle.

4.2.3 Mission à 4 planeurs

Afin de conserver une marge raisonnable face à la contrainte calendaires des 12 jours de disponibilité des planeurs, il a été décidé de considérer une flotte avec un engin supplémentaire. Le plan de mission a été recalculé et les trajectoires sont visibles au niveau de la figure 4.6. Ces dernières ont été obtenues à partir d'une matrice d'adjacence générée à partir d'un graphe complet et en utilisant l'estimation de coût en temps avec un profil de vol normal pour les engins.

Les grandeurs d'intérêt de cette mission simulée qui sont disponibles dans le tableau 4.3 sont les résultats du test des trajectoires obtenus pour chaque planeur composant la flotte sur le simulateur. Les routes ont été générées en 2400 secondes en utilisant l'heuristique "PATH_CHEAPEST_ARC" et la métaheuristique "GUIDED_LOCAL_SEARCH" avec des points de départ et d'arrivée sur zone fixés au Nord-Ouest de la grille et en prenant en compte la zone d'exclusion au Nord-Est de la zone d'opération avec une flotte de 4 planeurs.

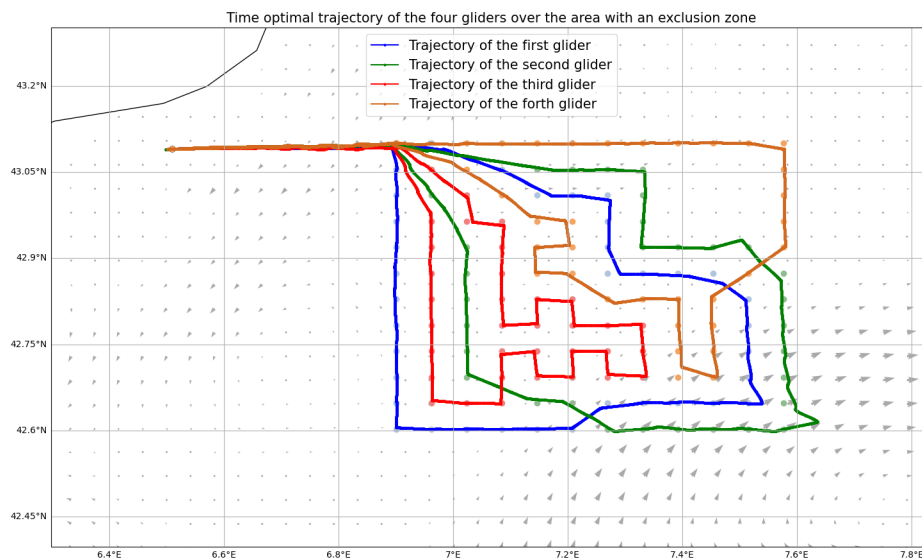


Figure 4.7 – Trajectoires des 4 planeurs avec une zone d'exclusion

Ces dernières trajectoires générées sur le jeu de données de courant de l'année de 2022 permettent d'avoir une durée de mission simulée qui ne dépasse pas les 9 jours de mission et un niveau d'énergie supérieur à 80%. Cela permettrait donc d'avoir une marge de sécurité en cas de conditions climatiques défavorables ou d'alarme ou de perte d'un engin.

Méthode	Engins	Durées de la mission simulée	Énergies disponibles	Gains
Trajectoires optimisées en temps des 3 planeurs avec une zone d'exclusion	Engin 1	10 jours, 17 heures, 11 minutes	77.70%	N/A
	Engin 2	10 jours, 5 heures, 46 minutes	78.69%	N/A
	Engin 3	10 jours, 1 heures, 57 minutes	79.01%	N/A
Deuxième étape : Profil de vol adaptatif sur les trajectoires des 3 planeurs avec une zone d'exclusion	Engin 1	10 jours, 20 heures, 19 minutes	78.47%	+0.77%
	Engin 2	10 jours, 7 heures, 30 minutes	78.79%	+0.1%
	Engin 3	10 jours, 1 heures, 50 minutes	79.20%	+0.19%
Trajectoires optimisées en temps des 4 planeurs avec une zone d'exclusion	Engin 1	8 jours, 11 heures, 52 minutes	82.30%	N/A
	Engin 2	8 jours, 19 heures, 29 minutes	81.64%	N/A
	Engin 3	8 jours, 8 heures, 4 minutes	82.62%	N/A
	Engin 4	8 jours, 11 heures, 11 minutes	82.34%	N/A

Tableau 4.3 – Durées de mission et énergies disponibles pour une flotte de 3 et de 4 planeurs obtenues avec notre méthode en préparation de mission

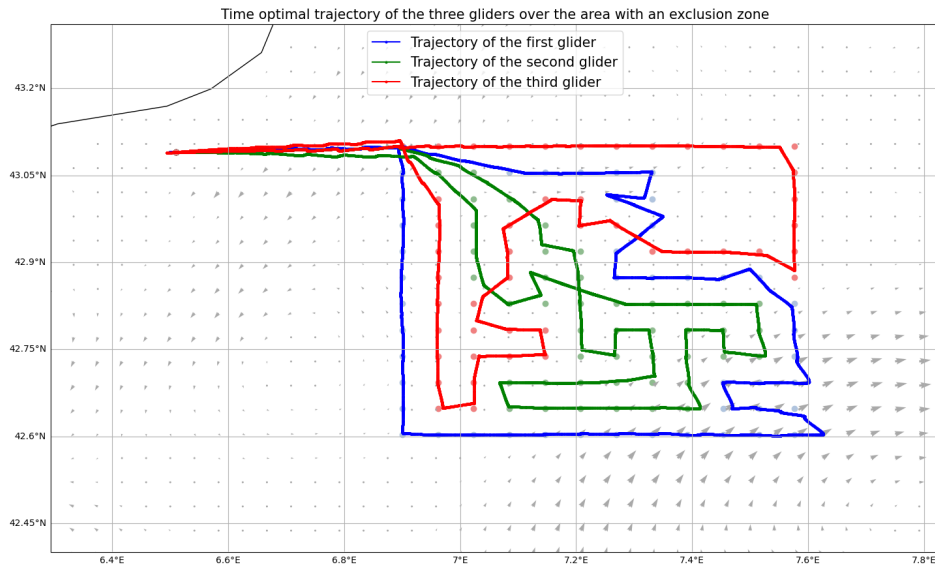
4.2.4 De la planification de trajectoire à la conduite réelle de mission en mode totalement automatisé

Les planeurs déployés en mer lors de la mission opérationnelle étaient destinés, comme tous les planeurs SeaExplorer, à être pilotés depuis la plateforme de gestion de mission GLIMPSE. Des réflexions ont été menées sur l'interfaçage entre notre méthode de génération de trajectoire et la plateforme GLIMPSE. Comme détaillé dans la section 1.3.5, cette plateforme dispose d'un module "mission plan" permettant aux planeurs de suivre des trajectoires sur plusieurs *waypoints* avec un profil de vol associé. La plateforme est discrétisée en plusieurs modules, ces derniers pouvant communiquer entre eux.

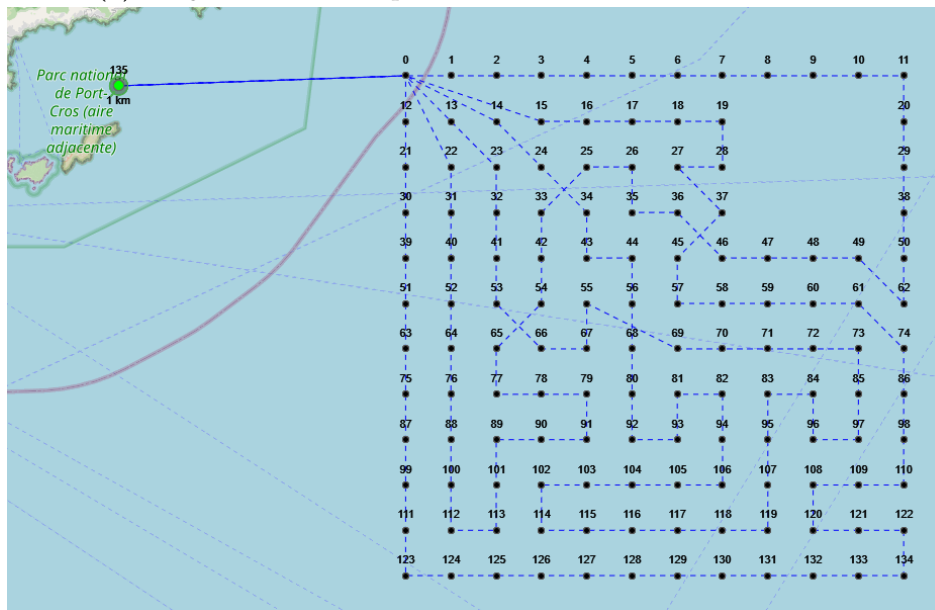
Le système de communication mis en place est un système d'échange "HTTP". Un protocole propriétaire a été développé au sein d'Alseamar pour ces échanges, du nom de "GOSP". Ce protocole est basé sur le "TCP/IP" (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) avec des messages échangés au format JSON (*JavaScript Object Notation*). Chaque module au sein d'un serveur de liaison reçoit le BUS GOSP, ces modules sont aussi capables d'envoyer des messages sur le BUS. Chaque mission générée sur le module "mission plan" peut se présenter sous la forme d'un fichier JSON. Ce dernier comprend le numéro de l'engin, son numéro de mission, ses profils de navigation à respecter pendant la mission, les coordonnées des *waypoints* qu'il doit visiter, l'ensemble des segments qu'il doit réaliser avec un profil de navigation et un rayon de validation associés.

Notre objectif a donc été de générer en sortie de la méthode développée un fichier JSON type "mission plan" pouvant être chargé directement sur la plateforme de pilotage des planeurs. Une traduction de ses fichiers JSON en requête "HTTP" a été nécessaire afin de communiquer avec le module correspondant en utilisant le protocole "GOSP".

La figure 4.8 est un exemple de plan de mission généré par notre méthode directement chargé sur la plateforme de pilotage GLIMPSE. Il s'agit du plan de mission généré pour une flotte de 3 planeurs en prenant en compte la zone d'exclusion qui a directement été chargé sur la plateforme de pilotage sur laquelle on peut voir sur une carte les trajectoires en pointillés bleus que les engins doivent réaliser pour couvrir l'ensemble des *waypoints* de la zone d'opération.



(a) Trajectoires des 3 planeurs avec une zone d'exclusion



(b) Plan de mission des planeurs sous GLIMPSE

Figure 4.8 – Plan de mission généré chargé automatiquement sous GLIMPSE

4.3 Préparation et déploiement des engins

Au mois de juin 2023, une mission impliquant 4 planeurs SeaExplorer mis à disposition par Alseamar a été réalisée dans le cadre d'un projet européen "PIAQUO". Ce projet de recherche collaborative financé par la Commission Européenne, a pour objectif la mesure et la réduction de l'impact du bruit généré par le transport maritime sur l'environnement. Le but de ce projet est également d'anticiper les évolutions de la réglementation européenne concernant les bruits anthropiques sous-marins tout en s'adaptant, en temps réel, à la sensibilité de l'écosystème. Une fois cette mission "service" terminée, les 4 engins sont récupérés par l'équipe "mer" afin

d’être préparés pour leur prochaine mission. Ainsi les planeurs SEA006, SEA030, SEA037 et SEA038 utilisés pour “PIAQUO” ont été utilisés pour la mission décrite dans le début de ce chapitre.

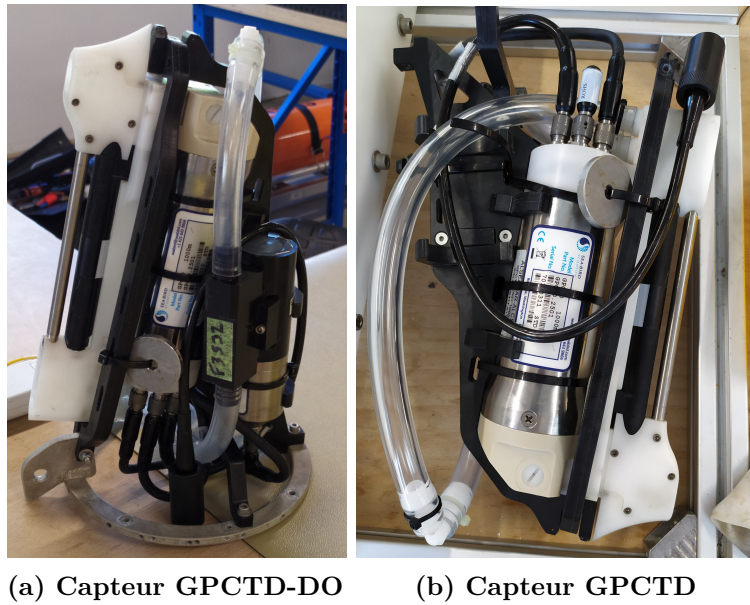
La semaine avant le déploiement des engins a donc consisté en la préparation de ces derniers. Cela passe par un nettoyage des planeurs, un téléchargement de leurs fichiers de données de navigation et de données scientifiques mesurées avant de changer leurs configurations pour répondre aux besoins de leur future mission. J’ai eu la chance de suivre ce processus. La partie navigation et de communication de ces engins étant fonctionnelles, elle reste inchangée. En revanche, pour les besoins de la mission, il a tout d’abord été nécessaire de changer la charge utile des planeurs (cf. section 1.3.1) en remplaçant les capteurs acoustiques par un capteur “CTD” (*Conductivity Temperature Depth*). Pour ce faire, il est d’abord requis de modifier un fichier de configuration au sein des engins pour préciser le type de capteur qu’ils embarquent pour leur mission future.

Les capteurs commandés par Alseamar font l’objet d’un suivi minutieux au travers de fiches de suivies permettant d’indiquer les capteurs équipant les planeurs au fur et à mesure de leur mission. Au vue de la disponibilité des capteurs au moment de la préparation des engins, ce sont des capteurs “CTD” développés par l’entreprise “RBR” [10] et des capteurs “GPCTD-DO” (*Glider Payload Conductivity Temperature Depth - Dissolved Oxygen*) développés par l’entreprise “SEABIRD” [11] que nous avons utilisés, tous deux permettant de faire l’acquisition du même type de mesures. Pour ce dernier, il se trouve qu’il permet également de réaliser des acquisitions de données d’oxygène dissous dans la colonne d’eau lorsqu’il est équipé du capteur “SBE 43F”. Par soucis de consommation d’énergie, nous avons préféré le retirer des capteurs pour ne mesurer que les données de température, de conductivité et de profondeur. Sur la figure 4.9 a) on peut voir la configuration GPCTD-DO (*Dissolved Oxygen - DO*) avec le capteur d’oxygène se trouvant en bas à droite de ce dernier. Sur la figure 4.9 b), on peut voir le capteur une fois le capteur “SBE 43F” enlevé.

Cette modification apportée au capteur a dû être renseignée sur le fichier de configuration du capteur en lui même et également sur la carte “charge utile” des planeurs. Cette carte a pour objectif de fournir des connexions et des interfaces nécessaires aux capteurs ainsi que l’enregistrement des données de ces derniers. La carte intègre également une carte SD pour la journalisation des fichiers d’entrée/sortie. Elle permet une communication bidirectionnelle avec la carte de “navigation” du drone : pour la transmission des données utiles vers le CPU de navigation lors de la remontée en surface et la transmission des phases de navigation vers le CPU de la charge utile.

Les capteurs et le processeur de la charge utile sont alimentés par le bloc-batterie dans la partie “véhicule” via la carte de “navigation”. La carte “charge utile” (Fig. 4.10 b) se trouve sur la partie avant du planeur (Fig. 4.10 a), partie qui est lestée de poids afin de compenser le poids du reste du drone.

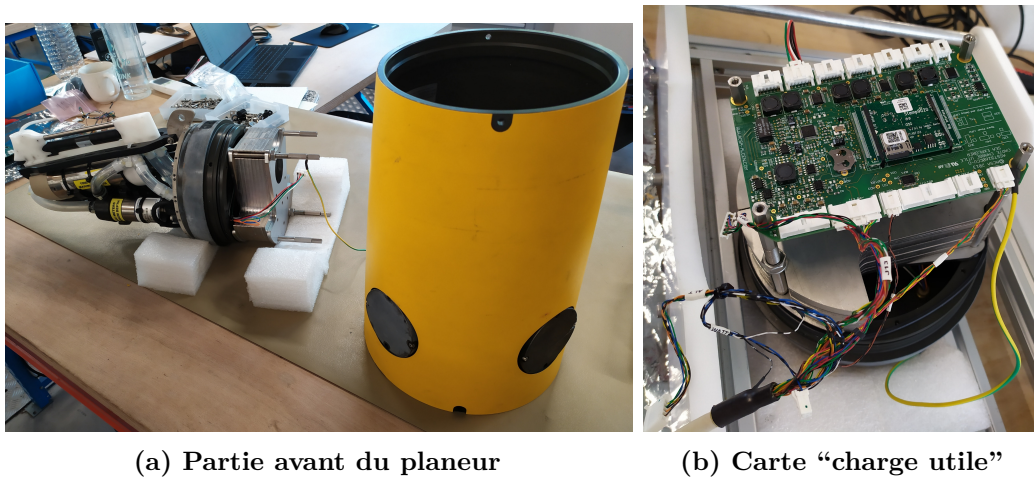
Il est important de noter que les planeurs sont composés de deux capteurs d’entrée d’eau,



(a) Capteur GPCTD-DO

(b) Capteur GPCTD

Figure 4.9 – Comparaison GPCTD-DO et GPCTD



(a) Partie avant du planeur

(b) Carte “charge utile”

Figure 4.10 – Partie avant du planeur et carte “charge utile”

un se situant sur la partie avant du drone et un autre se situant sur la partie arrière. Une fois la partie avant assemblée au sein de la structure jaune sur la figure 4.10 a) et avant de la connecter au reste de l’engin, une vérification du bon fonctionnement du capteur d’entrée d’eau de cette partie a dû être réalisée. Ceci ayant été fait, il a été possible de connecter les parties avant sur les planeurs avant de faire le vide à l’intérieur pour les rendre hermétiques (voir Fig. 4.11 a)).

Les engins sont également équipés d’un “largueur” (déploiement d’un lest afin que l’engin remonte à la surface en cas d’alarme en profondeur), d’un “pinger” (émetteur acoustique) et d’une balise “argos” (communication de position géographique par satellite) pour faciliter leur récupération en cas de problème en mer qu’il est nécessaire de contrôler avant leur départ en mission.

Les engins sont ensuite pesés avant d’être mis en piscine pour vérifier leur flottabilité. Des protections en noir sur la figure 4.11 b) du “nez” et de l’arrière sont mises en place afin de protéger le capteur ainsi que le “pinger”. A l’aide de jauges placées à l’avant et l’arrière des drones (voir Fig. 4.11 b), il est possible de voir de quel côté ils sont trop pesants. Si nécessaire, il est possible de régler la position initiale du pack batterie des engins afin de les équilibrer ou de rajouter des blocs de mousse de par et d’autre de l’engin afin qu’ils aient une position neutre à la surface.

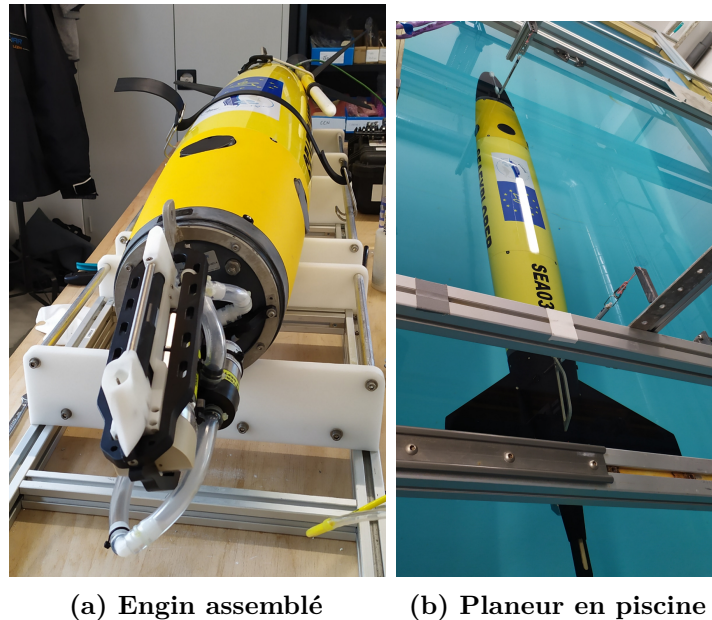


Figure 4.11 – Exemple de planeur assemblé et de test en piscine

Enfin, les derniers tests pour préparer les engins consistent en la vérification de leurs données compas en extérieur sur une table disposant de mesures d’angles (voir Fig. 4.12). Le test consiste à vérifier les acquisitions de cap faites par l’engin avec la table, un recalibrage est nécessaire si les données sont faussées. Les engins sont ensuite mis en simulation en extérieur. Durant ces simulations, ils vont effectuer leurs cycles de plongées comme s’ils étaient en mer. Ce dernier test permet de vérifier que les engins respectent leurs phases de navigation et qu’ils ne signalent pas d’erreur critique.

Les engins SEA006, SEA030, SEA037 et SEA038 étant préparés, nous avons pu les déployer pour leur mission avec l’équipe “mer” le 10 juillet 2023. Alseamar possède un semi-rigide nommé “TANGO” entreposé dans le port à sec “PORTLAND” [12] se situant à HYERES-SALINS. Une fois la flotte de planeurs chargée sur le bateau (voir Fig. 4.13 b), nous sommes allés au large vers le point de déploiement sélectionné (i.e. le point 135 sur la figure 4.8 b).

Les conditions climatiques étaient tellement propices à la navigation en mer que nous avons pu dépasser le point de déploiement prévu pour nous rapprocher de la zone à couvrir. Nous avons donc déployé la flotte de 4 planeurs plus à l’Est que le point de déploiement prévu



Figure 4.12 – Table de calibration compas en extérieur



(a) Flotte de planeurs (b) Départ en mer

Figure 4.13 – Départ pour mise à l'eau de la flotte

afin de gagner 9 km sur les 37.60 km que les 4 engins devaient initialement parcourir pour rejoindre le point d'entrée sur zone.

Avant de mettre les engins à l'eau, une dernière vérification en matière d'intégrité des engins est faite. Chaque engin est ensuite déployé en mer en étant relié à une bouée par un filin (voir Fig. 4.14). Le but est de commander aux engins une plongée allant jusqu'à 30 m de profondeur afin de vérifier une dernière fois qu'aucune alarme n'est remontée. Le filin et la bouée sont utilisés pour pouvoir récupérer l'engin en cas de problème de dernière minute. Une fois les plongées de 30 m effectuées par tous les engins de la flotte, le plan de mission généré par notre méthode la veille du déploiement a pu être chargé directement depuis la plateforme de gestion de mission des planeurs. Ce plan de mission sera présenté dans la section suivante.

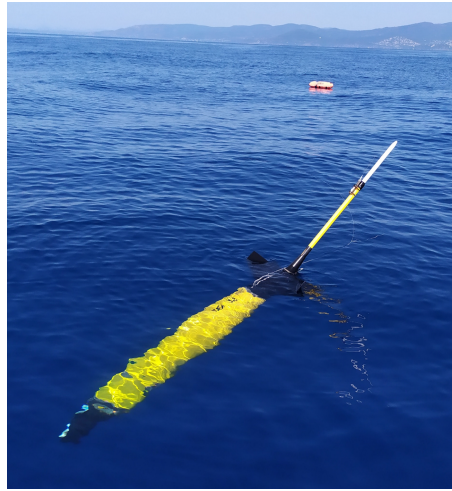


Figure 4.14 – Planeur relié à une bouée

4.4 Résultats et discussion

La veille du déploiement des engins, nous avons utilisé notre méthode de génération de trajectoire pour la flotte de 4 planeurs afin de couvrir la zone envisagée. Pour cela, un téléchargement des données de courant disponible la veille du déploiement a été nécessaire. Le jeu de données utilisé [9] permet d’avoir accès à 9 jours de prévision sur les données de courant de la zone, par conséquent les données de courant téléchargées permettaient de couvrir la période allant du 9 au 18 juillet.

Les trajectoires générées le 9 juillet sur les données de prévisions fournies par le modèle de courant sont disponibles sur la figure 4.15. Pour rappel, ces dernières ont été obtenues à partir d’une matrice d’adjacence générée à partir d’un graphe complet et en utilisant l’estimation de coût en temps avec un profil de vol normal pour les engins. Les routes ont été générées en 2400 secondes en utilisant l’heuristique “PATH_CHEAPEST_ARC” et la métaheuristique “GUIDED_LOCAL_SEARCH” avec des points de départ et d’arrivée sur zone fixés au Nord-Ouest de la grille et en prenant en compte la zone d’exclusion au Nord-Est de la zone. Étant donné que les engins ont été déployés encore plus à l’Est qu’initialement prévu, leurs positions d’arrivées sur le point d’entrée sur zone ont été simulées et utilisées pour générer les trajectoires de chaque planeur. C’est pourquoi on peut voir que les engins ne démarrent pas leurs trajectoires au même endroit dans le rayon de validation du point d’entrée sur zone. Les grandeurs d’intérêt de ce plan de mission simulé avec les données de prévision sur le courant le 9 juillet sont disponibles au niveau du tableau 4.4.

Ce plan de mission généré la veille du déploiement des engins a été directement importé sur la plateforme de pilotage des planeurs. Ces derniers ont suivi ce plan de mission et ont respecté les trajectoires générées jusqu’à la fin de la mission sans rencontrer le moindre problème à atteindre un *waypoint* programmé et sans alarme.

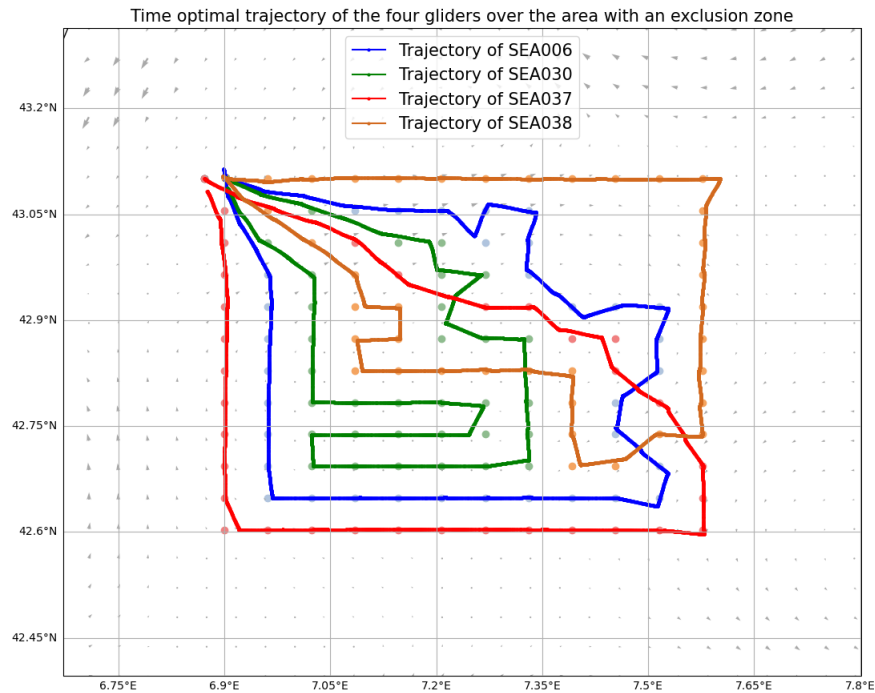


Figure 4.15 – Plan de mission des 4 planeurs la veille du déploiement

En cas de changement impactant la flotte tel qu’une alarme importante impliquant le retrait d’un engin de la flotte, une replanification des trajectoires aurait pu être réalisée en prenant en compte les cases déjà validées par les engins de la flotte, le nombre d’engins restant et un courant actualisé de la zone. Les trajectoires réalisées par les engins pendant leur mission sont affichées sur la figure 4.16. Sur cette dernière, la trajectoire du planeur SEA006 est en bleu, celle de SEA030 en orange, celle de SEA037 en jaune et celle de SEA038 en violet. Les niveaux bathymétriques sont également représentés sur cette figure. Les durées de mission et les niveaux énergétiques de chaque engin impliqué dans la mission réelle sont disponibles au niveau du tableau 4.4. Ici, seul le parcours de la zone est étudié, les temps mis pour atteindre le point d’entrée sur zone ou les temps mis pour atteindre le point de récupération n’est pas pris en compte dans le calcul des grandeurs d’intérêt. On constate tout d’abord que les 4 engins ont terminé leurs parcours de la zone quasi simultanément.

A l’issue de la mission, un nouveau jeu de données de courant de la zone d’opération a pu être téléchargé. Toujours en se basant sur le même modèle utilisé précédemment [9], nous voulions voir si les données de courant recalculées auraient une influence sur les trajectoires générées pour la flotte et vérifier si les données de courant de prévision que nous avons la veille du déploiement des engins étaient cohérentes.

Le plan de mission généré a donc été simulé sur ce nouveau jeu de données et les résultats se trouvent dans le tableau 4.4. On peut voir qu’il n’y a pas de grande différence entre les données de courant utilisées la veille du déploiement et les données de courant actualisées du modèle puisqu’en simulation cela ne fait que 4 h de différence sur la trajectoire de SEA006.

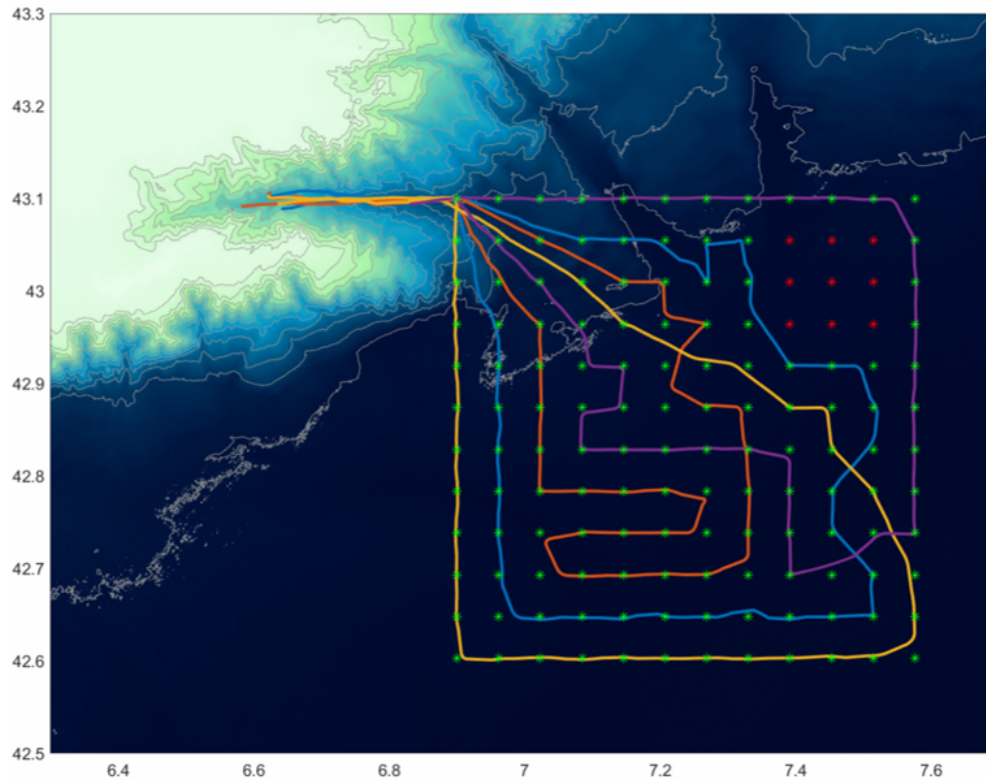


Figure 4.16 – Trajectoires réalisées par les 4 engins pendant la mission réelle

Les résultats liés aux autres planeurs restent inchangés.

Si on compare les durées de mission simulée en utilisant des données de courant prévisionnelles et la mission réelle, on peut en déduire que nous obtenons environ 11% d’erreur sur la durée de mission de SEA006, 9% d’erreur sur la mission de SEA030, 12% d’erreur sur la mission de SEA037 et 12% d’erreur sur la mission de SEA038.

Si on compare maintenant les durées de mission simulée en utilisant des données de courant actualisées et la mission réelle, on peut en déduire qu’il y a peu près 13% d’erreur sur la durée de mission de SEA006, 9% d’erreur sur la mission de SEA030, 12% d’erreur sur la mission de SEA037 et 12% d’erreur sur la mission de SEA038.

Comme montré à la section 2.3, le simulateur utilisé à la fois dans notre méthode de calcul de trajectoires et dans le test des différents plans de mission présente une erreur de 10% sur les durées de mission simulées. Il se trouve que l’engin simulé est plus rapide que l’engin réel. Ce pourcentage d’erreur se retrouve également ici avec des erreurs sur les durées de mission entre le simulé et le réel allant de 9 à 12%. La différence entre le simulé et le réel peut également être dû au fait que les engins lors de la mission réelle étaient pilotés en mode *waypoint* (1.3.5). Ces derniers sont donc remontés en spirale autour des points visés tout en restant dans les rayons de validation alors qu’en simulation ce mode n’est pas encore implémenté et constitue une perspective d’évolution du simulateur. Les engins simulés continuent leurs plongées lorsqu’ils ont validés un point ce qui peut leur faire gagner du temps dans une mission simulée par

Méthode	Engins	Durées de la mission	Énergies disponibles
Trajectoires optimisées en temps des 4 planeurs sur un courant prévisionnel	SEA006	6 jours, 12 heures, 7 minutes	86.55%
	SEA030	6 jours, 0 heure, 41 minutes	87.53%
	SEA037	6 jours, 8 heures, 18 minutes	86.87%
	SEA038	6 jours, 8 heures, 18 minutes	86.87%
Trajectoires réalisées par les 4 planeurs lors de la mission réelle	SEA006	7 jours, 7 heures, 17 minutes	86%
	SEA030	6 jours, 14 heures, 42 minutes	87%
	SEA037	7 jours, 5 heures	86%
	SEA038	7 jours, 5 heures, 3 minutes	86%
Trajectoires optimisées en temps des 4 planeurs sur un courant actualisé	SEA006	6 jours, 8 heures, 18 minutes	86.87%
	SEA030	6 jours, 0 heure, 41 minutes	87.53%
	SEA037	6 jours, 8 heures, 18 minutes	86.87%
	SEA038	6 jours, 8 heures, 18 minutes	86.87%

Tableau 4.4 – Comparaison des grandeurs d’intérêt de la mission en mer

rapport à une mission réelle.

De plus, des pertes de communication en surface sont survenues durant la mission réelle. Elles ont pour origine une mauvaise couverture satellite à certains moments ce qui a contribué à ralentir les engins en conditions opérationnelles. En outre, les rayons de validation utilisés dans cette mission, de l’ordre de 2500 m, sont assez grands ce qui a pu conduire à une désynchronisation des engins en cours de mission. Enfin, un des planeurs a validé le point d’entrée sur zone en début de mission tandis que les 3 autres planeurs, du fait de leur déploiement plus éloignés, sont arrivés en dehors du rayon de validation et ont dû replonger. Ce phénomène est illustré sur la figure 4.17.

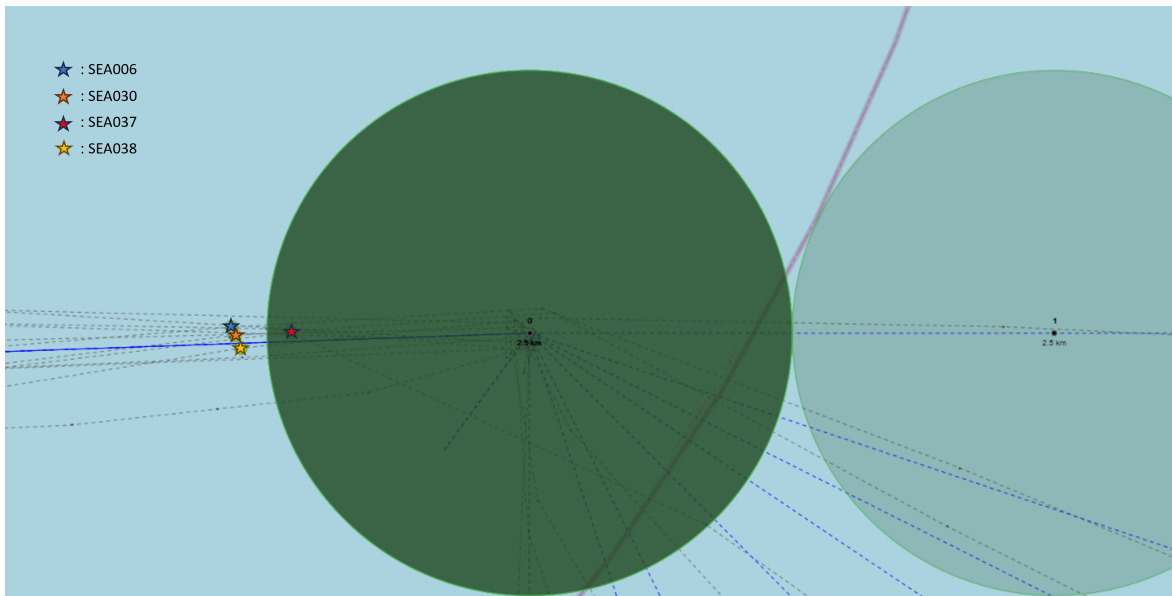


Figure 4.17 – Capture d’écran de GLIMPSE mettant en avant la désynchronisation des engins en début de mission

Toutefois, au travers de la simulation du plan de mission généré la veille du déploiement, on

peut voir qu’il était prédit que SEA030 arriverait au point final en premier, que SEA037 et SEA038 arriveraient en même temps peu après et que le dernier engin à terminer son parcours serait SEA006. Ces calculs sont confirmés par les grandeurs d’intérêt de la mission réelle où l’ordre d’arrivée des engins est bien respecté. SEA037 et SEA038 ont terminé leur parcours de la zone d’opération quasiment en même temps à 3 min près.

Si on se concentre maintenant sur les pourcentages d’énergie consommée des engins entre les simulations et la mission réelle, nous observons une assez bonne concordance dans les résultats : entre 0.5% et 0.9% d’erreur sur l’énergie consommée par les engins. Ceci peut être dû au fait que la radio a été désactivée en cours de mission alors qu’elle est désactivée directement en simulation.

Au vu des résultats affichés dans le tableau 4.4, on peut voir que notre méthode garantit un retour quasi simultané au point final après avoir couvert l’ensemble de la zone d’opération. Toutefois d’un point de vue opérationnel, on peut quand même s’interroger sur la nécessité pour les engins d’arriver en même temps au point de récupération. Il se peut que plusieurs éléments conduisent à des récupérations différées des engins lors de leur mission tels que : la disponibilité de l’équipe “mer” ainsi que du semi-rigide d’Alseamar, des conditions climatiques qui ne permettent pas d’aller en mer, la capacité du bateau en fonction du nombre de déploiements et de récupérations d’engins à effectuer en mer. Dans notre cas par exemple, le nombre d’engins à l’eau, au moment de la fin de la mission, que devait récupérer l’équipe “mer” était si important que SEA006 et SEA037 ont dû rallier le point de récupération le 20 juillet tandis que SEA030 et SEA038 ont dû être récupéré le lendemain. Il serait donc intéressant de prendre en compte directement dans la fonction de coût les éléments qui pourraient faire que la récupération au point final simultanée soit nécessaire ou non.

Enfin, les données de température interpolées sur les plongées réalisées par les planeurs de la flotte sur l’ensemble de la mission sont représentées sur la figure 4.18. On peut voir que les données mesurées sont cohérentes entre les engins en plus d’avoir été recueillies sur l’ensemble de la zone d’opération en évitant bien la zone d’exclusion définie au Nord-Est de la grille à couvrir. La variation de température mesurée par les engins sur la colonne d’eau jusqu’à 1000 m de profondeur est marquée en surface avec de grosses fluctuations qui justifient des passages de couleur rouge à jaune sur des faibles profondeurs. Les variations sont beaucoup moins présentes sur le reste de la colonne d’eau ce qui explique un dégradé de couleur bleu jusqu’au violet en profondeur.

4.5 Conclusion

La mission en mer réalisée entre le 10 et le 21 juillet a permis de valider notre méthode de génération de trajectoires pour une flotte de 4 planeurs SeaExplorer.

Les 4 planeurs ont été déployés en mer Méditerranée et ont suivi un plan de mission généré la veille du déploiement en prenant en compte des données de prévision sur le courant de la

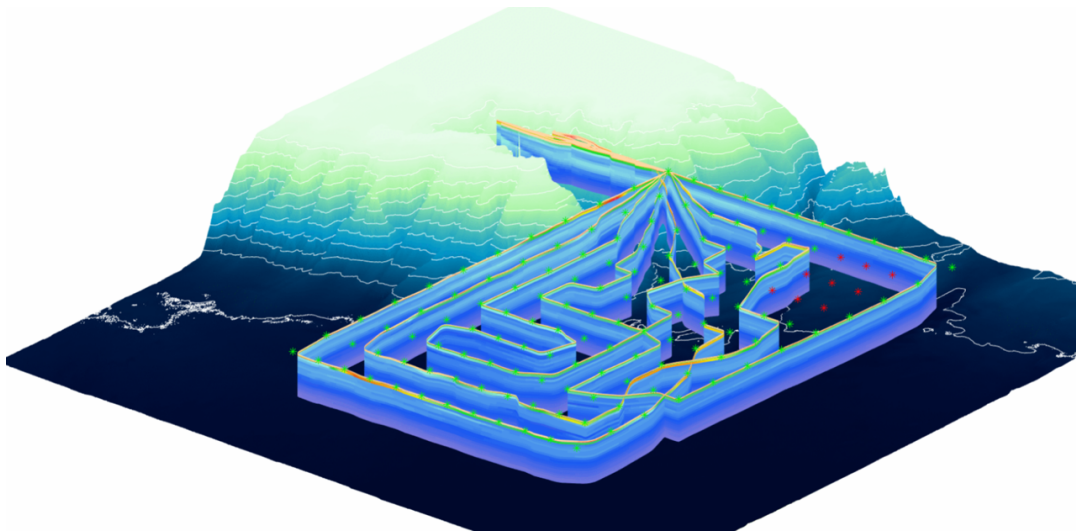


Figure 4.18 – Données de température mesurées par la flotte

zone. Ce plan de mission chargé automatiquement sur la plateforme de pilotage des planeurs a permis aux 4 engins de couvrir de manière optimisée en temps la zone d'opération définie. Cette dernière était composée d'une zone interdite à la navigation qui a bien été respectée par les engins de la flotte.

Les planeurs sont arrivés de manière quasi-simultanée comme prédit au point final de la zone d'opération après avoir couvert un volume de 2800 km^3 en 7 jours sans la moindre intervention d'un pilote. Des données de température, de conductivité et de profondeur ont été collectées sur ce volume et permettront d'analyser la variabilité entre les données réelles et les données issues de modèles océanographiques de la zone.

Le plan de mission généré la veille du déploiement et testé sur notre simulateur présente un pourcentage d'erreur sur les durées de mission des planeurs allant de 9 à 12%. Ce pourcentage d'erreur a pu être observé sur d'autres missions en comparant les temps de navigation entre le réel et la simulation. En prenant en compte ce pourcentage d'erreur directement dans le simulateur, les mesures de sortie du plan de mission généré colleraient mieux avec la réalité. Toutefois il est important de noter que d'autres phénomènes en cours de mission peuvent avoir un impact sur les durées de mission tels que des pertes de communications en surface des engins, le pilotage en mode *waypoint*.

Cette mission a permis de prendre du recul sur la méthode développée dans le cadre de cette thèse et d'en tirer de l'expérience pour les futures améliorations à apporter. En outre, du fait d'une taille de rayon de validation relativement grande, de l'ordre de 2500 m, nous avons pu observer une désynchronisation des engins en cours de mission. Il serait donc intéressant d'affiner les rayons de validation en entrée de zone (le point 0 pour cette mission) ainsi qu'autour de la zone d'exclusion. Cela éviterait les éventuels débordements sur la zone interdite à la navigation en cours de mission.

En l'absence de contrainte énergétique sur les engins composant la flotte, il serait intéressant, en cours de mission (phase de supervision) de modifier les profils de vol des engins afin d'augmenter ou de diminuer leurs vitesses. Il s'agirait de réaliser une optimisation locale du temps de parcours des engins afin de respecter une date d'arrivée commune pour la flotte de planeurs. Comme détaillé précédemment, cela reste dépendant de la disponibilité de l'équipe "mer" et de la capacité du bateau utilisé pour la récupération des engins en mer.

En cas de présence de contrainte énergétique sur les engins à respecter ou si un problème survient sur un ou plusieurs planeurs de la flotte, il sera nécessaire, lors de la phase de supervision, de recalculer l'ensemble des trajectoires des engins en prenant en compte les cases déjà visitées et en considérant un courant actualisé de la zone d'opération pour le restant de la couverture de zone. Enfin, on pourrait imaginer un redimensionnement de la zone d'opération et une replanification des trajectoires des engins en fonction des données mesurées en l'absence de contrainte énergétique à respecter sur la flotte.

Conclusion générale & perspectives

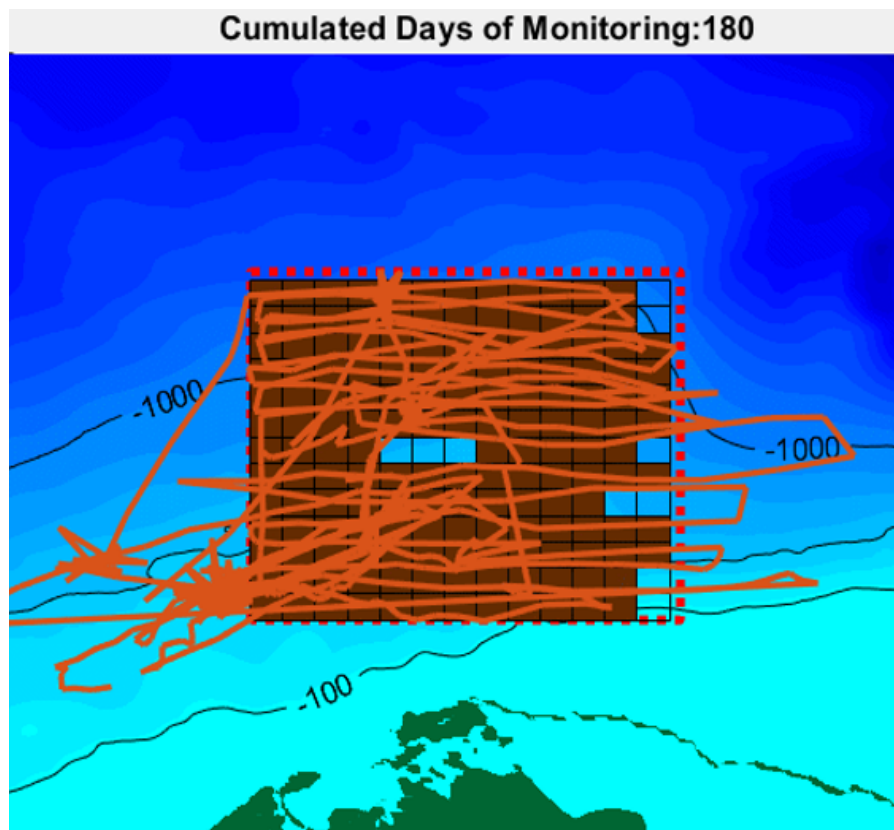
Dans cette thèse, nous nous sommes focalisés sur la phase de préparation de mission d'une catégorie de drones sous-marins : les planeurs, ici en l'occurrence les SeaExplorer d'Alseamar. Le chapitre 1 a permis de rappeler quel était le principe du pilotage actuel de ces planeurs et ses limites. Il met en avant l'importance pour les pilotes d'avoir accès aux grandeurs d'intérêt liées à une mission de SeaExplorer à savoir la consommation, la distance parcourue et le temps total de la mission. Ces grandeurs d'intérêt peuvent être utilisées en phase de préparation de mission afin de dimensionner la zone d'opération, la taille de la flotte de planeurs à utiliser, les profils de vol à adopter ainsi que la composition de la charge utile des planeurs. En cours de mission, en phase de supervision, les pilotes de SeaExplorer peuvent également se servir de ces grandeurs afin de pouvoir donner une estimation de fin de mission, mais également pour pouvoir redéfinir le plan de mission en fonction des aléas que peuvent rencontrer les planeurs. Ces grandeurs d'intérêt sont donc importantes, d'autant plus que l'engin est destiné à évoluer pendant plusieurs mois en mer. Ceci souligne l'importance de prendre en compte l'environnement marin dans lequel l'engin évolue.

C'est pourquoi une des contributions majeures de cette thèse réside dans le développement d'un simulateur de mission pour planeur SeaExplorer 4D en prenant en compte le modèle hydrodynamique de l'engin, les courants marins et les relevés bathymétriques, la consommation énergétique et le modèle comportemental du planeur. Ce simulateur présenté dans le chapitre 2 a été confronté à une mission réelle afin de valider cet outil en tant qu'aide à la décision majeur pour les pilotes de planeurs SeaExplorer. Ce dernier permet de simuler des plans de missions et de générer des grandeurs d'intérêt qui sont parfaitement cohérentes avec les résultats observés et avec les données enregistrées lors de la mission réelle.

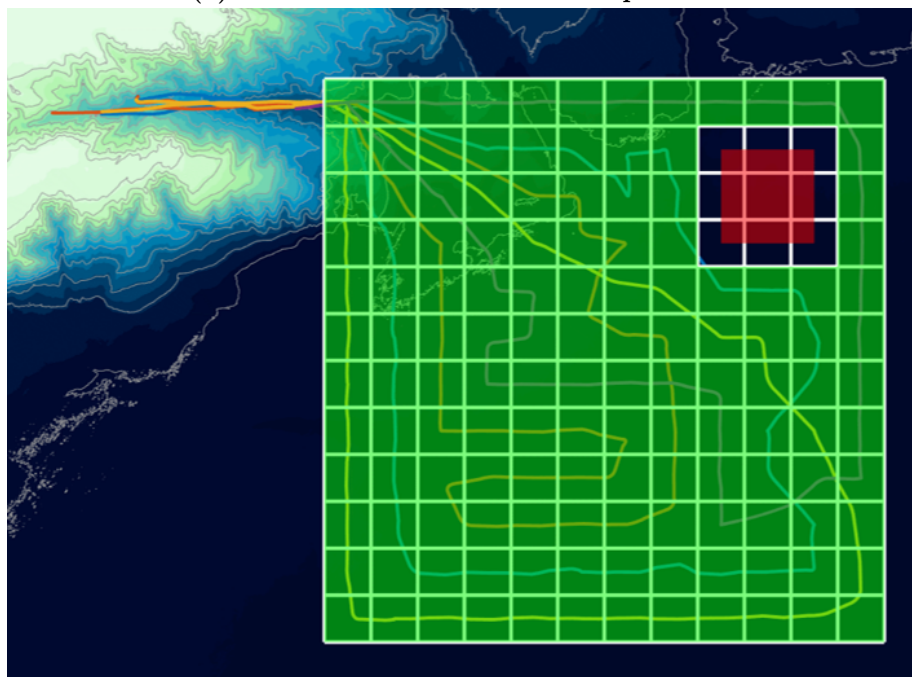
Le fonctionnement du planeur évoluant dans le temps, il serait intéressant d'intégrer au sein de ce dernier les nouvelles fonctionnalités de navigation de l'engin. Parmi ces dernières, on peut noter la remontée en spirale autour du *waypoint* visé. Il se peut que l'engin dispose dans le futur d'une certaine autonomie décisionnelle en fonction de la connaissance à priori de l'état dans lequel il se trouve qu'il faudra également simuler (position, vitesse, cap, énergie disponible, phénomènes détectés). Une modification du modèle hydrodynamique du simulateur est possible afin de prendre en compte différents types de configuration d'engin à venir avec des caractéristiques physiques différentes. Le modèle de consommation du simulateur sera également à modifier afin de prendre en compte les nouveaux capteurs intégrés sur le planeur.

D'un point de vue planification de trajectoire et sur un plan plus académique, ce simulateur est un outil crucial à la préparation des données en alimentant des algorithmes de plus haut niveaux qui permettent d'élaborer des chemins optimisés selon des contraintes et critères donnés pour des missions mono et multi-engins. Ainsi il permet d'alimenter des matrices d'adjacence pondérées sur lesquelles est exécuté le routage de la flotte de planeurs en incluant la bathymétrie des lieux et les courants actuels ou prévus sur l'horizon temporel fourni par les modèles de Marine Copernicus. La flotte considérée étant composée de planeurs dont le pilotage est centralisé et asynchrone. Le simulateur permet donc d'exploiter la richesse et la pertinence des solveurs génériques notamment pour effectuer une couverture de zone optimisée en temps, en distance ou en énergie tout en dimensionnant la flotte, ses performances, et proposant des points de déploiement et récupération optimaux. Le chapitre 3 présente la méthode développée qui se base sur la théorie des graphes et sur notre simulateur de mission. Un coût global calculé en prenant en compte les coûts de connexion entre chaque noeud est minimisé par un solveur générique. Ce dernier nous permet le passage à l'échelle et de traiter ce problème de VRP (NP-Difficile) dans un temps réduit (à l'échelle d'une plongée planeur) sur beaucoup de *waypoints*. Il nous est donc possible de produire automatiquement une trajectoire optimisée pour chaque véhicule de la flotte sur une zone à couvrir. Nous avons pu montrer que les trajectoires générées permettent d'obtenir de meilleurs résultats que celles générées par un pilote de planeur dans le cas multi-engins, la phase de préparation de mission étant beaucoup trop complexe dans ce cas là. Notre méthode permet également de déterminer la taille de la flotte à utiliser, les points de déploiement et de récupération optimaux sur zone ainsi que les profils de vol à adopter afin de minimiser localement la consommation énergétique des engins.

Une expérimentation réelle décrite dans le chapitre 4 a été mise en oeuvre avec 4 planeurs SeaExplorer déployés en mer Méditerranée afin de valider notre méthode, cette dernière étant intégrée sur la plateforme de pilotage des planeurs. Un plan de mission a été généré la veille du déploiement des engins et a permis aux planeurs de couvrir de manière optimisée en temps la zone d'opération définie, cette dernière comportant une zone interdite à la navigation pour l'exercice. Les engins sont arrivés au point de récupération de manière quasi-simultanée comme prédit après avoir couvert un volume de 2800 km^3 en 7 jours sans l'intervention d'un pilote et en évitant le suréchantillonnage et le dépassement de zone comme cela avait pu être le cas lors d'un pilotage manuel dans le Golf du Mexique de deux engins. La comparaison des deux résultats est fournie au niveau de la figure 4.19.



(a) Couverture manuelle avec 2 planeurs



(b) Couverture automatisée avec 4 planeurs

Figure 4.19 – Comparaison couverture manuelle et automatisée

D'un point de vue des perspectives, au delà des aspects de la préparation et de la planification de mission, la méthode présentée basée sur le simulateur offre des possibilités pour la conduite

de mission afin de permettre la supervision de mission. En effet, l'adaptation des profils de vol de chaque engin indépendamment permet d'envisager de façon automatique une date d'arrivée synchronisée pour l'ensemble de la flotte. Cette fonctionnalité est importante dans l'accomplissement d'une mission dans laquelle la logistique et les coûts liés à la récupération des engins sont non négligeables.

En cas d'événements climatiques imprévus ou de problème sur un engin (panne d'un engin ou dérive d'un planeur), il est possible de recalculer en cours de mission l'ensemble des trajectoires des planeurs en fonction des *waypoints* qu'ils ont déjà validées et en considérant un courant actualisé de la zone d'opération pour le restant de la couverture de zone. Cette fonctionnalité a été implémentée mais n'a pas encore été testée en condition réelle, la mission de juillet n'a pas nécessité le recalcul de l'ensemble des trajectoires des planeurs.

Dans notre étude, il a été considéré un maillage rectangulaire pour la zone d'opération en phase de préparation de mission. Toutefois, suite à la détection d'événements ou une modification des besoins opérationnels, il peut être demandé de réaliser une acquisition de données à la flotte de planeurs sur une zone spécifique. Il serait intéressant d'étudier l'impact sur notre méthode de formes différentes avec un échantillonnage variable. On pourrait même imaginer un maillage adaptatif avec une taille de maille qui varie pour répondre à un besoin de mesure océanographique plus ciblé sur une partie de la zone d'opération afin d'alimenter des modèles océanographiques.

Il se peut qu'en préparation de mission ou en cours de mission il y ait un besoin d'acquisition de données à un *waypoint* ciblé ou un ensemble de *waypoints* suite à une détection d'un phénomène océanographique par un autre type d'engin ou par un expert (un océanographe par exemple). Les engins doivent donc se répartir les *waypoints* ciblés et y passer le plus rapidement possible. Dans cette optique, si un besoin prioritaire de visites de points d'intérêt apparaît lors de la phase de planification et de supervision de mission, il est possible de combiner la méthode de couverture de zone globale proposée dans cette thèse avec une méthode de recherche graphique du plus court chemin d'un point A à un point B (l'algorithme de Dijkstra par exemple). Les matrices d'adjacence pondérées générées par notre méthode peuvent servir de données d'entrées à ces algorithmes de recherche graphique afin de générer les trajectoires optimisées pour arriver à l'ensemble de *waypoints* ciblés. Notre méthode de couverture de zone est ensuite utilisée afin de générer les trajectoires de la flotte de planeurs dans le but d'échantillonner les cases nécessaires avant de relancer une génération de trajectoires pour chaque engin de la flotte pour couvrir le restant de la zone à l'étude et revenir au point de récupération. Cette fonctionnalité a été développée et validée en simulation.

Le simulateur développé dans cette thèse pourrait également être utilisé dans des sujets de coordination (tenue de formation) afin de répondre à des besoins de Lutte Sous la Mer (LSM). Les engins étant asynchrones, le simulateur pourrait être utilisé afin de définir les profils de vol à adopter pour les engins puissent tenir au mieux une formation.

Notre méthode de génération de trajectoire est différente de ce qu'on peut trouver dans la

littérature, notamment pour les “AUV” et les “ROV”. Elle pourrait être applicable pour ces engins à la vue de la faible vitesse que ces derniers peuvent avoir ainsi que les trajectoires classiques en boustrophédon qu’ils réalisent pour couvrir une zone au fond de la mer par exemple. Ces engins peuvent également être impactés par les courants marins. Dans le cas des “ROV” le câble ombilical limite la mobilité de ces engins, on pourrait imaginer une minimisation de l’impact de ce dernier en couplant ce type d’engin avec un drone de surface dont le rôle serait de couvrir une zone de manière optimale, l’optimalité étant la minimisation de l’impact du câble sur le “ROV”.

Sur le plus long terme, on pourrait même imaginer utiliser notre méthode combinée à notre simulateur pour générer différents types de scénarios et s’en servir pour entraîner des modèles d’apprentissage (*deep learning* et *deep reinforcement learning*).

Annexe A

Exemples de matrices d'adjacences

On considère la zone d'opération suivante sous forme de grille carrée 5x5 dont le centre des cases représente des *waypoints* :

0	1	2	3	4
5	6	7	8	9
10	11	12	13	14
15	16	17	18	19
20	21	22	23	24

Bibliographie

- [1] Déclaration sur la stratégie ministérielle de maîtrise des fonds marins. <https://www.vie-publique.fr/discours/283847-florence-parly-14022022-maitrise-des-fonds-marins>. à Paris le 14 février 2022.
- [2] Oceanops. <https://www.ocean-ops.org/board>, 2001. Accessed : 2023-08-31.
- [3] Haversine formulas. <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>, 2002. Accessed : 2022-08-02.
- [4] Or-tools routing options. https://developers.google.com/optimization/routing/routing_options#first_solution_strategy, 2010. Accessed : 2023-03-17.
- [5] Emodnet database. <https://emodnet.ec.europa.eu/en/bathymetry>, 2011. Accessed : 2022-08-02.
- [6] Seaexplorer specifications. <https://www.alseamar-alcen.com/products/underwater-glider/seaexplorer>, 2014. Accessed : 2022-08-02.
- [7] Global water current model - global_analysis_forecast_phy_001_024. <https://doi.org/10.48670/moi-00016>, 2015. Accessed : 2022-08-02.
- [8] Marine copernicus database. <https://resources.marine.copernicus.eu/products>, 2015. Accessed : 2022-08-02.
- [9] Mediterranean sea physics analysis and forecast - medsea_analysisforecast_phy_006_013. https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_006_013_EAS7, 2015. Accessed : 2023-05-10.
- [10] Ctds for gliders developped by rbr. https://rbr-global.com/products/ctd_gliders_auvs/, 2023. Accessed : 2023-08-13.
- [11] Glider payload ctd (gpctd). <https://www.seabird.com/glider-payload-ctd-gpctd/product?id=60762467712#:~:text=The%20GPCTD%20is%20a%20modular,opportunities%20from%20operational%20vehicle%20missions.>, 2023. Accessed : 2023-08-13.
- [12] Portland. <https://www.portland-bateau.com/>, 2023. Accessed : 2023-08-13.

- [13] ALVAREZ, A., AND MOURRE, B. Cooperation or coordination of underwater glider networks? an assessment from observing system simulation experiments in the ligurian sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 31, 10 (2014), 2268 – 2277.
- [14] AVI, T. K. *Glider mission planning using generic solvers*. PhD thesis, Memorial University of Newfoundland, 2014.
- [15] BARBIER, M., BENSANA, E., DOOSE, D., BESSON, F., LE PAGE, Y., AND LEOPOLDOFF, M. A mission management system for a fleet of gliders. In *OCEANS 2019 - Marseille* (06 2019), pp. 1–6.
- [16] BARTUMEUS, F., DA LUZ, M. G. E., VISWANATHAN, G. M., AND CATALÁN, J. Animal search strategies : A quantitative random-walk analysis. *Ecology* 86 (2005), 3078–3087.
- [17] BELLICOSO, C. D., JENELTEN, F., GEHRING, C., AND HUTTER, M. Dynamic locomotion through online nonlinear motion optimization for quadrupedal robots. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3, 3 (2018-07), 2261 – 2268.
- [18] BELLINGHAM, J. G., AND RAJAN, K. Robotics in remote and hostile environments. *Science* 318, 5853 (2007), 1098–1102.
- [19] BESSON, F., DE FOMMERVAULT, O., ROMERO, J., BARBIER, M., BENSANA, E., DOOSE, D., LEOPOLDOF, M., AND LARRASOAIN, S. A centralized web-based platform for combined glider and satellite observation analysis. In *OCEANS 2019 - Marseille* (2019), pp. 1–5.
- [20] BOEUF, D., EDWARDS, B. R., EPPLEY, J. M., HU, S. K., POFF, K. E., ROMANO, A. E., CARON, D. A., KARL, D. M., AND DELONG, E. F. Biological composition and microbial dynamics of sinking particulate organic matter at abyssal depths in the oligotrophic open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 24 (2019), 11824–11832.
- [21] BONDY, J. A., AND MURTY, U. S. R. *Graph Theory with Applications*. American Elsevier, New York, 1976, ch. 1.
- [22] BOURRIN, F., MANY, G., DURRIEU DE MADRON, X., MARTÍN, J., PUIG, P., HOUPERT, L., TESTOR, P., KUNESCH, S., MAHIOUZ, K., AND BÉGUERY, L. Glider monitoring of shelf suspended particle dynamics and transport during storm and flooding conditions. *Continental Shelf Research* 109 (2015), 135–149.
- [23] BREIER, J., JAKUBA, M., SAITO, M., DICK, G., GRIM, S., CHAN, E., MCILVIN, M., MORAN, D., ALANIS, B., ALLEN, A., DUPONT, C., AND JOHNSON, R. Revealing ocean-scale biochemical structure with a deep-diving vertical profiling autonomous vehicle. *Science Robotics* 5 (11 2020), eabc7104.
- [24] BRIERLEY, A., FERNANDES, P., BRANDON, M., ARMSTRONG, E., MILLARD, N., MCPHAIL, S., STEVENSON, P., PEBODY, M., PERRETT, J., SQUIRES, M., BONE,

- D., AND GRIFFITHS, G. Antarctic krill under sea ice : Elevated abundance in a narrow band just south of ice edge. *Science (New York, N.Y.)* 295 (04 2002), 1890–2.
- [25] CAI, J., ZHANG, F., SUN, S., AND LI, T. A meta-heuristic assisted underwater glider path planning method. *Ocean Engineering* 242 (2021), 110121.
- [26] CAO, W., AND YANG, W. A survey of vehicle routing problem. *MATEC Web of Conferences* 100 (01 2017), 01006.
- [27] CHARTRAND, G., AND ZHANG, P. *Introduction to Graph Theory*. Walter Rudin student series in advanced mathematics. McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [28] CHEN, J., JIA, B., AND ZHANG, K. Trifocal tensor-based adaptive visual trajectory tracking control of mobile robots. *IEEE Transactions on Cybernetics* 47, 11 (2017), 3784–3798.
- [29] CHOSET, H., AND PIGNON, P. Coverage path planning : The boustrophedon cellular decomposition. In *Field and Service Robotics* (London, 1998), A. Zelinsky, Ed., Springer London, pp. 203–209.
- [30] CHUTIA, S., KAKOTY, N. M., AND DEKA, D. A review of underwater robotics, navigation, sensing techniques and applications. *Proceedings of the Advances in Robotics* (2017), 1–6.
- [31] CIEŚLAK, P. Stonefish : An advanced open-source simulation tool designed for marine robotics, with a ros interface. *OCEANS 2019 - Marseille* (2019), 1–6.
- [32] CODEVILLA, F., MÜLLER, M., DOSOVITSKIY, A., LÓPEZ, A. M., AND KOLTUN, V. End-to-end driving via conditional imitation learning. *CoRR abs/1710.02410* (2017).
- [33] DANG, T., LAPIERRE, L., ZAPATA, R., ROPARS, B., AND GOURMELEN, G. A dynamically reconfigurable autonomous underwater robot for karst exploration : Design and experiment. *Sensors* 22, 9 (Apr. 2022), 3379.
- [34] DANTZIG, G. B., AND RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. *Management science* 6, 1 (1959), 80–91.
- [35] DIMIDOV, C., ORIOLO, G., AND TRIANNI, V. Random walks in swarm robotics : An experiment with kilobots. In *ANTS Conference* (2016).
- [36] DOSOVITSKIY, A., ROS, G., CODEVILLA, F., LOPEZ, A., AND KOLTUN, V. CARLA : An open urban driving simulator. In *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning* (2017), pp. 1–16.
- [37] DUBISCHAR, C., PAKHOMOV, E., VON HARBOU, L., HUNT, B., AND BATHMANN, U. Salps in the lazarev sea, southern ocean : Ii. biochemical composition and potential prey value. *Marine Biology* 159 (2012), 15–24.
- [38] ERIKSEN, C., OSSE, T., LIGHT, R., WEN, T., LEHMAN, T., SABIN, P., BALLARD, J., AND CHIODI, A. Seaglider : A long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 (11 2001), 424 – 436.

- [39] FALLON, E. S. Hydroglider, U.S. Patent US3204596A, Sept. 7, 1965.
- [40] FOMMERVAULT, O., BESSON, F., AND LATTES, P. Seaexplorer underwater glider : A new tool to measure water velocity. *Marine technology* (10 2018).
- [41] FOSSEN, T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, 2011, ch. 2, pp. 15–44.
- [42] FURNON, V., AND PERRON, L. Google or-tools routing library. <https://developers.google.com/optimization/routing/>, 2023-08-08. v9.7.
- [43] GABRIELY, Y., AND RIMON, E. D. Spanning-tree based coverage of continuous areas by a mobile robot. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 31 (2001), 77–98.
- [44] GALCERAN, E. *Coverage path planning for autonomous underwater vehicles*. PhD thesis, University of Girona, 2014.
- [45] GALCERAN, E., AND CARRERAS, M. Efficient seabed coverage path planning for asvs and auvs. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2012), pp. 88–93.
- [46] GALCERAN, E., AND CARRERAS, M. Planning coverage paths on bathymetric maps for in-detail inspection of the ocean floor. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2013), pp. 4159–4164.
- [47] GALCERAN, E., AND CARRERAS, M. A survey on coverage path planning for robotics. *Robotics and Autonomous systems* 61, 12 (2013), 1258–1276.
- [48] GALERNE, E. Epaulard roV used in noaa polymetallic sulfide research. *Sea Technology* 24, 11 (1983), 40–42.
- [49] GARAU, B., ALVAREZ, A., AND OLIVER, G. Path planning of autonomous underwater vehicles in current fields with complex spatial variability : an a* approach. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2005), pp. 194–198.
- [50] GERMAN, C. R., YOERGER, D. R., JAKUBA, M., SHANK, T. M., LANGMUIR, C. H., AND ICHI NAKAMURA, K. Hydrothermal exploration with the autonomous benthic explorer. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers* 55, 2 (2008), 203–219.
- [51] GLENN, S., JONES, C., TWARDOWSKI, M., BOWERS, L., KERFOOT, J., KOHUT, J., WEBB, D., AND SCHOFIELD, O. Glider observations of sediment resuspension in a middle atlantic bight fall transition storm. *Limnology and Oceanography* 53 (06 2008), 18.
- [52] GONZALEZ, R. C., AND WOODS, R. E. *Digital image processing*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2008.
- [53] GONZÁLEZ, F., RINCÓN-TOMÁS, B., SOMOZA, L., SANTOFIMIA, E., MEDIALDEA, T., MADUREIRA, P., LÓPEZ-PAMO, E., HEIN, J., MARINO, E., DE IGNACIO, C., REYES,

- J., HOPPERT, M., AND REITNER, J. Low-temperature, shallow-water hydrothermal vent mineralization following the recent submarine eruption of tagoro volcano (el hierro, canary islands). *Marine Geology* 430 (2020), 106333.
- [54] GRANDE, D., HUANG, L., HARRIS, C. A., WU, P., THOMAS, G., AND ANDERLINI, E. Open-source simulation of underwater gliders. In *OCEANS 2021 : San Diego – Porto* (2021), pp. 1–8.
- [55] HADI, B., KHOSRAVI, A., AND SARHADI, P. Deep reinforcement learning for adaptive path planning and control of an autonomous underwater vehicle. *Applied Ocean Research* 129 (2022), 103326.
- [56] HAN, G., ZHOU, Z., ZHANG, T., WANG, H., LIU, L., PENG, Y., AND GUIZANI, M. Ant-colony-based complete-coverage path-planning algorithm for underwater gliders in ocean areas with thermoclines. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69, 8 (2020), 8959–8971.
- [57] HAZON, N., AND KAMINKA, G. A. Redundancy, efficiency, and robustness in multi-robot coverage. In *ICRA-05* (2005).
- [58] HE, Y., WANG, D. B., AND ALI, Z. A. A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. *Measurement and Control* 53, 9-10 (2020), 1561–1570.
- [59] IMANBERDIYEV, N., FU, C., KAYACAN, E., AND CHEN, I.-M. Autonomous navigation of uav by using real-time model-based reinforcement learning. *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)* (2016), 1–6.
- [60] JACOX, M., EDWARDS, C., KAHRU, M., RUDNICK, D., AND KUDELA, R. The potential for improving remote primary productivity estimates through subsurface chlorophyll and irradiance measurement. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography* 112 (12 2013).
- [61] JI, H., HU, H., AND PENG, X. Multi-underwater gliders coverage path planning based on ant colony optimization. *Electronics* 11, 19 (2022).
- [62] JUANG, C.-F., AND YEH, Y.-T. Multiobjective evolution of biped robot gaits using advanced continuous ant-colony optimized recurrent neural networks. *IEEE Transactions on Cybernetics* 48, 6 (2018), 1910–1922.
- [63] JÜNGER, M., REINELT, G., AND RINALDI, G. Chapter 4 the traveling salesman problem. In *Network Models*, vol. 7 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Elsevier, 1995, pp. 225–330.
- [64] KEGELEIRS, M., GARZÓN RAMOS, D., AND BIRATTARI, M. Random walk exploration for swarm mapping. In *Towards Autonomous Robotic Systems* (Cham, 2019), K. Althoefer, J. Konstantinova, and K. Zhang, Eds., Springer International Publishing, pp. 211–222.

- [65] KOENIG, N., AND HOWARD, A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)* (2004), vol. 3, pp. 2149–2154 vol.3.
- [66] KORTE, B. H., VYGEN, J., KORTE, B., AND VYGEN, J. *Combinatorial optimization*, vol. 1. Springer, 2011.
- [67] KULARATNE, D., BHATTACHARYA, S., AND HSIEH, M. A. Going with the flow : A graph based approach to optimal path planning in general flows. *Auton. Robots* 42, 7 (oct 2018), 1369–1387.
- [68] LAN, W., JIN, X., CHANG, X., WANG, T., ZHOU, H., TIAN, W., AND ZHOU, L. Path planning for underwater gliders in time-varying ocean current using deep reinforcement learning. *Ocean Engineering* 262 (2022), 112226.
- [69] LAN, W., JIN, X., WANG, T., AND ZHOU, H. Improved rrt algorithms to solve path planning of multi-glider in time-varying ocean currents. *IEEE Access* 9 (2021), 158098–158115.
- [70] LAPORTE, G. The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research* 59, 3 (1992), 345–358.
- [71] LAPORTE, G., AND NOBERT, Y. Exact algorithms for the vehicle routing problem. *North-holland Mathematics Studies* 132 (1987), 147–184.
- [72] LAURENT, C. MOOSE (DYFAMED), 2008.
- [73] LEKIEN, F., MORTIER, L., AND TESTOR, P. Glider coordinated control and lagrangian coherent structures. *IFAC Proceedings Volumes* 41, 1 (2008), 125–130. 2nd IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles.
- [74] LEONARD, N. E., PALEY, D. A., DAVIS, R. E., FRATANTONI, D. M., LEKIEN, F., AND ZHANG, F. Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in monterey bay. *Journal of Field Robotics* 27, 6 (2010), 718–740.
- [75] LIU, X., AND GONG, D. A comparative study of a-star algorithms for search and rescue in perfect maze. *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering* (2011), 24–27.
- [76] LIU, X., MA, D., YANG, M., XIA, X., AND GUO, P. Modified block a* path-planning method for hybrid-driven underwater gliders. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 47, 1 (2022), 20–31.
- [77] LUDVIGSEN, M., AND SØRENSEN, A. J. Towards integrated autonomous underwater operations for ocean mapping and monitoring. *Annual Reviews in Control* 42 (2016), 145–157.

- [78] MA, X., WANG, Y., ZHANG, G., YANG, S., AND LI, S. Discrete-time formation control of multiple heterogeneous underwater gliders. *Ocean Engineering* 258 (2022), 111728.
- [79] MAHDOUI, N., FRÉMONT, V., AND NATALIZIO, E. Communicating Multi-UAV System for Cooperative SLAM-based Exploration. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 98, 2 (Nov. 2019), 325–343.
- [80] MANHÃES, M. M. M., SCHERER, S. A., VOSS, M., DOUAT, L. R., AND RAUSCHENBACH, T. Uuv simulator : A gazebo-based package for underwater intervention and multi-robot simulation. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey* (2016), 1–8.
- [81] MERCI, A., ANTHIERENS, C., THIRION-MOREAU, N., AND LE PAGE, Y. A simulator of underwater glider missions for path planning. *Ocean Engineering* 269 (2023), 113514.
- [82] MEURER, W. P., BLUM, J., AND SHIPMAN, G. Volumetric Mapping of Methane Concentrations at the Bush Hill Hydrocarbon Seep, Gulf of Mexico. *Frontiers in Earth Science* 9 (Aug. 2021), 747.
- [83] MEYER, D. Glider technology for ocean observations : A review. *Ocean Science Discussions* 2016 (2016), 1–26.
- [84] MICHEL, O. Cyberbotics ltd. webots™ : Professional mobile robot simulation. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 1, 1 (2004), 5.
- [85] MOLINE, M. A., WOODRUFF, D. L., AND EVANS, N. R. Optical delineation of benthic habitat using an autonomous underwater vehicle. *Journal of Field Robotics* 24, 6 (2007), 461–471.
- [86] NAKAMURA, K., TOKI, T., MOCHIZUKI, N., ASADA, M., ICHIRO ISHIBASHI, J., NOGI, Y., YOSHIKAWA, S., ICHI MIYAZAKI, J., AND OKINO, K. Discovery of a new hydrothermal vent based on an underwater, high-resolution geophysical survey. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers* 74 (2013), 1–10.
- [87] NAKATANI, T., URA, T., ITO, Y., KOJIMA, J., TAMURA, K., SAKAMAKI, T., AND NOSE, Y. Auv "tuna-sand" and its exploration of hydrothermal vents at kagoshima bay. In *OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean* (2008), pp. 1–5.
- [88] NASH, A., DANIEL, K., KOENIG, S., AND FELNER, A. Theta* : Any-angle path planning on grids. In *AAAI Conference on Artificial Intelligence* (2007).
- [89] OUSINGSAWAT, J., AND EARL, M. G. Modified lawn-mower search pattern for areas comprised of weighted regions. In *2007 American Control Conference* (2007), pp. 918–923.
- [90] PAN, C., ZHENG, L., WEISBERG, R. H., LIU, Y., AND LEMBKE, C. E. Comparisons of different ensemble schemes for glider data assimilation on West Florida Shelf. *Ocean Modelling* 81 (Sept. 2014), 13–24.

- [91] PANDA, M., DAS, B., SUBUDHI, B., AND PATI, B. A comprehensive review of path planning algorithms for autonomous underwater vehicles. *International Journal of Automation and Computing* 17 (01 2020).
- [92] PARK, J., KIM, T., AND KIM, J. Model-referenced pose estimation using monocular vision for autonomous intervention tasks. *Autonomous Robots* 44 (01 2020), 1–12.
- [93] PELLAND, N. A., STERLING, J. T., LEA, M.-A., BOND, N. A., REAM, R. R., LEE, C. M., AND ERIKSEN, C. C. Fortuitous encounters between seagliders and adult female northern fur seals (*Callorhinus ursinus*) off the Washington (USA) coast : Upper ocean variability and links to top predator behavior. *PLoS ONE* 9, 8 (Aug. 2014), e101268.
- [94] PÉREZ, J., SALES, J., PRATS, M., MARTÍ, J. V., FORNAS, D., MARÍN, R., AND SANZ, P. J. The underwater simulator uwsim - benchmarking capabilities on autonomous grasping. In *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* (2013).
- [95] PESSOA, A., SADYKOV, R., UCHOA, E., AND VANDERBECK, F. A generic exact solver for vehicle routing and related problems. *Mathematical Programming* 183 (06 2020), 483–523.
- [96] PETILLOT, Y. R., ANTONELLI, G., CASALINO, G., AND FERREIRA, F. Underwater robots : From remotely operated vehicles to intervention-autonomous underwater vehicles. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26, 2 (2019), 94–101.
- [97] PHILIP, B. T., DENNY, A. R., SOLOMON, E. A., AND KELLEY, D. S. Time-series measurements of bubble plume variability and water column methane distribution above southern hydrate ridge, Oregon. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 17, 3 (2016), 1182–1196.
- [98] PHOEMSAPTHAWEE, S., LE BOULLUEC, M., LAURENS, J.-M., AND DENISET, F. An underwater glider flight simulator. *Journal of Marine Science and Application* 12 (03 2013).
- [99] PIETRI, A., ECHEVIN, V., TESTOR, P., CHAIGNEAU, A., MORTIER, L., GRADOS, C., AND ALBERT, A. Impact of a coastal-trapped wave on the near-coastal circulation of the Peru upwelling system from glider data. *Journal of Geophysical Research : Oceans* 119, 3 (Mar. 2014), 2109–2120.
- [100] PIETRI, A., TESTOR, P., ECHEVIN, V., CHAIGNEAU, A., MORTIER, L., EL-DIN, G., AND GRADOS, C. Finescale vertical structure of the upwelling system off southern Peru as observed from glider data. *Journal of Physical Oceanography* 43, 3 (2013), 631 – 646.
- [101] POWELL, J. R., AND OHMAN, M. D. Changes in zooplankton habitat, behavior, and acoustic scattering characteristics across glider-resolved fronts in the Southern California Current System. *Progress in Oceanography* 134 (May 2015), 77–92.

- [102] PRATS, M., PÉREZ, J., FERNANDEZ, J. J., AND SANZ, P. J. An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions. *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2012), 2577–2582.
- [103] PRESS, W., TEUKOLSKY, S., VETTERLING, W., AND FLANNERY, B. Numerical recipes in fortran : The art of scientific computing, 2nd ed. *Cambridge, UK, Cambridge University Press* (1992), 710.
- [104] RAHMAN, M. S., AND KAYKOBAD, M. On hamiltonian cycles and hamiltonian paths. *Information Processing Letters* 94, 1 (2005), 37–41.
- [105] RATH, A. K., PARHI, D. R., DAS, H. C., MUNI, M. K., AND KUMAR, P. B. Analysis and use of fuzzy intelligent technique for navigation of humanoid robot in obstacle prone zone. *Defence Technology* 14, 6 (2018), 677–682.
- [106] RENZAGLIA, A., DIBANGOYE, J., DOZE, V. L., AND SIMONIN, O. A common optimization framework for multi-robot exploration and coverage in 3d environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 100, 3-4 (Sept. 2020), 1453–1468.
- [107] ROBERTS, H., SHEDD, W., AND HUNT, J. Dive site geology : Dsv alvin (2006) and rovs jason ii (2007) dives to the middle-lower continental slope, northern gulf of mexico. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography* 57, 21 (2010), 1837–1858. Gulf of Mexico Cold Seeps.
- [108] ROSSBY, T. On gyre interactions. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography* 46, 1 (1999), 139–164.
- [109] SALGADO-JIMENEZ, T., GONZALEZ-LOPEZ, J. L., PEDRAZA-ORTEGA, J. C., GARCÍA-VALDOVINOS, L. G., MARTÍNEZ-SOTO, L. F., AND RESENDIZ-GONZALEZ, P. A. Design of rovs for the mexican power and oil industries. In *2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry* (2010), pp. 1–8.
- [110] SCHAEFFER, A., ROUGHAN, M., JONES, E. M., AND WHITE, D. Physical and biogeochemical spatial scales of variability in the east australian current separation from shelf glider measurements. *Biogeosciences* 13, 6 (2016), 1967–1975.
- [111] SCHMITTLE, M., LUKINA, A., VACEK, L., DAS, J., BUSKIRK, C. P., REES, S., SZTIPANOVITS, J., GROSU, R., AND KUMAR, V. Openuav : A uav testbed for the cps and robotics community. In *2018 ACM/IEEE 9th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs)* (2018), pp. 130–139.
- [112] SHAH, S., DEY, D., LOVETT, C., AND KAPOOR, A. Airsim : High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles. *CoRR abs/1705.05065* (2017).
- [113] SHERMAN, J. T., DAVIS, R. E., OWENS, W. B., AND VALDES, J. R. The autonomous underwater glider "spray". *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 (2001), 437–446.
- [114] SONG, Y., NAJI, S., KAUFMANN, E., LOQUERCIO, A., AND SCARAMUZZA, D. Flightmare : A flexible quadrotor simulator. *CoRR abs/2009.00563* (2020).

- [115] SOUBRIER, J.-B. Les fonds océaniques, un espace stratégique pour les armées françaises. *Revue Défense Nationale N° Hors-série*, HS4 (Sept. 2021), 125–138.
- [116] STEINBERG, D. K., CARLSON, C. A., BATES, N. R., JOHNSON, R. J., MICHAELS, A. F., AND KNAP, A. H. Overview of the us jgofs bermuda atlantic time-series study (bats) : a decade-scale look at ocean biology and biogeochemistry. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography* 48, 8 (2001), 1405–1447.
- [117] STENTZ, A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1994), pp. 3310–3317 vol.4.
- [118] STEWART, R. H. *Introduction to physical oceanography*. Robert H. Stewart, 2008, ch. 1.
- [119] STOMMEL, H. The slocum mission. *Oceanography* (April 1989).
- [120] SUBRAMANI, D. N., HALEY JR., P. J., AND LERMUSIAUX, P. F. J. Energy-optimal path planning in the coastal ocean. *Journal of Geophysical Research : Oceans* 122, 5 (2017), 3981–4003.
- [121] TAHIR, A., AND IQBAL, J. Underwater robotic vehicles : Latest development trends and potential challenges. *Science International* 26 (01 2014), 1111–1117.
- [122] TAI, L., PAOLO, G., AND LIU, M. Virtual-to-real deep reinforcement learning : Continuous control of mobile robots for mapless navigation. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2017), IEEE Press, p. 31–36.
- [123] TAKAYA, K., ASAI, T., KROUMOV, V., AND SMARANDACHE, F. Simulation environment for mobile robots testing using ros and gazebo. *2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)* (2016), 96–101.
- [124] TAN, C. S., MOHD-MOKHTAR, R., AND ARSHAD, M. R. A comprehensive review of coverage path planning in robotics using classical and heuristic algorithms. *IEEE Access* 9 (2021), 119310–119342.
- [125] TERRACCIANO, D. S., BAZZARELLO, L., CAITI, A., COSTANZI, R., AND MANZARI, V. Marine robots for underwater surveillance. *Current Robotics Reports* 1 (2020), 159–167.
- [126] TODD, R., OWENS, W., AND RUDNICK, D. Potential vorticity structure in the north atlantic western boundary current from underwater glider observations. *Journal of Physical Oceanography* 46 (11 2015), 151120155336008.
- [127] TOTH, P., AND VIGO, D. An overview of vehicle routing problems. *The vehicle routing problem* (2002), 1–26.
- [128] WEBB, D., SIMONETTI, P., AND JONES, C. Slocum : An underwater glider propelled by environmental energy. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 (11 2001), 447 – 452.

- [129] WEN, H., ZHOU, H., FU, J., ZHANG, X., YAO, B., AND LIAN, L. Consensus protocol based attitudes coordination control for underwater glider formation. *Ocean Engineering* 262 (2022), 112307.
- [130] WILLIAMS, S. B., AND MAHON, I. Simultaneous localisation and mapping on the great barrier reef. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 2* (2004), 1771–1776 Vol.2.
- [131] WINKLER, A. W., BELLICOSO, C. D., HUTTER, M., AND BUCHLI, J. Gait and trajectory optimization for legged systems through phase-based end-effector parameterization. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3, 3 (2018), 1560–1567.
- [132] WU, R. The application of dynamic programming in production planning. *AIP Conference Proceedings* 1839, 1 (2017), 020155.
- [133] WU, Y., AND WANG, J. *Algorithm Design Practice for Collegiate Programming Contests and Education*. CRC Press, Nov. 2018.
- [134] YOERGER, D., BRADLEY, A., WALDEN, B., CORMIER, M.-H., AND RYAN, W. Fine-scale seafloor survey in rugged deep-ocean terrain with an autonomous robot. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)* (2000), vol. 2, pp. 1787–1792 vol.2.
- [135] YOERGER, D. R., BRADLEY, A. M., JAKUBA, M., GERMAN, C. R., SHANK, T. M., AND TIVEY, M. Autonomous and remotely operated vehicle technology for hydrothermal vent discovery, exploration, and sampling. *Oceanography issue volume* (March 2007).
- [136] ZHANG, J., TAI, L., XIONG, Y., LIU, M., BOEDECKER, J., AND BURGARD, W. VR goggles for robots : Real-to-sim domain adaptation for visual control. *CoRR abs/1802.00265* (2018).
- [137] ZHAO, J., WANG, X., ZHANG, G., NERI, F., JIANG, T., GHEORGHE, M., IPATE, F., AND LEFTICARU, R. Design and implementation of membrane controllers for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots. *Integrated Computer Aided Engineering* 23 (10 2015).
- [138] ZHU, D., TIAN, C., SUN, B., AND LUO, C. Complete coverage path planning of autonomous underwater vehicle based on gbnn algorithm. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 94 (04 2019).

Aurélien MERCI

COncception de Systèmes Mécaniques et Robotiques & Laboratoire d'Informatique et Systèmes, Université de Toulon

Coopération de flotte de planeurs sous-marins à des fins de GHOM et LSM

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse Cifre-Défense portent sur le développement d'outils permettant une coopération entre plusieurs planeurs sous-marins afin de répondre à un besoin d'acquisition de données sur des zones à très larges échelles spatio-temporelles. Notre objectif est d'assurer la couverture géographique d'une zone d'intérêt pouvant inclure des zones d'exclusion, de manière optimale en durée de mission, distance parcourue ou d'énergie consommée par la flotte avec une contrainte liée à l'utilisation de ce type d'engin sous-marin : l'asynchronisme des communications entre les différents engins composant la flotte. L'approche développée consiste en la conception d'un simulateur de mission afin d'en extraire les principales grandeurs d'intérêt dans le pilotage des planeurs : l'énergie consommée, le temps et la distance parcourue. Dans un second temps, nous avons développé une méthode originale reposant sur la théorie des graphes pondérés consistant à minimiser différentes fonctions de coût construites à partir de ces grandeurs dans le but d'optimiser les trajectoires de chaque planeur de la flotte ainsi que le profil de vol du planeur dans la colonne d'eau. Les intérêts et les apports de la méthode ont été confirmés à l'aide d'une mission expérimentale réelle en mer Méditerranée.

mots clés : Planeurs sous-marins, modélisation, simulation, planification de trajectoires

Cooperation of a fleet of underwater gliders for GHOM and LSM applications

The work carried out in this Cifre-Défense thesis focuses on the development of tools enabling the cooperation between several underwater gliders of a fleet in order to fulfil a data acquisition requirement over areas with very large spatio-temporal scales. Our objective is to ensure the geographical coverage of an area of interest, which may include exclusion zones, in an optimal way in terms of mission duration, distance covered or energy consumed by the fleet, with a constraint related to the use of this type of underwater vehicle : asynchronous communications between the different vehicles of the fleet. The approach we developed consisted in designing a mission simulator to extract the main variables of interest in the piloting of gliders : energy consumed, time and distance travelled. Secondly, we developed an original method based on the theory of weighted graphs, which consists of minimising various cost functions constructed from these variables in order to optimise the trajectories of each glider in the fleet and the glider's flight profile in the water column. The interests and contributions of the method were confirmed using a real experimental mission in the Mediterranean Sea.

keywords: Underwater gliders, modelling, simulation, path planning

