

CORINA : COMMUNICATION PAR RELAIS INTERMÉDIAIRES NAVALS AUTONOMES

NATHAN FOURNIOL

ENCADRANTS : Luc Jaulin, Pierre-Jean Bouvet, Andreas Arnold.



RÉSUMÉ

Récupérer des données collectées par des capteurs sous-marin présente un défi complexe en raison : des grands volumes de données impliquées, de la distance entre le lieu de collecte et de récolte, et d'un environnement ne favorisant pas le transport de large volume au moyen de solutions traditionnelles : communications acoustiques et optiques, ou avec un spectre dans les radios fréquences. En effet, pour la première, les débits sont trop faibles et pour les seconds, ce sont les portées de communication qui sont trop faibles.

Cette thèse explore ainsi l'utilisation d'*Autonomous Underwater Vehicle* (Véhicule Autonome Sous-Marin) (AUV) et les idées derrière le concept de *data muling* pour surmonter ces obstacles. La solution proposée implique des agents mobiles, appelés *data mules*, qui tirent avantage des moyens de communication faible portée pour collecter les données récoltés par les capteurs et les transportent physiquement.

Nous nous sommes intéressés à deux architectures de *data muling*, linéaire et circulaire. Nous avons développé un modèle pour chacune afin de nous permettre de les évaluer. Nous les avons comparées en termes de débit apparent de la liaison et de performances en termes de latence pour le transfert de données sur de longues distances. Nous avons pu mettre en évidence des critères spécifiant leur zone de performance. Les résultats suggèrent que la performance dépend du type de la quantité de données émises, de la qualité de l'interface de communication et de la vitesse d'avance des mules. Nous avons aussi réalisé une expérimentation en surface sur un lac avec deux mules qui nous a permis d'analyser le processus de mise en place de tels scénarios, mais aussi de pouvoir s'interroger sur les performances réelles de tels systèmes. Cette thèse contribue à l'optimisation des communications sous-marines, offrant des idées de solutions pratiques pour récupérer les données collectées par des capteurs, en particulier embarqué sur des AUV ne pouvant faire surface assez régulièrement.

ABSTRACT

Retrieving data collected by underwater sensors poses a complex challenge due to the large volumes of data involved, the distance between the collection and harvesting points, and an environment that does not facilitate the transport of large volumes through traditional solutions such as acoustic and optical communications or the radio frequency spectrum. Indeed, for the former, the data rates are too low, and for the latter, it is the communication ranges that are too short.

This thesis explores the use of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) and concepts behind *data muling* to overcome these obstacles. The proposed solution involves mobile agents, called *data mules*, which take advantage of low-range communication means to collect data gathered by sensors and physically transport them.

We have investigated two *data muling* architectures, linear and circular, and developed a model for each to evaluate them. We compared them in terms of the apparent link throughput and performance in terms of latency for data transfer over long distances. We were able to identify criteria specifying their performance zone. The results suggest that performance depends on the type and quantity of emitted data, the quality of the communication interface, and the speed of advance of the mules.

We also conducted a surface experiment on a lake with two mules, which allowed us to analyze the implementation process of such scenarios and to question the actual performance of such systems. This thesis contributes to the optimization of underwater communications, providing practical solutions for retrieving data collected by sensors, especially those embedded on AUVs that cannot surface regularly.

SOMMAIRE

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.2	Véhicule d'observations sans équipage	2
1.2.1	La notion d'autonomie	2
1.2.2	L'intérêt des véhicules autonomes	4
1.2.3	Exemple de véhicules d'exploration sans équipage pour observer l'océan	4
1.3	Les missions sous-marines effectuées par un AUV	6
1.3.1	Déroulement d'une mission avec un AUV	8
1.3.2	Panoplie de mission réalisées par un AUV	9
1.3.3	Capteurs montés sur un AUV	10
1.3.4	Le sonar latéral	11
1.3.5	Quantité de données collectées par un sonar	12
1.4	Solutions au transport de données	13
1.5	Plan du manuscrit	15
2	Communications sous-marines	17
2.1	Introduction au chapitre	17
2.2	Théorie de la communication	18
2.2.1	Modèle OSI	18
2.2.2	Couche physique	19
2.2.3	Schéma d'un système de communication	20
2.2.4	Critère de performances	22
2.2.4.1	Portée d'une transmission	22
2.2.4.2	Capacité de canal et débit	23
2.2.4.3	Lien Portée-Débit	24
2.2.4.4	Latence d'une communication	24
2.3	Communication filaire en milieu sous-marin	24
2.3.1	Propagation des ondes	25
2.3.2	Avantages	25
2.3.3	Inconvénients	26
2.4	Communications acoustiques sous-marines	26
2.4.1	Historique	26
2.4.2	Propagation	27
2.4.2.1	Propriété du canal d'acoustique sous-marine	28
2.4.2.2	Autres effets	29
2.4.3	Systèmes de communications acoustiques	31
2.4.3.1	Transducteurs	31
2.4.3.2	Débits et portées	31
2.4.3.3	Utilisation pour le milieu sous-marin	31
2.5	Communications optiques sous-marines	32

2.5.1	Propagation	32
2.5.1.1	Atténuation	33
2.5.1.2	Bruits	34
2.5.2	Systèmes de communications optiques en milieu sous-marin	34
2.5.2.1	Débits	34
2.5.2.2	Utilisation dans le monde sous-marin	35
2.6	Communication par Radio Fréquences	35
2.6.1	Propagation	36
2.6.2	Transmission	36
2.6.2.1	Débits	36
2.6.2.2	Utilisation dans le monde sous-marin	36
2.7	Conclusion du chapitre	36
3	Réseaux sous-marins et <i>data-muling</i>	41
3.1	Introduction au chapitre	41
3.2	Le problème de la collecte de données	41
3.2.1	Vocabulaire et définition	41
3.2.2	Réseau sous-marin	42
3.2.3	Formulation du problème	42
3.2.4	Spécificités des réseaux sous-marins	43
3.2.5	Familles de solution dans la littérature	44
3.2.5.1	Solutions dans le cas des réseaux denses	44
3.2.6	Solutions dans le cas des réseaux clairsemés	45
3.2.7	Synthèse	46
3.3	Le concept de <i>data muling</i>	46
3.3.1	Origine	46
3.3.2	Définitions	47
3.3.3	Critères de performances	47
3.3.4	Travaux précédents sur le data muling	47
3.3.5	Data muling pour le milieu sous-marin	48
3.3.6	Modélisation	48
3.3.6.1	Métriques	48
3.3.6.2	Notations	49
3.3.6.3	Hypothèses	50
3.3.6.4	Modélisation du temps de transmission entre deux agents	50
3.3.7	Muling circulaire	51
3.3.7.1	Initialisation	51
3.3.7.2	Comportement du système	52
3.3.7.3	Temps de déplacement	52
3.3.7.4	Latence	52
3.3.7.5	Temps total	52
3.3.7.6	Énergie consommée	52
3.3.7.7	Cas limites	53
3.3.8	Muling linéaire	53
3.3.8.1	Initialisation	53

3.3.8.2	Comportement du système	54
3.3.8.3	Temps de déplacement	55
3.3.8.4	Temps de latence	55
3.3.8.5	Temps total	56
3.3.8.6	Énergie consommée	56
3.3.8.7	Cas limites du <i>muling</i> linéaire	57
3.3.9	Synthèse	57
3.4	Analyse et comparaison de ces modèles	57
3.4.1	Cas d'une communication directe entre la source et le puits pour la latence	57
3.4.2	Cas de la propagation négligeable	58
3.4.3	Étude du gain pour le <i>data muling</i> linéaire par rapport à une communication directe	58
3.4.3.1	Cas du temps de déplacement faible devant le temps de communication	59
3.4.4	Étude du gain pour le <i>data muling</i> circulaire par rapport à une communication directe	59
3.4.4.1	Cas du temps de déplacement faible devant le temps de communication	60
3.4.5	Comparaison du <i>muling</i> circulaire et linéaire	60
3.4.5.1	Latence et temps total de communication	60
3.4.5.2	Énergie consommée	61
3.4.6	Simulations	61
3.4.7	Synthèse	64
3.5	Conclusion du chapitre	65
4	Expérimenter le <i>data muling</i>	69
4.1	Introduction au chapitre	69
4.2	Introduction à l'expérience	69
4.2.1	Objectif	69
4.2.2	Choix d'expérimentation	69
4.3	Communication entre les agents	70
4.4	Outils et notation	71
4.4.1	Repères et changements de repères	71
4.4.2	Projection	72
4.4.3	Fonction "dent de scie" (<i>sawtooth</i>)	72
4.5	Source et Puits	72
4.6	Des DDboats comme mules	73
4.6.1	Modèle	73
4.6.2	Électronique	76
4.6.2.1	Actionneurs	76
4.6.2.2	Capteurs	76
4.6.3	Mesure de la vitesse de rotation des hélices	77
4.6.4	Estimation du cap suivi	77
4.6.5	Suivi de cap	81
4.6.6	Machine à états	83
4.7	Résultats	84

4.7.1	Description des données	84
4.7.2	Tableaux des résultats et des données	84
4.7.2.1	Au sujet de l'expérimentation pour les scénarios de <i>muling</i> circulaire et linéaire	84
4.7.2.2	Au sujet des simulations pour les scénarios de <i>muling</i> circulaire et linéaire	86
4.7.3	Figures de résultat	86
4.7.4	Résultat des expériences	89
4.7.5	Remarques au sujet des résultats obtenus	89
4.8	Conclusion du chapitre	90
5	Conclusion	93
5.1	Résumé des chapitres	93
5.1.1	Systèmes existants	93
5.1.2	Le concept du <i>data muling</i>	93
5.1.3	Étude des performances	94
5.1.4	Une base d'expérimentation	95
5.2	Contributions	95
5.2.1	Contributions complémentaires	95
5.3	Axes de recherches futurs	96
A	Annexes	99
	Bibliographie	107

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Description des 10 niveaux selon Sheridan pour la catégorisation d'un système autonome. 0 étant un système non autonome et 10 un système complètement autonome.	3
Figure 1.2	Échelle d'autonomie créée par SAE Internationale pour les voitures autonomes adaptée aux drones. Adaptation et traduction personnelle [69]	3
Figure 1.3	Satellite JASON 3 [45]	4
Figure 1.4	Airbus VSR700 - Drone hélicoptère volant à vocation d'être utilisé dans la marine [74] . . .	5
Figure 1.5	Bouée de la société SOFAR adaptée suivant les montages à la mesure de la houle, de la température, de la pression, du bruit sous-marin [75]	6
Figure 1.6	A gauche: SeaExplorer, <i>glider</i> fabriqué par la société ALSEAMAR [3], à droite: Victor 6000 de l'Ifremer, un <i>Remote Operated Vehicle</i> (Véhicule Filaire Sous-Marin) (ROV) capable de descendre à 6 000 m de profondeur [40]	6
Figure 1.7	DriX fabriqué par Exail [42], Sonobot5 de la société Evologics [23], Data Xplorer, <i>Unamned (or Uncrewed) Surface Vehicle</i> (Véhicule de Surface Autonome) (USV) de la société Open Ocean Robotics [88]	7
Figure 1.8	Prototype d'AUV multi-missions AUSS développé par Thales [35]	8
Figure 1.9	USV-AUV Triton de la société Ocean Aero [2]	8
Figure 1.10	Anatomie d'une mission de recherche de cible à l'aide d'un sonar latéral par un AUV	9
Figure 1.11	Schéma illustrant un levé avec un sonar latéral par AUV (crédits: Irène Mopin)	11
Figure 1.12	AUV Daurade (photo prise par Simon Rohou, 2015)	12
Figure 1.13	Étapes d'un scénario de recherche de mines. À gauche sans <i>data muling</i> , à droite avec <i>data muling</i>	15
Figure 2.1	Alphabet des signes pour communiquer entre plongeurs [58]	17
Figure 2.2	Modèles OSI [71]	19
Figure 2.3	Chaîne de communication	20

Figure 2.4	Navire câblé Pierre de Fermat de la société Orange Marine [109]	25
Figure 2.5	Carte de câbles sous-marins [18]	27
Figure 2.6	Source bruit acoustique [27]	30
Figure 2.7	Bruit acoustique par fréquences [78]	30
Figure 2.8	Débit en fonction de la portée pour divers systèmes de communication acoustique [25]	32
Figure 2.9	Éclairement solaire et absorption des ondes lumineuse par l'eau de mer [55]	33
Figure 2.10	Résumé de plusieurs systèmes de communication optique existant [25]	35
Figure 2.11	Résumé de plusieurs systèmes de communication Radio Fréquences (RF) existant [25]	37
Figure 2.12	Centre de transmissions de la Marine nationale de Rosnay [11]	38
Figure 2.13	État de l'art sur la répartition débit-portée dans le cadre d'une communication <i>Single Input Single Output</i> (SISO), données extraites de [25]	39
Figure 3.1	Arbre représentant les différents types de réseau	43
Figure 3.2	Représentation de deux topologies de réseau	44
Figure 3.3	Schéma du <i>muling</i> circulaire	51
Figure 3.4	Schéma du <i>muling</i> linéaire	54
Figure 3.5	Exemple d'initialisation et de fonctionnement pour un système de <i>muling</i> linéaire avec trois mules	55
Figure 3.6	Mise en évidence du temps effectif (le cadre rouge met en évidence les déplacements supplémentaires effectifs à chaque nouveau paquet transporté)	56
Figure 3.7	Variation du débit apparent R_{eq} de l'approche du <i>data muling</i> linéaire en fonction du nombre P de paquets, chaque paquet étant de taille $m = 10000$ MB.	62
Figure 3.8	Variation du débit apparent R_{eq} de l'approche du <i>data muling</i> linéaire en fonction du nombre P de paquets, chaque paquet étant de taille $m = 10000$ MB.	62
Figure 3.9	Variation du temps de transfert de l'approche du <i>data muling</i> linéaire en fonction du nombre P de paquets, chaque paquet étant de taille $m = 10000$ MB.	63
Figure 3.10	Variation du temps de transfert de l'approche du <i>data muling</i> linéaire en fonction du nombre P de paquets, chaque paquet étant de taille $m = 10000$ MB.	64

Figure 3.11	Variation du temps de transfert de l'approche du <i>data muling</i> circulaire en fonction de la taille d'un paquet, pour le transfert de 20 paquets	65
Figure 3.12	Variation du temps de transfert de l'approche du <i>data muling</i> circulaire en fonction de la taille d'un paquet, pour le transfert de 20 paquets	66
Figure 3.13	Variation du temps de transfert de l'approche du <i>data muling</i> circulaire en fonction de la distance entre la source et le puits, pour le transfert de 20 paquets de 10 GB	67
Figure 3.14	Variation du temps de transfert de l'approche du <i>data muling</i> linéaire en fonction de la distance entre la source et le puits, pour le transfert de 20 paquets de 10 GB	67
Figure 4.1	Architecture Client-Serveur des mules représentant les différentes connexions dans le cas d'un scénario linéaire. Dans le cas d'un scénario circulaire, chaque mule n'est reliée qu'au client de la source et au serveur du puits.	70
Figure 4.2	Description des fonctionnalités de l'interface de communication	71
Figure 4.3	Évolution de la fonction <i>sawtooth</i> sur l'intervalle $[-4\pi, 4\pi]$	73
Figure 4.4	Représentation de l'exemple pour l'effet du <i>sawtooth</i> sur la différence d'angle (en pointillé le cercle unité)	74
Figure 4.5	DDboat et sa composition	74
Figure 4.6	Représentation cinématique du DDboat	75
Figure 4.7	Schéma de contrôle du DDboat	82
Figure 4.8	Machine à état pour le choix de l'objectif	83
Figure 4.9	Au sujet du scénario circulaire	87
Figure 4.10	Au sujet du scénario linéaire	88

LISTE DES TABLEAUX

Table 1.1	Résumé qualitatif des avantages des différentes familles de véhicules sous-marins sans équipage	7
Table 1.2	Débit de génération de données pour un sonar exemple	13
Table 2.1	Résumé qualitatif des points forts pour chaque méthode de transmission	38
Table 4.1	Paramètres et résultats suivant les scénarios pour l'expérimentation sur le lac	85
Table 4.2	Paramètres et résultats suivant les scénarios en environnement simulé	86

ACRONYMES

AM	Modulation d'Amplitude.
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i> (Véhicule Autonome Sous-Marin).
BER	<i>Bit Error Rate</i> (Taux d'Erreur Binaire).
DEL	Diode Electro-Luminescente.
DFR	<i>Directional Flooding-based Routing</i> .
DoF	<i>Degrees of Freedom</i> (Degrés de Liberté).
DSR	<i>Dynamic source routing</i> .
ELF	<i>Extremely Low Frequencies</i> (< 3 kHz) (Fréquences Extrêmement Basses).
ENSTA	Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées.
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i> .
FM	Modulation en Fréquence.
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Système de Navigation par Satellite).
HF	<i>High Frequencies</i> (>1 MHz) (Hautes Fréquences).
HH-VBF	Hop-by-Hop Vector Based Forwarding.
HiL	<i>Hardware in the Loop</i> .
IMU	Unité de mesure Inertielle.
LBL	<i>Long Baseline</i> .
MANET	<i>Mobile Ad-hoc Network</i> (Réseau mobile ad-hoc).
MIMO	<i>Multi Input Multi Output</i> .
MULE	<i>Mobile Ubiquitous LAN Extension</i> .
MWSN	<i>Mobile Wireless Sensor Network</i> (Réseau de capteurs mobiles sans fil).
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> .
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i> .
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i> .
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord.
PER	<i>Packet Error Rate</i> (Taux d'Erreur de Paquet).
PoE	<i>Power over Ethernet</i> .
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i> .
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> .

QPSK	<i>Quad Phase-Shift Keying.</i>
RF	Radio Fréquences.
ROV	<i>Remote Operated Vehicle</i> (Véhicule Filaire Sous-Marin).
RPM	Rotation Par Minutes.
SISO	<i>Single Input Single Output.</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Rapport Signal à Bruit).
TCP	<i>Transmission Control Protocol.</i>
TSP	<i>Travelling Salesman Problem</i> (Problème du Voyageur de Commerce).
USBL	<i>Ultra-short Baseline.</i>
USN	<i>Underwater Sensor Network</i> (Réseau de capteurs sous-marin).
USV	<i>Unarmed (or Uncrewed) Surface Vehicule</i> (Véhicule de Surface Autonome).
UWSN	<i>Underwater Wireless Sensor Network</i> (Réseau de Capteurs Sous-Marin Sans Fil).
VBF	<i>Vector-Based Forwarding.</i>
VLF	<i>Very Low Frequencies</i> (3 – 30 kHz) (Très Basses Fréquences).
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity.</i>

NOTATIONS

$m.s^{-1}$	Mètre par seconde.
bps	Bit par seconde.
c	Célérité du son dans le milieu considéré.
$\mathbf{C}_{from}^{to}$	Matrice de rotation.
$circ$	Information relative au scénario circulaire.
$\mathcal{D}$	Désignation du puits.
d	Portée de communication de la mule.
$d_{i\ travel}$	Distance parcourue par la mule i .
$\mathbf{e}$	Vecteur représentant le bruit de mesure du magnétomètre.
E_{com}	Energie nécessaire pour effectuer une communication.
$E_{i\ spent}$	Energie consommée par une mule i .
$\mathbf{E}_{or}$	Matrice représentant la non-orthogonalité des trois axes de mesures du magnétomètre.
$\mathbf{E}_{se}$	Matrice représentant la sensibilité des trois axes du magnétomètre.
$\mathbf{E}_{si}$	Matrice représentant les effets de magnétisme induit (<i>soft iron</i>).
E_{travel}	Energie nécessaire pour effectuer un déplacement d'une unité de distance.
$\mathcal{F}$	Système de référence.
G	Gain.
GB	Gigaoctet.
Gbps	Gigabit par seconde.
Hz	Hertz.
kbps	Kilobit par seconde.
km	Kilomètre.
L	Longueur de l'intervalle dédié à une mule.
M	Quantité totale de donnée à échanger entre la source et le puits.
m	Taille de la mémoire des mules, quantité maximale transférable lors d'une communication.
MB	Mégaoctet.

Mbps	Mégabit par seconde.
$\mathcal{N}$	Ensemble des agents.
$n_{i\ com}$	Nombre de communication effectuée par la mule i .
nav	Système associé au repère de navigation.
nm	Nanomètre.
$\mathbf{o}$	Vecteur représentant un <i>offset</i> de mesure du magnétomètre.
$\mathbf{o}_{bias}$	Vecteur représentant un biais de mesure du magnétomètre.
$\mathbf{o}_{hi}$	Vecteur représentant le biais de mesure du magnétomètre du aux effet de magnétisme permanant (<i>hard iron</i>).
P	Nombre de paquets de données échangées de taille m .
$\vec{p}$	Vecteur de position.
R	Débit de transmission binaire.
r	Portée de communication.
R_{eq}	Débit de transmission apparent.
$\mathcal{S}$	Désignation de la source.
T	Temps.
T_{com}	Temps de communication pour une quantité de donnée.
$T_{latency}$	Temps de latence, pour l'émission d'un paquet entre une source et un puits.
T_{total}	Temps mis pour transférer la totalité des données entre la source et le puits.
T_{travel}	Temps de déplacement d'une mule.
v_{mule}	Vitesse moyenne de déplacement d'une mule.

INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

La surface de notre planète est majoritairement recouverte par l'océan. Il couvre une superficie de 361 millions de kilomètres carrés, soit 70,8% de la surface terrestre [81]. La France a évalué en 2017 la nécessité de mieux connaître nos océans, de disposer de meilleurs outils d'observation, d'analyse et de surveillance. En effet, les enjeux se sont faits d'autant plus pressants pour des raisons géopolitiques, économiques et environnementales [101]. Du point de vue géopolitique, des incidents tels que les détonations sous-marines des gazoducs NordStream 1 et 2, ainsi que les incursions de sous-marins et de bateaux autour des câbles internet sous-marins, soulignent l'importance stratégique de la maîtrise des fonds marins. Sur le plan économique, une meilleure connaissance des océans permettra une gestion raisonnée des activités d'exploitation telles que l'énergie éolienne offshore, l'inspection des installations offshore ou l'exploitation des ressources minières, pétrolières et gazières. Ces connaissances viendront en effet renforcer une réflexion environnementale cruciale afin de préserver de manière durable les écosystèmes marins ainsi que les défis liés aux changements climatiques.

Pourtant, malgré sa prépondérance, l'océan demeure largement inexploré. Le projet Seabed 2030, qui vise une cartographie de l'entièreté des territoires recouverts par l'océan en 2030, estime qu'en 2023 seuls 24.9% des fonds marins ont été cartographiés avec une résolution adéquate permettant l'exploitation des cartes [66]. Cette initiative, rappelle aussi la difficulté de la tâche au niveau des moyens d'observations, des véhicules porteurs de ces moyens d'observation de la surface à couvrir en vertu de l'exigence du milieu marin afin d'obtenir une connaissance exploitable de l'océan.

Cette thèse s'inscrit dans la thématique de l'observation et de la cartographie des fonds marins de manière autonomes et des problématiques qui lui sont liées. En particulier, celle de rapatrier les données depuis son lieu d'observation sous-marine jusqu'à sa disponibilité pour l'exploitation. Cette introduction abordera les véhicules sans équipage porteurs de capteurs pour l'observation de l'océan, qui sera suivi par la présentation des capteurs utilisés. Ensuite, nous décrirons

les particularités des missions d'observation sous-marines à l'aide des AUV pour conclure sur la problématique qui nous intéresse dans cette thèse : la gestion des données observées.

1.2 VÉHICULE D'OBSERVATIONS SANS ÉQUIPAGE

Un des défis de l'exploration et de la compréhension de l'océan est de pouvoir prendre des mesures. Pour cela, les capteurs doivent être mis en œuvre depuis des véhicules sur leur zone de mesure. L'essor de la robotique et de l'automatisation, au XXI^e siècle, a vu l'émergence de nouveaux moyens d'observer l'océan sans présence humaine à leur bord.

1.2.1 La notion d'autonomie

Avant de continuer sur les différents véhicules sans équipages, on peut s'interroger sur le sens à donner à la notion d'autonomie. Cette interrogation a alimenté et alimente encore de nombreuses discussions dans le but convenir d'une échelle permettant d'évaluer l'autonomie d'un véhicule. Le point de départ est la différentiation du terme *automatique* du terme *autonome*. Un système *automatique* désigne un système qui a été programmé pour l'accomplissement d'une ou plusieurs tâches dans un environnement complètement prévisible. Au contraire, un système dit autonome est un système qui sera considéré comme capable d'adapter son comportement à son environnement [14, 54]. Cela étant dit, cette distinction peine à complètement caractériser ce qu'est un robot autonome et reste un peu subjectif. Afin de clarifier les différents niveaux d'autonomie et d'évaluer les robots, plusieurs échelles d'autonomie ont été créées. Selon mes connaissances, la première classification est celle proposée par Thomas B. Sheridan suite à une généralisation de ses travaux sur l'interaction Homme-Machine pour des véhicules sous-marins [94, 95]. Celle-ci est composée des 10 étapes décrites Figure 1.1.

D'autres échelles avec plus ou moins d'étapes sont aussi utilisées. La plus connue est celle liée aux travaux initiés en 2014 par *SAE International* puis repris par la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA), l'agence américaine pour le transport, afin d'évaluer de la maturité d'un véhicule dit "autonome" (i. e. à partir du niveau 3). Elle est composée de 6 niveaux, décrit Figure 1.2. Une autre classification pourrait aussi reprendre la catégorisation fonctionnelle proposée par la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), divisée en 8 étapes pour chacun des 4 domaines : Observe, Oriente, Décide, Agit. Cette échelle est consultable dans les articles [14, 87].

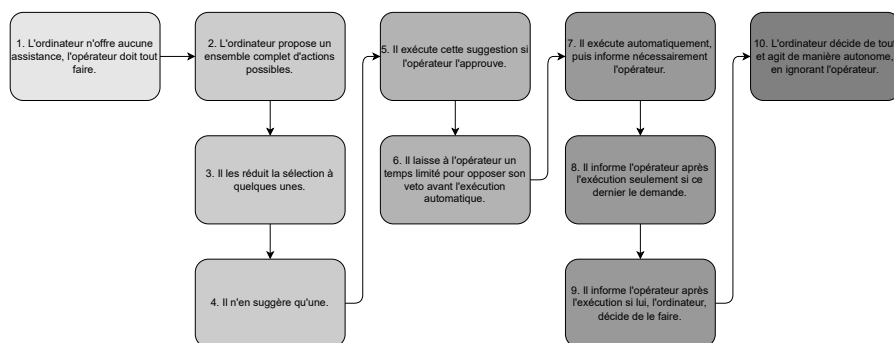


Figure 1.1 – Description des 10 niveaux selon Sheridan pour la catégorisation d'un système autonome. 0 étant un système non autonome et 10 un système complètement autonome.

Niveau d'autonomie	Niveau 0	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Implication de l'humain						
Implication de la machine						
Degré d'autonomie	Pas Autonome	Légèrement Autonome	Partiellement Autonome	Autonome sous condition	Hautement Autonome	Complètement Autonome
Description	Le véhicule est 100% manuel	Le pilote est en contrôle Le véhicule a le contrôle d'au moins une fonction vitale	Le pilote est en contrôle Le véhicule propose une assistance continue et fiable de plusieurs de ses fonctions vitales sous certaines conditions	Le pilote prend le contrôle en secours uniquement Le véhicule a le contrôle de toutes ses fonctions sous certaines conditions	Le pilote est en dehors de la boucle de contrôle Le véhicule a des systèmes de secours, si un failli, la plateforme reste opérationnelle	Le véhicule est pleinement responsable pour effectuer ses tâches sous toutes les conditions
Évitement d'obstacle	NON	PERÇOIT & AVERTIT	PERÇOIT & ÉVITE	PERÇOIT & NAVIGUE		

Figure 1.2 – Échelle d'autonomie créée par SAE Internationale pour les voitures autonomes adaptée aux drones. Adaptation et traduction personnelle [69]

1.2.2 L'intérêt des véhicules autonomes

Les véhicules autonomes trouvent toutes leurs utilités et leur intérêt dès l'instant où les tâches qu'ils ont à réaliser possède une ou plusieurs composantes que l'on peut classer dans les 4 D de la robotique : *Dull*, *Dirty*, *Dangerous*, *Dear* [64, 67]. Cette classification permet de classer les tâches qui ont un intérêt à être automatisée ou automatisée. Ces tâches correspondent à :

- *Dull* : les tâches répétitives et fastidieuses,
- *Dirty* : les tâches salissantes,
- *Dangerous* : les tâches dangereuses,
- *Dear* : lorsque les robots permettent d'améliorer significativement la productivité ou de réduire les coûts.

Ainsi, l'utilisation des véhicules autonomes pour des activités en mer prend son sens dans le fait que beaucoup de tâches sont dangereuses (plongé en grande profondeur), répétitives (rails pour l'observation d'une zone), salissantes (vérification de pipeline), et l'utilisation de véhicules autonomes permet de couvrir plus de surface, de travailler nuit et jour, pas de contrainte de droit du travail.

1.2.3 Exemple de véhicules d'exploration sans équipage pour observer l'océan

On peut citer les différents satellites qui nous permettent d'observer de manière globale nos océans comme le satellite altimétrique JASON (Figure 1.3) [45].

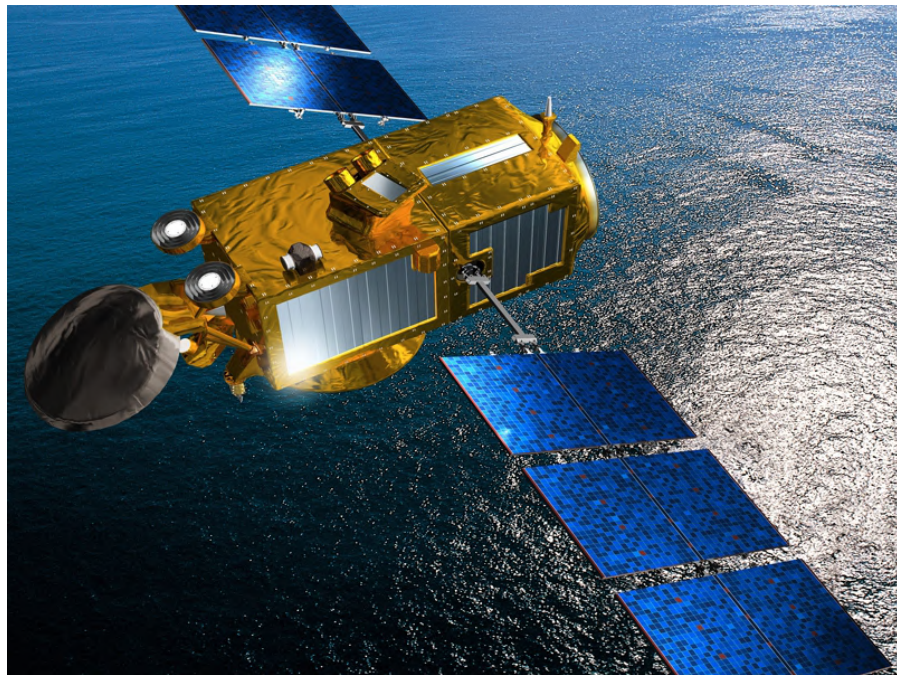


Figure 1.3 – Satellite JASON 3 [45]

À ceux-ci s'ajoutent des vecteurs d'observation plus locaux comme les drones aériens, notamment pour faire de la surveillance des activités en surface (Figure 1.4).



Figure 1.4 – Airbus VSR700 - Drone hélicoptère volant à vocation d'être utilisé dans la marine [74]

Puis il y a aussi les vecteurs de surface, permettant à la fois de faire des observations et des mesures au-dessus de la surface et en dessous suivant les capteurs embarqués. Parmi les véhicules autonomes de surface, on retrouve :

- les USVs: ces véhicules de surfaces représentent la diversité des technologies disponibles, à voile, thermique ou électrique, monocoque ou multicoque (Figure 1.7).
- les bouées dérivantes ou ancrées (Figure 1.5).

Enfin, on retrouve aussi toute une panoplie de véhicules complètement sous-marins:

- les ROVs: des sous-marins qui sont reliés par un câble à un navire de soutien. Ceux-ci peuvent-être télécommandés ou complètement autonomes (Figure 1.6).
- les AUVs: sont quant à eux complètement libres de tout câble pour évoluer sous la surface. Néanmoins, comme les ROVs ils possèdent des actionneurs qui leur permettent d'évoluer dans la colonne d'eau (Figure 1.8).
- les planeurs sous-marins (*gliders*) : sont des véhicules autonomes sous-marins, qui à la différence des deux précédents ne sont pas propulsés. Ils naviguent en planant sous l'eau en faisant varier leur centre de flottaisons.

Afin de finir cette rapide description des moyens robotiques actuellement utilisés, on peut citer quelques créations innovantes comme le

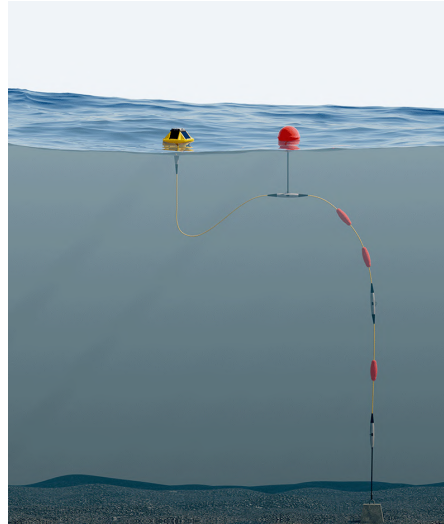


Figure 1.5 – Bouée de la société SOFAR adaptée suivant les montages à la mesure de la houle, de la température, de la pression, du bruit sous-marin [75]

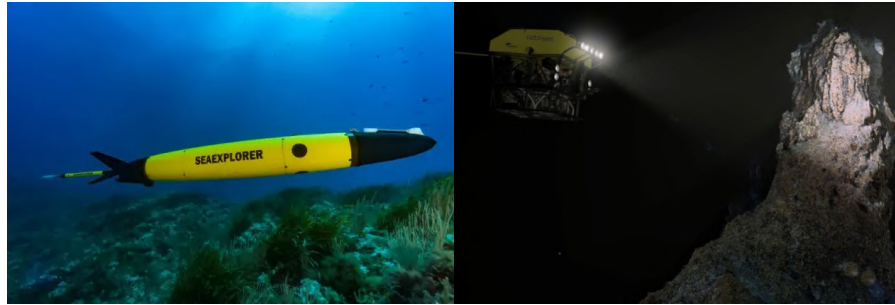


Figure 1.6 – A gauche: SeaExplorer, *glider* fabriqué par la société ALSEAMAR [3], à droite: Victor 6000 de l’Ifremer, un ROV capable de descendre à 6 000 m de profondeur [40]

Triton, un véhicule hybride de surface et sous-marin fabriqué par la société Ocean Aero (Figure 1.9).

Ainsi, il existe plusieurs genres de véhicules sans équipages évoluant, dans les airs, en surface ou sous l’eau. La maturité de la technologie permet aujourd’hui d’imaginer et de réaliser des systèmes mettant en jeu plusieurs drones coopérant entre eux sous forme de meutes, centralisé autour d’un leader ou essaims avec une intelligence collective et décentralisée [17].

1.3 LES MISSIONS SOUS-MARINES EFFECTUÉES PAR UN AUV

Cette thèse se situe dans le contexte d’une mission effectuée au moyen d’un AUV. Après avoir exposé la diversité des véhicules sans équipages permettant l’observation de l’océan, dans cette thèse, nous nous orienterons du côté des AUVs en particulier. Cette section aborde leur contexte d’utilisation, les missions qu’ils réalisent ainsi que les



Figure 1.7 – DriX fabriqué par Exail [42], Sonobot5 de la société Evologics [23], Data Xplorer, USV de la société Open Ocean Robotics [88]

Type de véhicule	Parcourir de longues distances	Retours caméra en direct	Temps de mission	Manœuvrabilité
ROV	- -	++	+	+++
AUV	+	- -	+	-
Planeurs sous-marin	++	- -	+++	- - -

Table 1.1 – Résumé qualitatif des avantages des différentes familles de véhicules sous-marins sans équipage

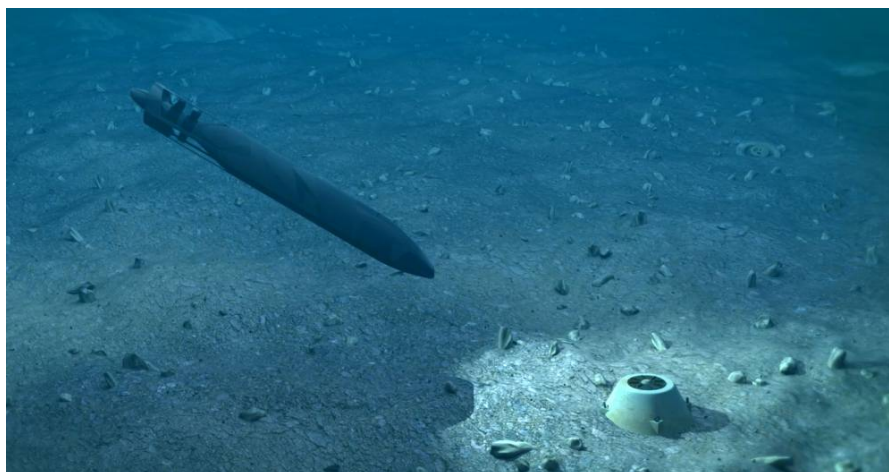


Figure 1.8 – Prototype d’AUV multi-missions AUSS développé par Thales [35]

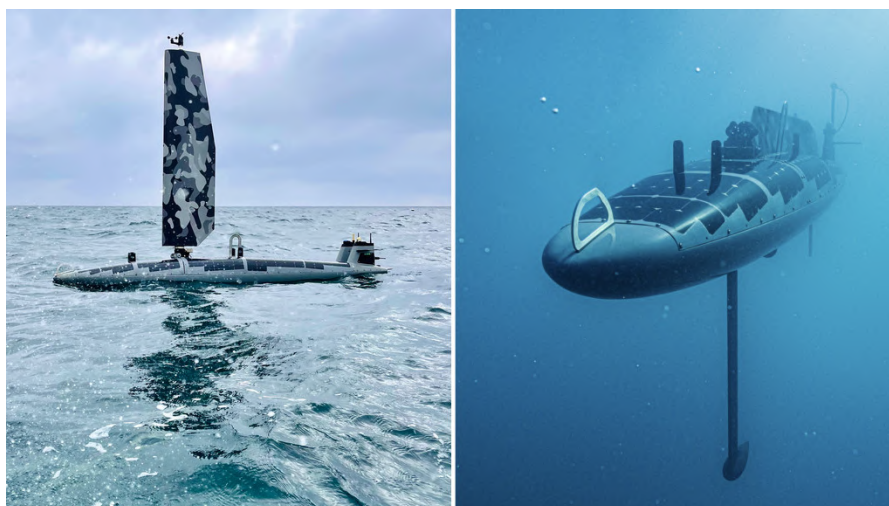


Figure 1.9 – USV-AUV Triton de la société Ocean Aero [2]

principaux capteurs qui sont mis en œuvre par ce vecteur. Enfin, elle expose la problématique particulière du grand volume de données récolté en prenant l’exemple d’un sonar latéral.

1.3.1 Déroulement d’une mission avec un AUV

Les campagnes d’exploration sous-marine ou de recherche de mines se déroulent souvent en cinq étapes (Figure 1.10) :

- l’étape d’initialisation de l’AUV où celui-ci est paramétré pour la mission qu’il devra réaliser,
- l’étape de lancement et de descente de l’AUV pour qu’il atteigne la profondeur voulue,
- la phase de mission a proprement dit,
- une étape ensuite de remonté et de récupération de l’AUV

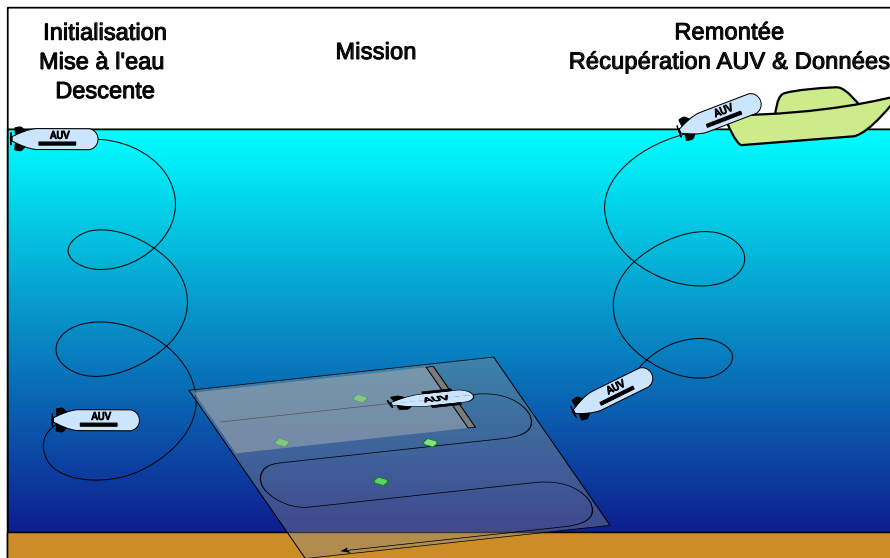


Figure 1.10 – Anatomie d’une mission de recherche de cible à l’aide d’un sonar latéral par un AUV

- enfin, une fois l’AUV à bords, les données récoltées sont récupérées pour être analysées

En effet, pour une exploration de ce type, les AUVs sont mis à l’eau puis effectuent le parcours de la zone définie. La durée de mission est variable, mais peut aller jusqu’à plusieurs dizaines d’heures. Le Hugin, un AUV fabriqué par Kongsberg, est annoncé dans sa version la plus endurante à cent heures d’autonomie [4]. Dans ce contexte-là, les données prélevées sont rendues disponibles seulement une fois l’AUV récupéré à bord de sa plateforme de lancement. Dans des scénarios type recherche de mines sous-marines ou bien simplement de cartographie d’une zone, afin de pouvoir commencer le traitement et l’analyse de données plus rapidement, il est souhaitable d’obtenir les premières données le plus rapidement possible. Cela donnerait un avantage opérationnel. Il devient dès lors intéressant de chercher un moyen de le faire, ce que problématique que nous adresserons à la Section 1.4. Mais avant cela, nous mettrons en évidence les quantités de données récoltées durant ces missions.

1.3.2 Panoplie de mission réalisées par un AUV

Les AUV sont taillés pour parcourir de la distance et sont utilisés majoritairement lorsqu’il s’agit de réaliser une cartographie des fonds marins, de la recherche d’objets, et de la surveillance. On retrouve ainsi leur emploi dans les fonctions suivantes. Les

- **Recherche Océanographique :** Collecte de données pour des études océanographiques, détection de polluants, étude de la biodiversité,

- **Cartographie Sous-marine** : Création de cartes bathymétriques détaillées pour étudier la topographie sous-marine,
- **Recherche Archéologique Sous-marine** : Exploration et cartographie de sites archéologiques sous-marins sans perturber les artefacts,
- **Recherche d'objet perdu** Recherche des boîtes noires d'avion abîmé en mer
- **Neutralisation des Mines** : Détection et neutralisation des mines sous-marines.
- **Surveillance et Reconnaissance** : Surveillance discrète et reconnaissance des activités sous-marines ennemies.
- **Lutte Anti-sous-marine** : Recherche et suivi des sous-marins ennemis.
- **Surveillance** : Surveillance sous-marine pour assurer la sécurité des ports, des câbles de communications sous-marins, maintient d'une présence sur zone

1.3.3 Capteurs montés sur un AUV

De part la versatilité des missions qu'ils sont amenés à réaliser, les AUV peuvent être équipés d'un grand nombre de capteurs. Parmi ceux-ci, les plus courants sont :

- **Systèmes Sonar** :
 - Sonar multifaisceaux pour la cartographie bathymétrique.
 - Sonar à balayage latéral pour l'imagerie du fond marin.
 - Sonar orienté vers l'avant pour la navigation et l'évitement des obstacles.
- **Systèmes d'Imagerie** :
 - Appareils photo numériques et caméras pour des images et de vidéos
- **Systèmes de Navigation** :
 - Systèmes de navigation inertielle (INS) pour le positionnement pendant une navigation à l'estime
 - Système de navigation par satellite (GNSS) pour un positionnement en surface.
 - Capteurs de pression pour connaître la profondeur.
- **Capteurs physico-chimiques** :
 - Capteurs de pH pour l'acidité/alcalinité de l'eau.
 - Capteurs de nutriments pour la surveillance environnementale.
 - Magnétomètres pour la navigation et la détection d'anomalies sous-marines.
 - Capteurs de méthane ou d'hydrocarbures pour détecter les émissions gazeuses du fond marin.
 - Capteurs CTD (Conductivité, Température, Profondeur) pour des études océanographiques.

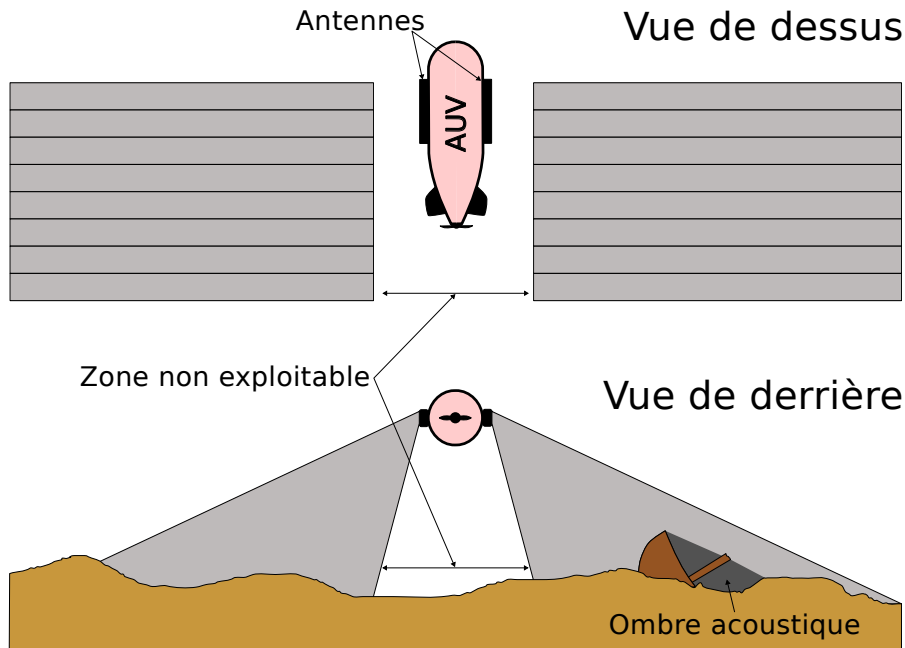


Figure 1.11 – Schéma illustrant un levé avec un sonar latéral par AUV (crédits: Irène Mopin)

- Capteurs d’oxygène dissous pour comprendre les écosystèmes marins.
- Fluoromètres pour la détection d’hydrocarbure [110]

1.3.4 Le sonar latéral

Le sonar latéral est un système de détection sous-marine acoustique utilisé pour cartographier et surveiller le fond marin ainsi que les objets submergés. Il fonctionne en émettant des impulsions acoustiques sous l’eau qui rebondissent sur les objets et le fond marin, puis enregistre le temps que mettent ces échos pour revenir (Figure 1.11). Il se distingue des autres types de sonar en proposant une vue rasante des objets présents sur le fond marin. Cette vue permet de mettre en évidence l’ombre de ses objets permettant de les caractériser. En utilisant ces données, le sonar latéral crée des images détaillées de la topographie sous-marine et des objets tels que des épaves de navires, des rochers ou des formations géologiques.

Ce dispositif est fréquemment utilisé dans des domaines tels que la recherche océanographique, l’exploration sous-marine, la cartographie des fonds marins, la localisation d’épaves, ou la recherche de ressources sous-marines. Il est essentiel pour comprendre les caractéristiques du fond marin et pour diverses applications marines. On peut en voir un monté sur l’AUV Daurade Figure 1.12.



Figure 1.12 – AUV Daurade (photo prise par Simon Rohou, 2015)

1.3.5 Quantité de données collectées par un sonar

Dans cette sous-section, nous allons estimer la quantité de donnée collectée par un sonar latéral dans une mission de cartographie des fonds marins. Supposons que l'antenne d'un côté ait une portée p avec une résolution de r_y . Cela donne ainsi $s_y = \frac{p}{r_y}$ pixels à enregistrer pour une émission. Supposons que le porteur ait une vitesse d'avance v . Pour résolution longitudinale r_x , le nombre de voies réalisées est $s_x = \frac{v}{r_x}$. Ainsi, l'image obtenue pour une seconde de mission sera de la taille $s = s_x \times s_y$ pixels. Il reste à savoir maintenant l'occupation mémoire d'un pixel. Supposons que chaque pixel soit codé sur b bits et sur $c \in [1, 4]$ canaux (ces canaux représentent par exemple la donnée sonar, la donnée bathymétrique, et éventuellement des vues dépointées dans le cas d'un sonar multiaspect comme le sonar SAMDIS de Thales). Ainsi, ce sonar a un débit de génération de donnée de $R_{gen} = 2 \times s \times b \times c$, le facteur deux provenant du fait que le sonar est en général à deux bords.

Ce tableau 1.2 met en évidence la grande quantité de données récoltée par l'utilisation d'un sonar latéral. Les documents techniques de Kongsberg [53] parlent même de 60 GB.s^{-1} pour leur HISAS, certainement dû au fait qu'ils enregistrent les données acoustiques brutes associées à chaque transducteur. Ces grandes quantités de données récoltées impliquent que les AUVs embarquent une grande quantité de mémoire. De plus, les données des sonars latéraux ne sont pas les seules à devoir être stockées. On peut citer les données de navigation et les données récoltées par d'autres capteurs embarqués.

Variables	Symboles	Unités	Sonar exemple
Résolution spatiale en x	r_x	cm	2.5
Résolution spatiale en y	r_y	cm	2.5
Portée latérale	p	m	200
Vitesse de levé	v	$m.s^{-1}$	2
Nombre de pixels	s	$pixels$	640 000
Mémoire pour un pixel	b	$bits$	16
Nombre de canaux	c		4
Débit	R_{gen}	$MB.s^{-1}$	10.3
Débit	R_{gen}	$GB.h^{-1}$	36.9

Table 1.2 – Débit de génération de données pour un sonar exemple

1.4 SOLUTIONS AU TRANSPORT DE DONNÉES

Comme nous l'avons évoqué précédemment, dans le contexte actuel, les données récoltées pendant une mission réalisée avec un AUV, ne sont disponibles qu'en fin de mission, une fois que le véhicule est remonté à bord. Cependant, dans le cas d'une opération de guerre des mines, l'objectif est de sécuriser le passage de navires dans une certaine zone. Pour cela, la méthode actuelle est de faire la cartographie de cette zone avec de AUV équipé avec un sonar latéral, puis d'analyser les données pour y repérer les dangers potentiels. Ainsi, il devient possible d'adapter la stratégie afin de prendre une décision quant à la route à suivre ou bien la neutralisation des dangers. Récupérer les données le plus tôt possible permettra d'avoir un bénéfice opérationnel.

Comment peut-on réaliser la récupération des données obtenues par un AUV au cours de sa mission ? Quelles sont les performances d'un tel système ?

On retrouve dans la littérature différentes pistes qui sont candidates qui permettrait de récupérer les données en cours de mission. Ainsi, pour la communication de ces données, nous disposons de quatre pistes :

- la possible remontée en surface de l'AUV en cours de mission,
- une fibre optique qui le relierait au bâtiment de surface,
- une communication sans-fil avec un bâtiment de surface,
- avec une ou plusieurs mules.

La solution de remontée en surface, en cours de mission, présente l'avantage de pouvoir bénéficier des technologies et des solutions dans le milieu aérien. Cependant, le problème majeur intervient dans le fait de faire remonter et redescendre l'AUV en cours de mission, chose que l'on essaie d'éviter en cherchant une solution. De plus, les phases de plongée et remontée sont des longues phases, surtout lorsque les

AUVs sont amenés à évoluer à plusieurs centaines de mètres sous la surface.

Les systèmes filaires, avec une fibre optique, présentent l'avantage de permettre et de pouvoir transmettre de manière fiable des données. Il s'agit ici finalement de transformer l'AUV en ROV afin de récupérer les données dès leur acquisition. Cependant, cela implique aussi d'être tributaire du câble, et comme le sont les ROV, d'être limité dans la surface à parcourir.

Une solution très intéressante devient alors l'utilisation de communication sans fil. Dans le milieu sous-marin, ces solutions impliquent d'un côté les ondes sonores, qui ont une portée très importante, de l'ordre de plusieurs kilomètres. Cependant, l'inconvénient majeur et bloquant dans notre cas est la faiblesse des débits possibles. Ainsi, l'état de l'art montre que pour communiquer 10 Gbps sur 1 km, en acoustique sous-marine, il faut au minimum 100000 secondes, soit environ 27,8 heures, puisque les débits maximum pour cette distance sont de 100 kbps. D'un autre côté, les ondes électromagnétiques, permettent d'atteindre des débits plus élevés mais sur des distances très courtes. L'état de l'art indique que pour une portée de 10 mètres, on peut atteindre 100 Mbps. Cependant, la portée est vraiment trop faible pour réaliser une communication directe entre l'AUV et le bâtiment de surface.

C'est ici qu'intervient le sujet principal de cette thèse, l'utilisation de véhicules mobiles supplémentaires capable de communiquer sur de courte distance, connue sous le nom de *data muling*. Cette solution permettrait de tirer les bénéfices des performances de communication sans fil sur de courtes distances tout en permettant de parcourir de longues distances. Cette solution viendrait compléter une mission d'AUV comme décrit sur la Figure 1.13, chronogramme de droite. On montera la pertinence d'une telle solution, ainsi que des débits atteignant pour un scénario circulaire 60 Mbps pour transmettre 50 Gigaoctets sur 200 mètres avec 4 mules.

Cette dernière solution, en envisageant de mettre en œuvre une chaîne de chaîne d'AUV, possède des verrous technologiques à adresser. En premier lieu, il sera bon dans un premier temps d'essayer de prédire les performances d'un tel système, en termes de débits, de latence et de portée. Mais aussi de pouvoir estimer le nombre de mules permettant de les maximiser. De plus, il s'agira aussi de déterminer leur trajectoire. En particulier, nous avons déterminé deux scénarios, l'un circulaire, où les mules font le trajet AUV-bâtiment directement, sans communiquer entre-elles et un linéaire, où au contraire, elles forment une chaîne. Enfin, plusieurs verrous ne seront adressés que partiellement, notamment le problème de rendez-vous entre mules ou entre les mules et l'AUV en mission, pour pouvoir se retrouver et initier une communication. À ceci, s'ajoutant aussi les contraintes annexes que pourrait impliquer une technologie de communication

nécessitant un amarrage ou alors un alignement émetteur-récepteur, dans le cas d'une communication sans-fil optique.

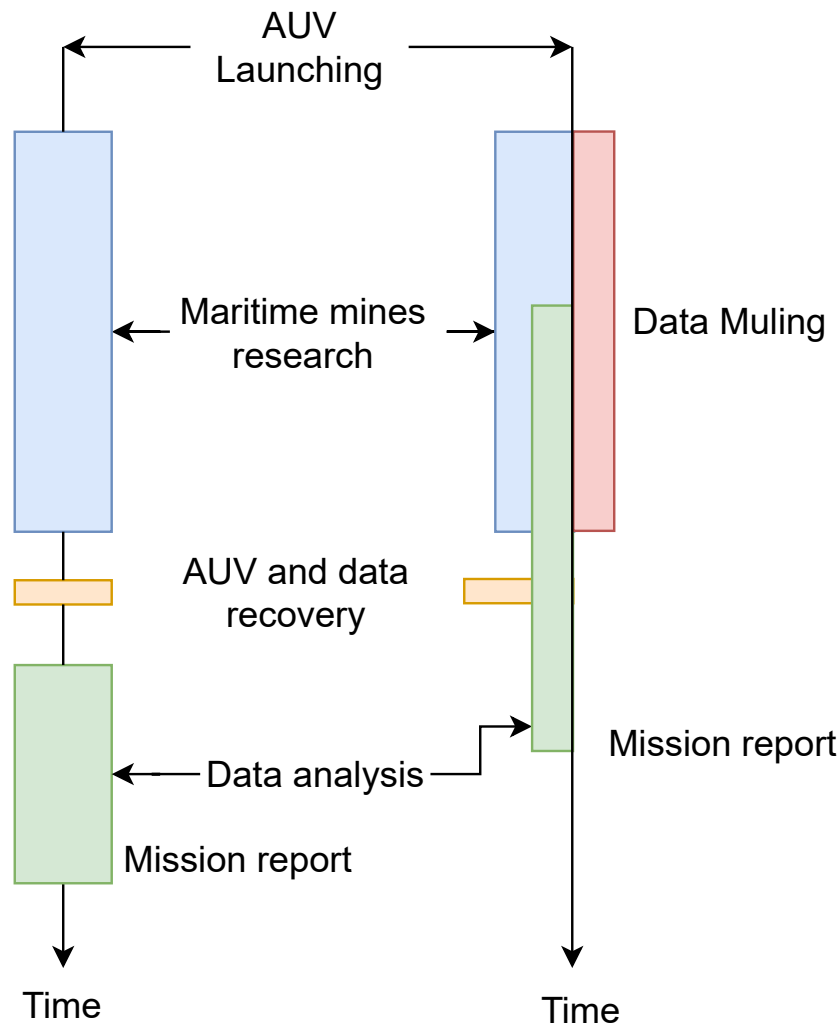


Figure 1.13 – Étapes d'un scénario de recherche de mines. À gauche sans *data muling*, à droite avec *data muling*

1.5 PLAN DU MANUSCRIT

Le manuscrit ci-présent se divise en trois parties distinctes.

La première fera l'état des lieux des solutions de communications en milieu sous-marin, mettant en avant leurs performances.

La deuxième partie visera à une étude de plusieurs scénarios de *data muling*, comme solution à la problématique décrite en introduction.

Une troisième partie abordera la réalisation d'un scénario de *data muling*, permettant à la fois d'illustrer et de décrire le comportement des modèles développés dans la deuxième partie.

Une dernière partie viendra conclure la thèse, montrant la pertinence *a priori* de l'apport du *data muling* pour la communication de données entre un AUV et un véhicule en surface.

COMMUNICATIONS SOUS-MARINES

2.1 INTRODUCTION AU CHAPITRE

Avec la volonté de mieux connaître les environnements sous-marins, une des premières problématiques qui est apparue est de pouvoir transmettre des données en milieu sous-marin. Un exemple de communication sous-marine est l'alphabet des plongeurs créé pour pouvoir se comprendre et plonger en toute sécurité (Figure 2.1).

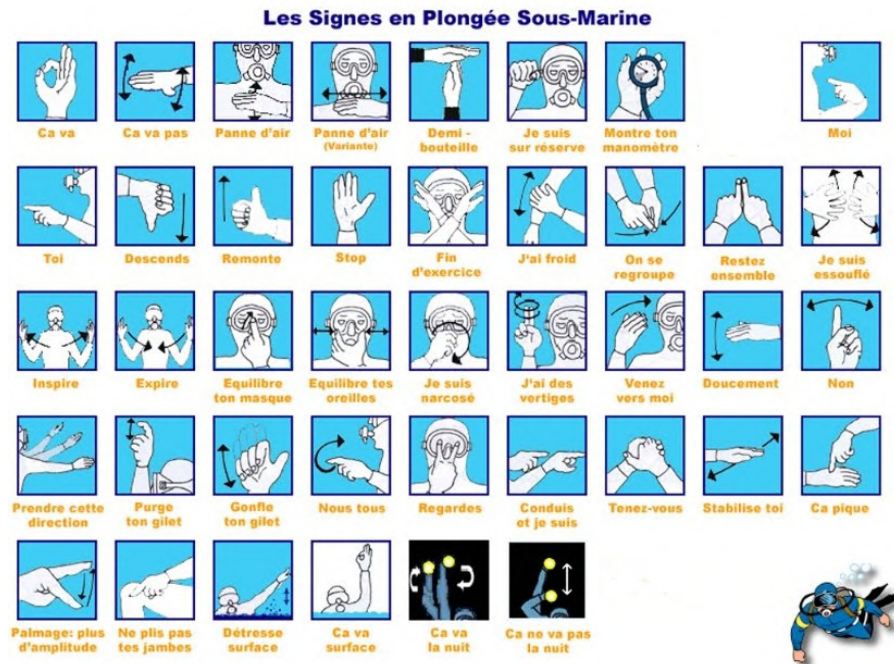


Figure 2.1 – Alphabet des signes pour communiquer entre plongeurs [58]

Cependant, ces quelques signes bien qu'efficaces pour un petit groupe de plongeurs deviennent rapidement inutilisables quand il s'agit de communiquer avec un compagnon éloigné (la visibilité baisse considérablement après quelques dizaines de mètres), une personne restée sur un bateau en surface ou encore pour partager une image ou des données récoltées. Pour cela, de nombreux travaux ont vu le jour dans le but d'étudier de nouveau moyen de communication, qu'ils soient filaires ou non filaires. Si les technologies filaires sous-marines

ont directement profité de l'essor des communications terrestres. La production, l'installation et le maintien en conditions opérationnelles de tels câbles représentent toujours de véritables enjeux technologiques et financiers.

Pour les communications sans-fils sous-marines, les très grandes différences entre le milieu sous-marin et aérien ne permettent pas dans ce cas une adaptation immédiate des systèmes déjà existants en surface. Ainsi, la première à faire son apparition fut l'utilisation de systèmes acoustiques pour transmettre des informations. Les expérimentations sont passées de l'utilisation de cloches acoustiques pour annoncer la présence des côtes aux bateaux jusqu'à nos jours avec l'utilisation plus massive de transducteurs électro-acoustiques [49]. Ces développements furent initiés par les nombreuses recherches militaires de la Seconde Guerre mondiale pour la lutte anti-sous-marine afin de localiser les sous-marins. Avec l'essor du développement des systèmes de communication radiofréquences, il y a eu l'apparition des techniques électromagnétiques très basses fréquences *Extremely Low Frequencies* (< 3 kHz) (*Fréquences Extrêmement Basses*) (ELF) et *Very Low Frequencies* (3 – 30 kHz) (*Très Basses Fréquences*) (VLF). Cette technologie ayant l'avantage de pouvoir pénétrer le milieu marin, elle est utilisée par la marine pour communiquer avec les sous-marins. Après cela, des systèmes utilisant des ondes électromagnétiques ont aussi été développées pour des applications complètement sous-marines dans des situations de communication en champ très proche lors d'amarrage d'AUV par exemple [9].

Ce chapitre a pour but de présenter les particularités des différents systèmes de communication sous-marin : filaire et non-filaire (acoustique, optique, en espace libre, électromagnétique) existant avec leurs particularités, leurs champs d'application et leurs limites. Avant de rentrer dans ces considérations, une première section décrira le fonctionnement d'une communication ainsi que les critères qui lui sont propres.

2.2 THÉORIE DE LA COMMUNICATION

2.2.1 Modèle OSI

Quand on parle de communications, plusieurs niveaux d'abstraction existent et ont été normalisés dans le modèle *Open Systems Interconnection* (OSI) [41]. Cette norme compartimente les différentes couches impliquées dans le processus de communication afin de spécifier et de séparer les différentes tâches Figure 2.2.

Le modèle veut qu'en théorie la donnée à transmettre traverse les différentes couches en étant de plus en plus encapsulée au travers des divers protocoles pour être transformée en un signal physique. Ce signal est ensuite émis pour être reçu par un système semblable

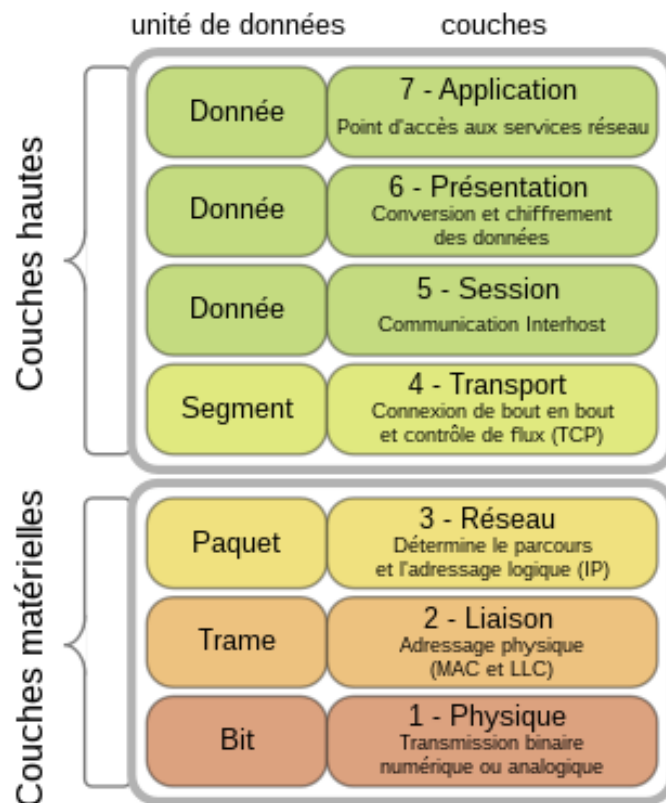


Figure 2.2 – Modèles OSI [71]

qui de manière analogue décodera en remontant les couches pour restaurer la donnée. Cependant, le modèle OSI est une vision idéalisée des couches de transmission qui stipule que chaque couche doit être composée d'un seul protocole et que les différentes couches doivent être distinctes. Dans les faits, la norme ne normalise pas les protocoles à implémenter associé à chaque couche. Il est fréquent que le matériel, les protocoles et les applications englobent plusieurs couches OSI. Les routeurs par exemple agissent sur les trois couches matérielles.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la recherche d'un moyen de connecter un système sous-marin potentiellement mobile collectant des données à un système en surface. Pour ce faire, nous avons étudié principalement les éléments correspondant à la couche physique du modèle OSI.

2.2.2 Couche physique

Dans notre contexte, le terme *communiquer* fait référence à un échange de données entre plusieurs entités distinctes et séparées spatialement, au moyen d'un signal. Ainsi, communiquer implique une chaîne de traitement permettant un échange de données. Cela comprend une entité émettrice (la source d'où proviennent les données

à transmettre), le canal de propagation, un ou plusieurs destinataires et la chaîne de traitement pour l'émission et la réception. Pour adapter le message à transmettre au canal de propagation, une étape essentielle est le processus de modulation. En pratique, on fait varier une ou plusieurs propriétés d'un signal périodique, appelé signal sur fréquence porteuse au moyen d'un signal modulant qui contient typiquement l'information à transmettre. Il existe 2 grandes familles de communication :

- la communication analogique : transmission d'un signal physique en temps continu qui, après passage dans une chaîne de traitement, fournit un signal proportionnel au signal d'entrée.
- la communication numérique : Le signal d'information est fait de symboles, où chaque symbole est associé à un signal analogique fini. La concaténation de ces différents signaux analogiques donnent le signal transmis. Ce type de modulation nécessite un traitement du signal sophistiqué mais permet de multiplexer facilement plusieurs sources de données et garanti théoriquement une robustesse parfaite par rapport au bruit sous contrainte de débit [93]. La quasi-majorité des systèmes de communications actuels utilisent les modulations numériques.

Pour la suite de ce manuscrit, on laissera de côté les modulations analogiques pour se focaliser sur les principes des modulations numériques pour les raisons évoquées ci-dessus.

2.2.3 Schéma d'un système de communication

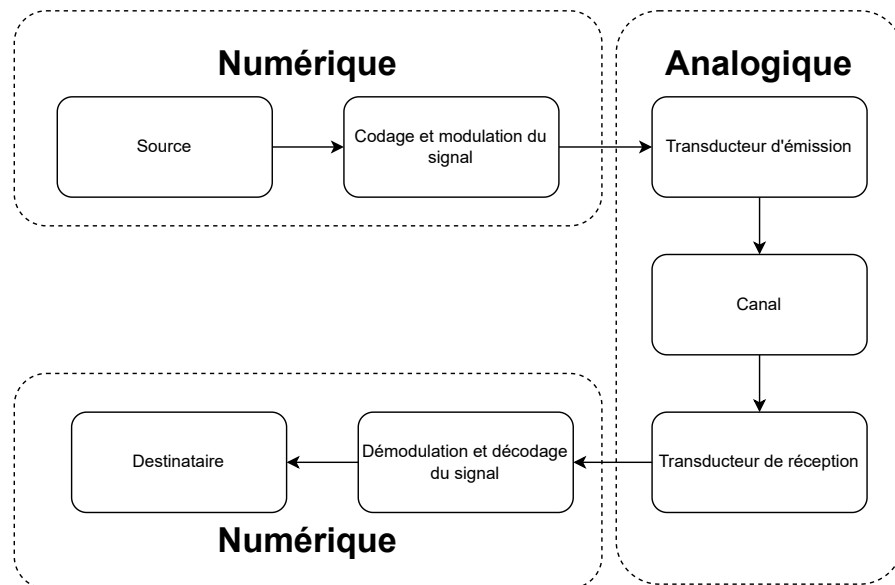


Figure 2.3 – Chaîne de communication

Les différentes étapes en vue de l'émission et de la réception au niveau de la couche physique sont représentées Figure 2.3. Cette chaîne se compose en cinq étapes distinctes :

1. Codage et Modulation : transformation de la donnée en entrée de manière à créer un signal adapté au canal de transmission (codage canal) et au choix de modulation, i. e. l'assignation des symboles binaires aux caractéristiques du signal à émettre.
2. Émission : émission du signal généré dans le canal choisi avec le bon type d'ondes (optique, acoustique, électromagnétique).
3. Propagation : comportement de l'onde dans son milieu, possible atténuation, couplage avec du bruit ou des perturbations qui peuvent altérer et dégrader le signal avant réception.
4. Réception : captation de la résultante du signal après propagation dans le milieu.
5. Décodage et démodulation : étape inverse de la construction pour passer du signal reçu à la reconstruction de la donnée émise.

À l'issue de ces étapes, la donnée devient alors accessible chez le destinataire. Cependant, au détour de chacune de ces étapes, le signal peut être altéré et dégradé, voire ne pas atteindre le récepteur. Dans ces cas, la donnée reçue est erronée. L'objectif dans la mise en place d'un système de communication est de choisir les moyens techniques adaptés dans le but de garantir la meilleure restitution des données transmises pour un niveau de bruit donné. Pour cela, divers protocoles existent avec des implications à différentes étapes permettant la correction des trames reçues ou alors en demandant leur renvoi, faisant diminuer le débit effectif. Au niveau couche physique le codage correcteur d'erreur est classiquement utilisé. Par exemple, le code de Hamming, un code correcteur linéaire, permet de corriger un message qui aurait été augmenté par ses bits de parité associés. Ainsi le récepteur peut contrôler si les bits reçus n'ont pas été altérés. Le cas échéant, il peut reconstituer le message si l'altération est modérée, ou bien demander le renvoi [72]. Pour l'implémentation, la généralisation et des codes correcteurs performants, le lecteur pourra se référer à l'ouvrage *Channels Codes* [89]. D'autres mécanismes de correction peuvent être invoqués à des niveaux de couche supérieurs (protocole TCP par exemple).

Figure 2.3 présente une communication avec une antenne émettrice et une antenne réceptrice. En théorie de l'information, cette configuration est connue sous le nom de SISO [8]. Il est possible d'utiliser une multitude de voies d'émission et de réception via des réseaux d'antennes, on parle alors de configuration *Multi Input Multi Output* (MIMO) permettant des gains en débit et/ou robustesse [107].

2.2.4 Critère de performances

Plusieurs métriques permettent de définir des critères de performances. Ces métriques ont pour objectif de servir à la quantification et l'évaluation des performances du système considéré.

Dans l'étude d'un système de communication, nous nous intéresserons à sa portée et de sa capacité à échanger des données.

2.2.4.1 Portée d'une transmission

La qualité de décodage d'un système de communication numérique s'exprime classiquement à partir du taux d'erreur binaire ou *Bit Error Rate* (Taux d'Erreur Binaire) (BER) en anglais défini comme suit :

$$\text{BER} = \frac{N_e}{N_d} \quad (2.1)$$

où N_e représente le nombre de bits erronés et N_d le nombre total de bits transmis.

Une autre métrique classiquement utilisée pour caractériser la qualité d'une transmission est le taux d'erreur paquet ou *Packet Error Rate* (Taux d'Erreur de Paquet) (PER) qui désigne la proportion de trames correctement décodées pour une transmission. En calculant le BER pour chaque trame de données on peut calculer le PER en connaissant les performances du code correcteur d'erreur de trame associé (par exemple un code de Reed-Solomon peut corriger une trame si $\text{BER} \leq 1e^{-4}$)

On définit ainsi la portée maximale d'un système de communication, notée r , comme l'éloignement maximal entre un émetteur et un récepteur de façon tel que le PER est nul.

En pratique, la portée est la résultante de deux effets sur le signal :

- des effets du milieu de propagation, liés au canal et à l'environnement dans lequel le signal émis évoluera. Les principaux éléments considérés ici seront l'atténuation du milieu, le bruit de canal et la géométrie du milieu (obstacles, multitrajets).
- les paramètres d'émissions, par exemple la puissance d'émission, la sensibilité du récepteur, les techniques de modulation.

Cette portée de transmission est donc directement liée au *Signal-to-Noise Ratio* (Rapport Signal à Bruit) (SNR) en réception, prenant en compte les éléments cités précédemment.

Vis-à-vis de ces composantes, pour comparer la portée de deux systèmes de communication, il faut se mettre dans des configurations semblables, même puissance d'émission, même sensibilité de réception... , mais cela devient difficile, voire impossible lors de la

comparaison de différentes technologies. Une autre solution de comparaison, revient aussi à observer dans la littérature les différentes réalisations et les représenter afin d'en déterminer les tendances et de pouvoir, suivant les cas d'usage, se reporter aux systèmes performants en question.

2.2.4.2 Capacité de canal et débit

La capacité d'un canal, notée C et exprimée en bps, est en théorie de l'information, le débit théorique maximum pouvant être transmis sur une bande fréquence B de manière fiable sur un canal de communication bruité. Claude. E. Shannon, en 1948, a fourni un modèle mathématique pour le calculer [93]. Ainsi, dans le cadre d'une communication SISO, cette capacité est connue sous le nom de théorème de Shannon-Hartley. Ce théorème donne une borne théorique supérieure du débit d'information atteignable pour une communication à partir d'un signal reçu à la puissance S après une propagation dans un canal sujet à du bruit blanc de puissance N et ce pour un BER arbitrairement faible. La capacité C s'exprime comme suit :

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = B \log_2 (1 + \text{SNR}) \quad (2.2)$$

Avec B la bande de fréquence du canal en Hz et SNR le rapport signal à bruit obtenu à la réception. En théorie, atteindre cette borne n'est pas garantie, cela dépend en particulier de la modulation choisie. Dans la famille des modulations, il y a par exemple les modulations Modulation d'Amplitude (AM), Modulation en Fréquence (FM), ou la famille de modulation *Phase-Shift Keying* (PSK), *Quad Phase-Shift Keying* (QPSK). Le critère de Shannon pour une configuration MIMO peut être trouvé dans [108]. Il s'exprime

$$C = \max_{\text{tr}(\mathbf{R}_{ss}) \leq p} \log_2 \left[\det(\mathbf{I} + \mathbf{H} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{H}^H) \right] \quad (2.3)$$

Avec $\mathbf{H}$ la matrice $n_r \times n_t$ du canal (n_r le nombre de transmetteurs et n_t le nombre d'émetteurs, $\mathbf{R}_{ss}$ la matrice de covariance associée au vecteur de transmission, $\mathbf{H}^H$ la matrice transposée conjuguée de $\mathbf{H}$ et p le maximum normalisé de la puissance transmise.

Le débit d'une communication s'exprime comme suit :

$$R_{\text{brut}} = \frac{R_c \log_2 M}{T} \quad (2.4)$$

avec R_c le rendement de codage de canal, R_s le rendement de codage de source, M le nombre d'état de modulation et T la durée d'un symbole de modulation. Du fait du théorème de Shannon-Hartley on a :

$$R_{\text{brut}} < C \quad (2.5)$$

Enfin on peut définir, le débit effectif tenant compte de la proportion de trames erronées :

$$R_{eff} = R_{brut} \times (1 - \text{PER}) \quad (2.6)$$

2.2.4.3 Lien Portée-Débit

En milieu sous-marin, l'atténuation des ondes de transmission est intimement lié à la distance de transmission. Ainsi le SNR de réception et donc la capacité et le débit sont impactés par la distance de communication [99].

En pratique, quel est le lien entre le débit et de la portée pour des transmissions dans le milieu sous-marin ? C'est ce qu'ont fait premièrement Daniel B. Kilfoyle and Arthur B. Baggeroer pour des transmissions acoustiques [51], puis Fewell *et al.* l'ont étendu aux autres vecteurs de transmissions sans fil en milieu sous-marin [25]. Ainsi, ils ont mis en évidence empiriquement que le produit entre la portée r et le débit R était constant. Cette constante diffère selon les méthodes utilisées. Elles seront explicitées dans leur partie respective.

2.2.4.4 Latence d'une communication

La latence est définie comme le délai calculé par la différence de temps entre l'émission de la première information à l'émetteur et la réception du dernier bout d'information au niveau du récepteur considéré.

$$\Delta t = t_{last_receipt} - t_{first_emit} \quad (2.7)$$

Avec Δt la latence, $t_{last_receipt}$ la date de réception du dernier bit reçu de la trame et t_{first_emit} la date de début d'émission.

Les quatre sections suivantes présenteront les solutions existantes pour le transport de donnée dans le milieu sous-marin. Chaque section se divise en une présentation des principes de propagation, suivi par l'examen des avantages et de ses difficultés dans l'utilisation. Une dernière section constituera une discussion sur le sujet de la communication dans le milieu sous-marin mettant en avant les domaines de performances.

2.3 COMMUNICATION FILAIRE EN MILIEU SOUS-MARIN

Une première manière de permettre à deux appareils de communiquer entre eux est l'utilisation d'un lien physique permettant de guider le signal émis dans un milieu de propagation connu et optimisé à cet effet. À l'heure actuelle, ces câbles sont utilisés pour les échanges de donnée intercontinentaux, relier des observatoires offshore, comme NEPTUNE [5] ou encore sur les ROV.



Figure 2.4 – Navire câblé Pierre de Fermat de la société Orange Marine [109]

2.3.1 Propagation des ondes

Deux types de câbles, différenciés selon le type d'onde utilisé et le milieu de propagation sont utilisés. Les câbles métalliques permettent la propagation d'ondes électromagnétiques et les fibres optiques diffusent les ondes optiques. Pour le milieu sous-marin, l'utilisation de tels câbles est rendu possible grâce à des gaines isolantes permettant de s'affranchir des contraintes de propagation inhérentes au milieu sous-marin. Les débits atteints sont de l'ordre de plusieurs Gbps. Ainsi, en termes de propagation, le canal permet une transmission à des vitesses de $c = 2.25e^8 \text{ m.s}^{-1}$, celle-ci variant en fonction de la fréquence, la température, la salinité [32].

2.3.2 Avantages

L'utilisation de câbles présente de nombreux avantages :

- l'accès à des débits très élevés de l'ordre de plusieurs Pétaoctets par seconde grâce à une bonne maîtrise de la chaîne de transmission et donc un SNR élevé [80],
- couvrir de grandes distances, sous couvert de prévoir des répéteurs de signaux régulièrement, qui nécessitent d'être alimentés,
- de faire transiter de l'énergie en plus des communications, dans le cas d'une communication électrique : par exemple, le standard *Power over Ethernet* (PoE), autorise l'alimentation des appareils en plus de la transmission de données (cependant, pour limiter les pertes ohmiques, l'alimentation n'est possible que sur une distance relativement courte),
- une faible latence du fait de la célérité des ondes électromagnétiques.

Dans les faits, ces avantages sont identiques à l'utilisation de câbles en surface.

2.3.3 Inconvénients

La plus grande difficulté de ce type de communication reste la fabrication du câble et son déploiement. Cela mène vers des coûts élevés pour leur utilisation, pouvant aller jusqu'à 600 k€ par kilomètre.

Dans le milieu sous-marin, la communication filaire est déjà utilisée avec des câbles qui reposent sur les fonds marins avec notamment les communications par fibres optiques et son réseau de câbles international (Figure 2.5) et d'autre part les câbles en eaux libres dans le cas du déploiement des ROV. De ces expériences passées, de nombreux enjeux ont émergés. Ces enjeux concernent les difficultés suivantes :

- le dépôt des câbles à la position voulue sur le fond (en particulier par grands fonds),
- la maintenance en cas de dégradation,
- l'exposition aux chaluts et aux ancres,
- les problématiques géostratégiques pour les protéger,
- le choix de la trajectoire des câbles,
- la détérioration des écosystèmes.

Pour les câbles en eau libre, on retrouve :

- la gestion du courant et de la tension du ou des câbles,
- l'emmêlement du câble autour de lui-même, autour de structures,
- la taille des treuils peut être un problème même si les dernières avancées et l'utilisation de la fibre optique ont permis de fabriquer des tourets de 10 cm pour 2 km de fibre optique [91]

La liste des inconvénients est longue. Cependant, du fait des très haut débits autorisés et de la faible latence, les câbles sous-marins trouvent toute leur utilité pour l'interconnexion des continents, pour Internet, pour remonter des données, piloter des ROV, pour des installations expérimentales en milieu sous-marin, mais accessible par bas-fond, ou en milieu artificiel (piscine). De plus, de nombreuses recherches visent à palier les contraintes, notamment pour la gestion des câbles des ROV [111].

2.4 COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

2.4.1 Historique

Les premières recherches sur l'acoustique sous-marine ont été initiées par Léonard de Vinci, alors qu'il écoutait les bruits sous-marins au moyen d'un long tube immergé. Son constat, il pouvait entendre les bateaux passer [15]. Ce n'est que plus tard que le développement à proprement dit des moyens de communication acoustique sous-

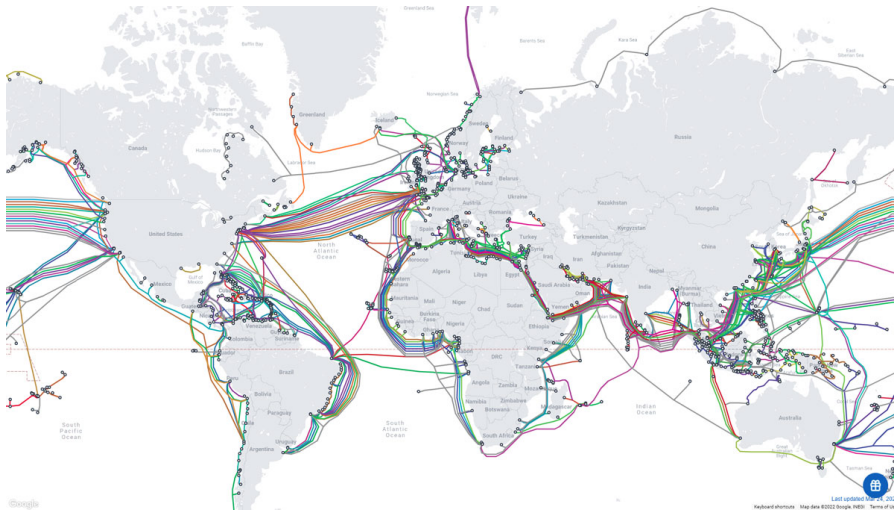


Figure 2.5 – Carte de câbles sous-marins [18]

marins a pris son essor pour la sécurisation de la marine marchande et militaire.

Le milieu subaquatique présente en effet des propriétés mécaniques intéressantes pour l'évolution des ondes acoustiques. Celles-ci se propagent à une vitesse autour de 1500 m.s^{-1} (contre 340 m.s^{-1} dans l'air dans des conditions de température et pression normales). De plus, les ondes sont faiblement absorbées par le milieu (comparé à celles des ondes électromagnétiques exprimées en section 2.6). Ceci étant dit, nous développerons dans les sous-sections suivantes les différents paramètres de la propagation des ondes acoustiques en milieu sous-marin au sujet de leur propagation premièrement, puis de l'absorption. Ensuite, nous présenterons quelques généralités concernant la transmission de données par le moyen des ondes acoustiques.

2.4.2 Propagation

L'onde acoustique fait partie de la famille des ondes mécaniques, qui dépendent d'un support pour se propager. La transformation du signal électrique en une onde mécanique se fait au moyen de la vibration d'une surface mobile, créant ainsi une suite de surpressions et de dépressions qui se propagent dans le milieu environnant.

Dans un milieu aquatique, la vitesse de propagation des ondes sonores varie en fonction de la température, de la salinité, et de la pression (ou de la profondeur). Elle est de l'ordre de 1500 m.s^{-1} , mais à des fins scientifiques plusieurs modèles empiriques permettent une meilleure approximation. On peut citer les formules proposées par Wilson (1960) [115], DelGrosso (1974) [19], Medwin (1975) [68], Chen et Millero (1977) [12], Mackenzie (1981) [63], Coppens (1981) [16], Leroy *et al.* (2008) [57]. Cette dernière a la particularité de prendre aussi en compte la latitude. Celles-ci sont composées pour la plus

simple de six termes pour la formule proposée par Medwin en 1975 [68] jusqu'à vingt-trois termes pour la plus complexe, proposé par Wilson en 1960 [115]. Par exemple, la formule de MacKenzie exprime la célérité c en $m.s^{-1}$ du son dans l'eau par :

$$\begin{aligned} c = & 1448.96 + 4.591T - 5.304 \cdot 10^{-2}T^2 \\ & + 2.374 \cdot 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 \cdot 10^{-2}D \\ & + 1.675 \cdot 10^{-7}D^2 - 1.025 \cdot 10^{-2}T(S - 35) \\ & - 7.139 \cdot 10^{-13}TD^3 \end{aligned} \quad (2.8)$$

avec T la température en degrés Celsius pour $T \in [-2, 30]^\circ C$, S la salinité en partie par mille pour $S \in [25, 40]$ ppt, D la profondeur en mètres pour $D \in [0, 8000]$ m [63]. Pour la conversion profondeurs-pression des estimations plus précise que pour chaque 10 m de plus la pression augmente de 10 bars ont été formulées par MacKenzie [63] ou Leroy et Parthiot [56].

Les principales différences entre ces formules sont les différentes plages de validité des paramètres d'entrée : température salinité et pression ou profondeur. On retrouve un tableau récapitulatif et les domaines de validité de plusieurs de ces formules dans [22].

La vitesse de propagation de l'onde sonore, bien que plus rapide dans le milieu sous-marin, introduit une latence. Celle-ci est non négligeable dès lors que l'on considère des communications acoustiques. Le lecteur pourra se référer à [61] pour une modélisation des phénomènes. Dans les parties suivantes, seuls les concepts permettant de se donner une idée des phénomènes en jeu seront abordés.

2.4.2.1 Propriété du canal d'acoustique sous-marine

Un avantage notable que possède l'onde acoustique est son atténuation qui reste faible devant celle des ondes électromagnétiques ou optiques.

Empiriquement, une formulation de l'atténuation est proposée par Yasin Al-Boosi *et al.* [1]. Celle-ci met en avant deux termes prépondérants pour la caractérisation de l'atténuation : la diffusion géométrique et l'absorption. La diffusion ou divergence géométrique caractérise la perte due à son expansion depuis la source. Elle s'exprime :

$$TL_{geo} = k \times 10 \log(r) \text{dB} \quad (2.9)$$

avec r la distance en mètre considéré et k un facteur pour représenter la nature de l'expansion. Dans le cas d'une émission dans un canal non borné, la dispersion est considérée sphérique et $k = 2$. Dans le cas d'un canal borné, la dispersion est considérée cylindrique et $k = 1$. En pratique, un facteur $k = 1.5$ est souvent considéré.

L'absorption représente l'énergie perdue due aux réactions chimiques et thermiques locales au passage de l'onde. Ces effets constituent

les pertes par amortissement, fortement dépendantes de la fréquence et de la composition chimique du milieu marin. Elle s'exprime :

$$TL_{absorption} = r \times 10 \log(\alpha(f)) \quad (2.10)$$

avec r la distance considérée et $\alpha(f)$ le coefficient d'absorption. Trois formules sont classiquement utilisées avec chacune leur plage de fréquence sur lesquels elles sont valides. Pour une fréquence $f \in [100, 3000]$ Hz la formule de Thorp sera valide [106], $f \in [3, 500]$ kHz on pourra utiliser le modèle de Schulkin-Marsh [90] et $f \in [400 \text{ Hz}, 1 \text{ MHz}]$ on pourra utiliser la formule de Francois-Garrison [30] ou $f \in [10 \text{ kHz}, 1 \text{ MHz}]$ pour la formule de Fisher et Simmons [26].

Ainsi, l'atténuation totale s'exprime :

$$TL_{total} = k \times 10 \log(r) + r \times 10 \log(\alpha(f)) \text{ dB} \quad (2.11)$$

Plusieurs autres phénomènes affectent la propagation de l'onde acoustique dans le milieu aquatique, dont deux sont prépondérantes :

- les multitrajets : la non-homogénéité du milieu marin résulte en un phénomène dans lequel le champ acoustique ne suit pas un unique trajet rectiligne, mais potentiellement plusieurs trajets avec des réflexions possibles sur le fond, la surface ou des obstacles. Ces trajets multiples rendent le canal de propagation sélectif en fréquence.
- l'effet Doppler : comme pour le son en surface, dans le cas où le récepteur ou l'émetteur ou les deux sont en mouvement (par exemple dans le cas d'AUV), on observe un décalage en fréquence qui altère les signaux acoustiques. Ce décalage est toutefois dépendant de la célérité des ondes relativement au déplacement des émetteurs/récepteurs. Comme la vitesse des ondes acoustiques sous l'eau est relativement faibles par rapport aux ondes radios, l'effet Doppler engendré est substantiel. Par ailleurs, la moindre réflexion des ondes sur une surface en mouvement (vagues à la surface par exemple) ou bien sur une surface rugueuse crée un phénomène de diffusion (*scattering* en anglais) engendrant également un effet Doppler. Tous ces effets rendent le canal acoustique sous-marin fortement sélectif en temps.

2.4.2.2 Autres effets

Le milieu sous-marin n'est pas silencieux et présente de nombreuses sources de bruit qui viennent s'ajouter au signal et donc complexifier sa réception et son décodage (Figure 2.6).

Ainsi, on peut classer ces bruits en deux catégories :

- les bruits d'origine naturelle : liée aux particularités de la zone de transmission. La faune marine, craquement de la croûte océanique, éruption sous-marine, le vent en surface, les vagues, ou encore les conditions météorologiques,

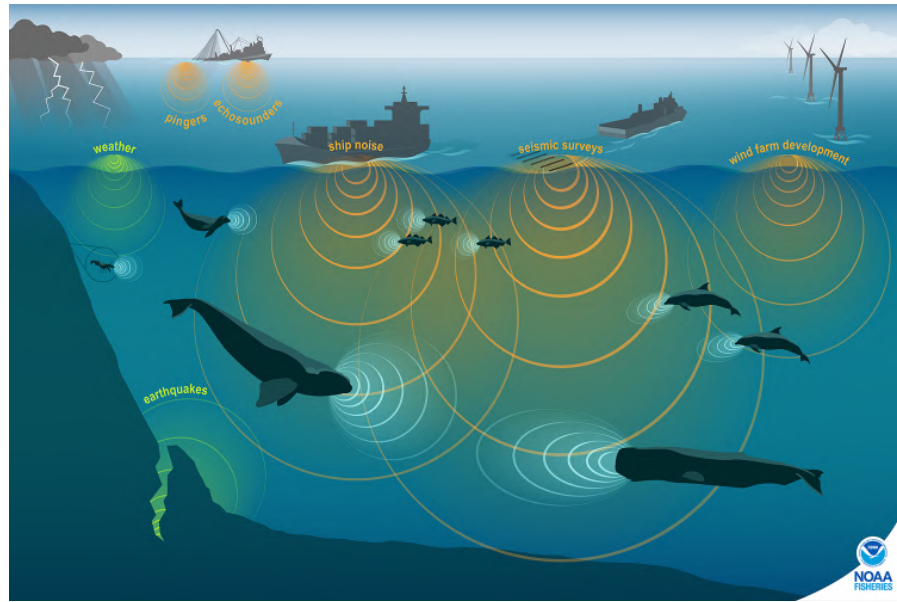


Figure 2.6 – Source bruit acoustique [27]

- les bruits spécifiques d'origine humaine : forage sous-marin, passage de navire, bruit de l'activité humaine moyenne en surface, émissions sonars, autres systèmes de communication acoustiques.

Ces sources de bruits, leurs domaines et leur puissance ont été définis par Wenz, en fonction de leur fréquence, de l'environnement comprenant le trafic maritime ainsi que la météo [112, 113]. Ce modèle permet de se rendre compte que le bruit est surtout présent dans la bande de fréquence inférieure à 10 kHz. Figure 2.7 est une illustration de la répartition de ces bruits.

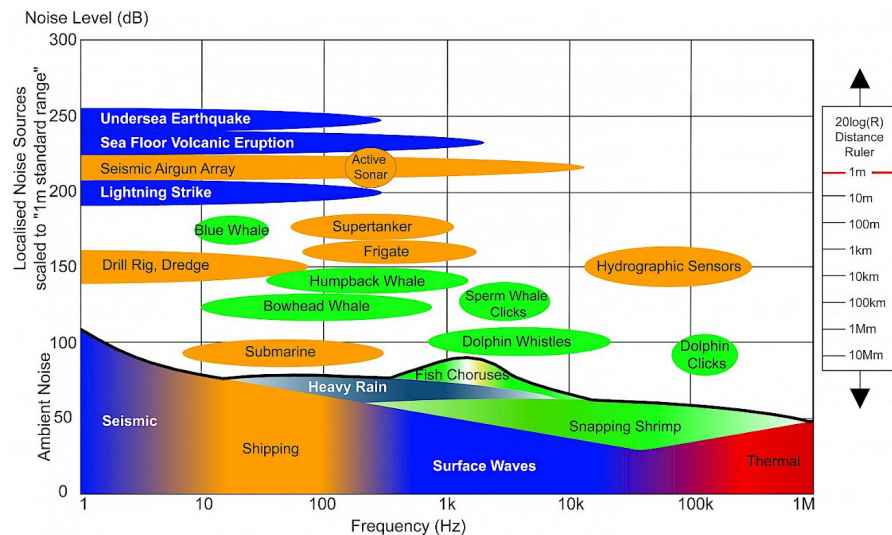


Figure 2.7 – Bruit acoustique par fréquences [78]

De plus, dans cette notion de bruit, l'attribution de bande de fréquence pour l'acoustique sous-marine n'est pas normalisée. Ainsi, chacun peut émettre sans se préoccuper des autres avec les différents problèmes que cela peut entraîner comme des interférences entre les différents signaux, brouillage par exemple. Cela étant dit, l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN) propose une standardisation au travers de l'initiative JANUS [85].

2.4.3 *Systèmes de communications acoustiques*

Maintenant que l'on a vu les différents éléments qui affectent la propagation des ondes acoustiques, cette partie exposera son utilisation dans les communications sous-marines.

2.4.3.1 *Transducteurs*

Afin de pouvoir utiliser une onde acoustique pour effectuer une communication, en reprenant le schéma 2.3 de la section 2.2.2, il est nécessaire de créer un signal adapté, d'avoir un projecteur pour l'émettre ainsi qu'un récepteur pour le capter et une unité de calcul pour retrouver l'information qu'il transporte.

Ces étapes sont réalisées comme suit :

- l'obtention d'un signal robuste tout en restant spectralement efficace se fait par l'application de modulation,
- pour l'émission de ce signal, l'utilisation d'un transducteur piézo-électrique, appelé projecteur, permet la conversion du signal électrique en une onde mécanique,
- le récepteur est de même nature que l'émetteur, il s'agit d'un transducteur nommé hydrophone qui convertit les ondes de pression en un signal.

2.4.3.2 *Débits et portées*

La multitude de produits existant sur le marché ou expérimentaux a permis de mettre en évidence une loi empirique liant la portée de communication au débit. Elle a été mise en évidence dans un rapport de la marine australienne [25]. Pour des communications acoustiques, cette loi s'exprime comme suit, illustrée dans la figure 2.8:

$$r \times R = 100km \times kbps \quad (2.12)$$

De plus, du fait des points considérés, cette expression est applicable pour une portée entre 100 m et 3 000 km.

2.4.3.3 *Utilisation pour le milieu sous-marin*

Les modems de communications acoustiques sont très largement utilisés pour faire de la communication sous-marine. Leur seule

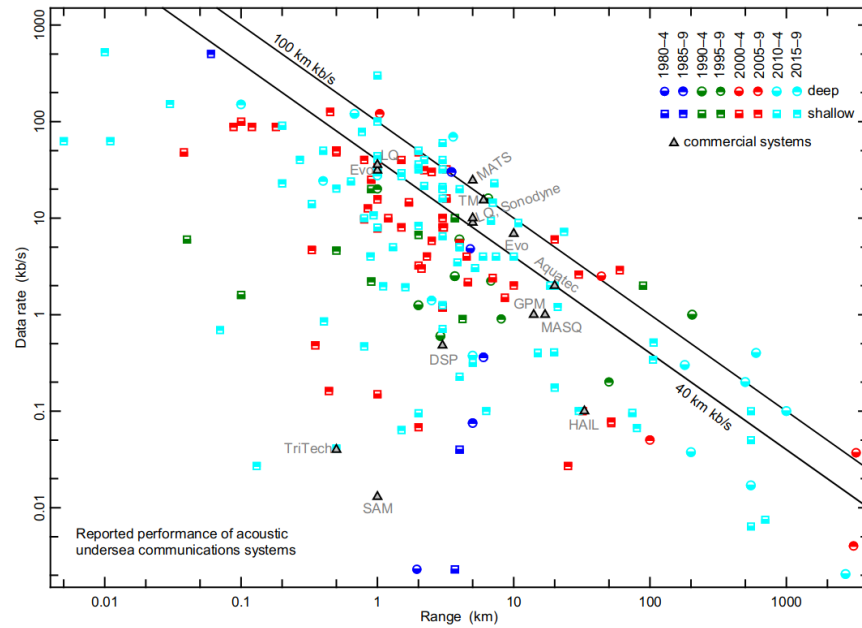


Figure 2.8 – Débit en fonction de la portée pour divers systèmes de communication acoustique [25]

limitation aujourd'hui est leur débit trop faible pour communiquer une grande quantité d'images sur des distances supérieures au km. Pour ce qui est des AUV, les modems acoustiques sont utilisés pour l'échange de données de navigation. Cela comprend la liaison véhicule surface pour la réception des différents paramètres, ou inversement, pour recevoir de consignes spécifiques ou des données pour se recalculer (*Ultra-short Baseline* (USBL)).

2.5 COMMUNICATIONS OPTIQUES SOUS-MARINES

Pour palier au manque de débit des communications acoustiques et la forte latence, la communication à l'aide d'une onde optique est envisageable.

2.5.1 Propagation

La propagation des ondes lumineuses dans le milieu sous-marin, se fait à la vitesse de $2.2 \times 10^8 \text{ km.s}^{-1}$ [31]. Elles introduisent moins de latence que les ondes acoustiques, cependant comme nous le verrons par la suite, leur propagation est limitée dû à une forte absorption du milieu. Pour une modélisation, le lecteur peut se rattacher aux ouvrages suivant [21, 43, 70]. Pour la suite, seuls les concepts permettant de se donner une idée des phénomènes en jeu seront abordés.

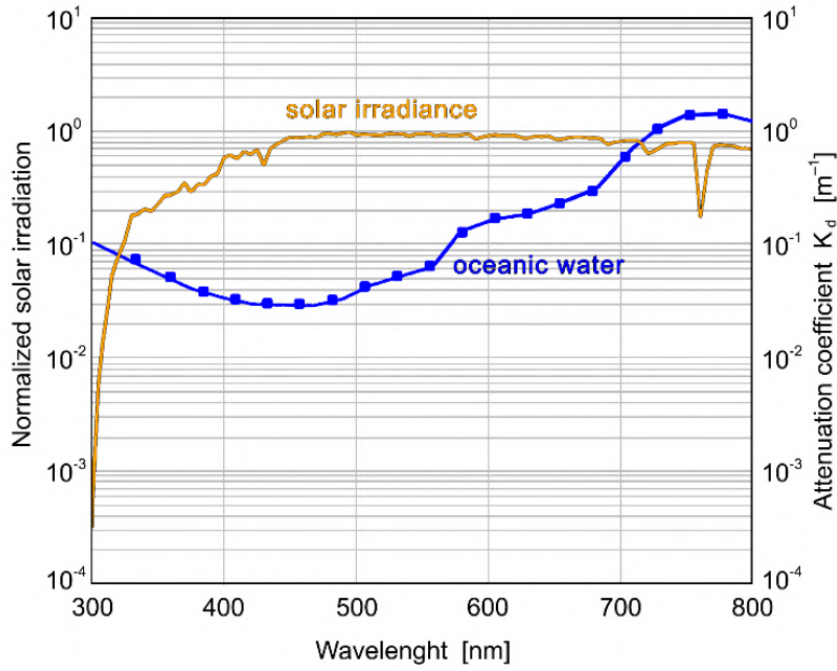


Figure 2.9 – Éclairement solaire et absorption des ondes lumineuse par l'eau de mer [55]

2.5.1.1 Atténuation

Dans le milieu aquatique, les ondes optiques suivent la loi de Béer. Cette loi corrèle l'absorption de la lumière aux propriétés du milieu dans lequel elle se propage. Ainsi, pour un milieu liquide, l'éclairement E décroît de manière exponentielle en fonction de la longueur d'onde λ et de la distance r .

$$E(\lambda, r) = E_0 \cdot e^{-c(\lambda) \cdot r} \quad (2.13)$$

avec E_0 l'éclairement initial (en watt par mètre carré) et $c(\lambda)$ le coefficient d'atténuation du milieu [33]. L'atténuation résulte de deux effets, l'absorption du milieu et la dispersion. En effet, le milieu marin contient beaucoup d'éléments dissous ou en suspension qui impactent la capacité à transmettre la lumière, on peut citer la chlorophylle [102] et tous les éléments qui rendent l'eau turbide. La Figure 2.9 met en valeur le coefficient d'absorption pour chaque longueur d'onde entre 300 et 800 nm. Ainsi, le minimal d'absorption se situe dans la plage 400-500 nm. La majorité des systèmes commercialisés utilise cette gamme de longueurs d'ondes [55].

Ainsi, pour limiter la diffusion et l'absorption et porter plus loin, les émetteurs focalisent les ondes et donc, les faisceaux émis sont très loin d'être omnidirectionnels, pouvant rendre l'alignement émetteur-récepteur complexe. Cependant, cet inconvénient est de plus en

plus pris en compte avec le développement d'émetteur/récepteur omnidirectionnels, avec une ouverture de 180° [7].

2.5.1.2 Bruits

La présence d'autres sources lumineuses alentours peut venir bruite la communication. Le soleil est une des sources les plus importantes pour des communications en eau peu profonde. Comme le montre la Figure 2.9 la spectre du soleil irradie la même gamme de longueurs d'ondes que celle utilisée pour les communications [37]. Cette limitation devient négligeable pour de plus grandes profondeurs que les rayons du soleil n'atteignent pas. Une autre source de pollution lumineuse peut être la présence des lampes d'appoints embarquées sur le même porteur que le système de communication. Une deuxième source qui vient altérer la communication est la faible pénétration des ondes optiques dans l'eau d'autant plus dans un milieu turbide où les particules en suspension dans le canal de diffusion reflètent les ondes lumineuses émises vers l'émetteur et entrave sa propagation. Ce phénomène se nomme le backscattering.

2.5.2 Systèmes de communications optiques en milieu sous-marin

L'utilisation de l'optique comme support de communication requiert comme pour les ondes acoustiques d'avoir un signal adapté ainsi qu'un projecteur et un récepteur.

Dans ce cadre-là, il existe deux grandes familles d'émetteurs. Les Diode Electro-Luminescentes (DELs), qui sont très directives et offrent un bon débit ainsi qu'une consommation d'énergie plus faible que les lasers. De leurs côtés, ils permettent d'atteindre de meilleurs débits sur des plus grandes portées par leur grande sélectivité de spectre, leur forte directivité avec une forte focalisation. Cependant, grâce à l'obligation d'un bon alignement de l'émetteur avec le récepteur, ils sont plus complexes à utiliser sur des vecteurs mobiles [55].

2.5.2.1 Débits

L'avantage majeur du développement de communications optiques pour le milieu sous-marin réside dans l'obtention de débits sans commune mesure avec les performances des systèmes de communication acoustiques en milieu marin. Ainsi, dans le domaine de la recherche, les débits atteignent l'ordre du Mbps et tendent vers le Gigabit par seconde dans des conditions de laboratoire [116]. Pour ce qui est des produits industriels, on observe des débits de l'ordre de la dizaine de mégabits par seconde. [7] Pour le produit *portée* $\times$ *débit*, la constante pour des systèmes optiques est égale à $1000 \text{ m} \times \text{Mbps}$ (Figure 2.10). Cependant, il est à noter que cette loi est définie seulement pour des portées entre 5 et 200 m [25, 55]. Pour des portées supérieures, les

débits ne suivent plus la loi empirique. Ils sont soit très faibles, soit la communication devient impossible.

$$r \times R = 1000m \times 1 \text{ Mbps} \quad (2.14)$$

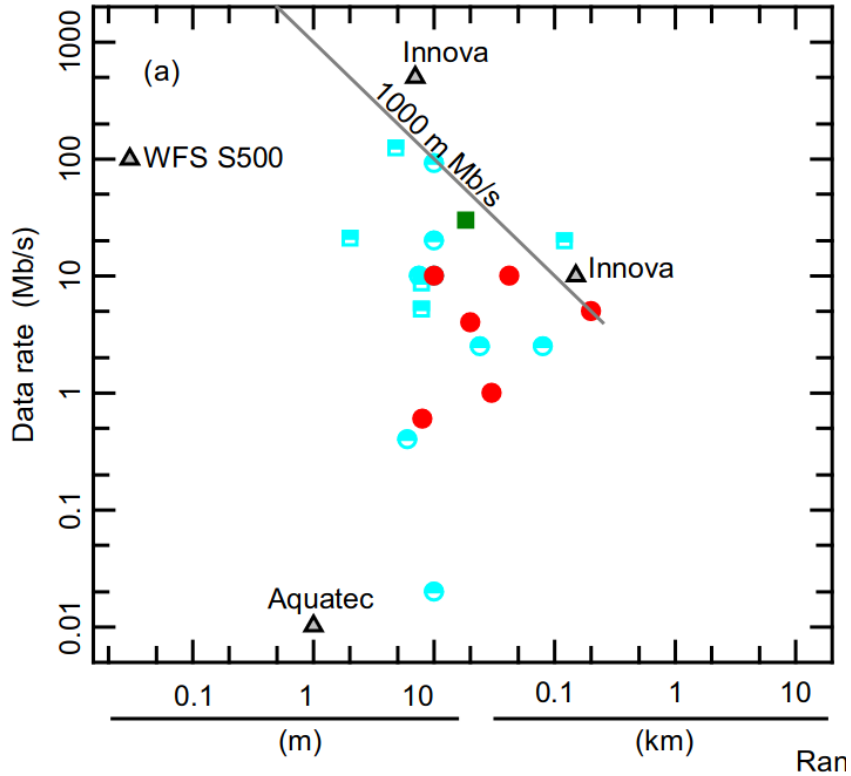


Figure 2.10 – Résumé de plusieurs systèmes de communication optique existant [25]

2.5.2.2 Utilisation dans le monde sous-marin

La solution d'utiliser une communication optique sur des porteurs sous-marins permettent de leur donner la capacité de pouvoir communiquer sur de courtes portées avec un grand débit, par exemple dans le cadre de scénario de data muling. Ainsi, un modem optique a été monté sur un AUV dans [84] dans cette optique-là. Cependant, l'utilisation pratique de modems optiques n'est pas encore très répandue.

2.6 COMMUNICATION PAR RADIO FRÉQUENCES

Il existe une troisième méthode de communication qui utilise aussi les ondes électromagnétiques, mais dans la gamme des radiofréquences.

2.6.1 Propagation

Du fait de la forte conductivité de l'eau de mer, les radiofréquences subissent une forte atténuation dans l'eau. Suivant que l'on soit en champs proche ou lointain, l'atténuation se fait en $1/r^3$ ou en e^{-r} respectivement, r étant la distance considérée [79]. Cependant, dans le cas de communications en champ très proche (< 10 cm), l'utilisation des ondes radiofréquences permet d'atteindre des débits plus importants que l'utilisation d'ondes acoustiques, avec l'avantage de pouvoir être omnidirectionnel. De ce fait, aucun alignement n'est nécessaire.

De plus, la propagation de ces ondes est insensible à la turbidité du milieu. Si l'on ajoute cet avantage à celui de leur célérité, ces fréquences en font une manière privilégiée de communiquer sans contact avec un drone qui viendrait s'amarrer à un autre drone ou une station fixe sous-marine [82, 100].

2.6.2 Transmission

2.6.2.1 Débits

L'utilisation de ces fréquences dans les communications sous-marines est associée à la constante empirique de $0.4 \text{ km} \times \text{kbps}$ valide pour des portées entre 0.1 m et 10 000 km [25](Figure 2.11).

2.6.2.2 Utilisation dans le monde sous-marin

La communication par RF tend vers deux utilisations majeures. Sur de très faibles distances, de l'ordre de la dizaine de centimètres, cela permet un échange de données haut-débit avec les véhicules ou capteurs sous-marins, sans devoir les ouvrir, passer un câble dans leur coque ou bien mettre un connecteur. On trouve leur utilisation par exemple pour l'amarrage d'AUV dans un scénario de data muling [105]. La deuxième utilisation majeure est pour de la communication avec des sous-marins militaires depuis la terre en utilisant les ondes VLF et ELF. En effet, dans ces gammes de fréquence, les ondes radios ont l'avantage de bien supporter le franchissement de la surface. Il s'agit du seul moyen de communiquer depuis la terre avec eux malgré de très faibles débits et du besoin de très grandes antennes. 2.12.

2.7 CONCLUSION DU CHAPITRE

La représentation des différentes performances de chaque moyen de communication sur un graphique permet de mettre en avant leurs zones optimales de fonctionnement. Ainsi, à partir des limites présentées dans les sections précédentes, on obtient le tableau suivant Figure 2.13. De plus, le Tableau [2.1] vient résumer les caractéristiques des

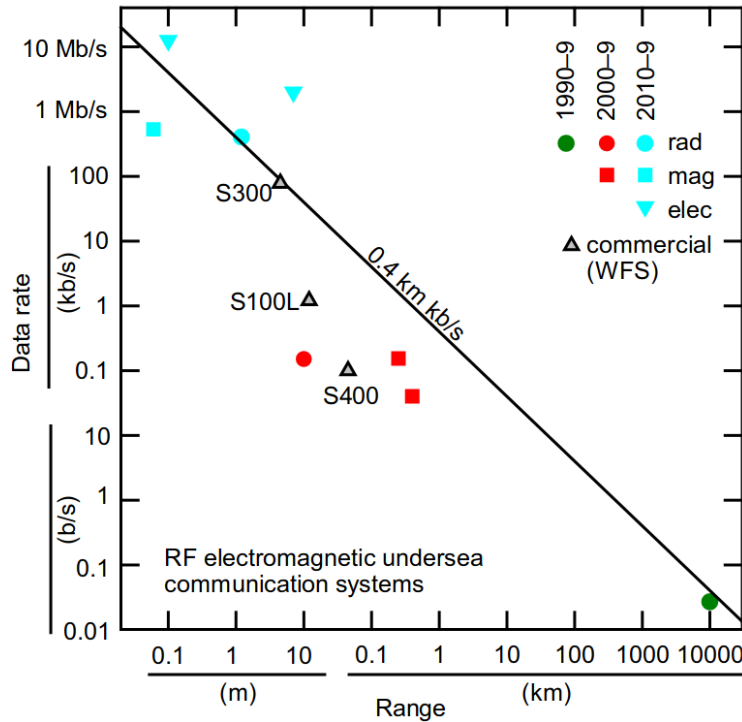


Figure 2.11 – Résumé de plusieurs systèmes de communication RF existant [25]

chaque méthode de communication que nous avons présentée. Ce que l'on remarque en plus de leur plage de fonctionnement, c'est l'absence de solution pour des communications longue portée (supérieure au kilomètre) et haut-débit (supérieure au mégabit). Dans le domaine de la communication sous-marine, beaucoup de recherches ont lieu dans le but de trouver des solutions pour créer des systèmes permettant de combler ce manque. Ces recherches peuvent être catégorisées dans trois domaines :

- SISO : prendre l'hypothèse qu'il est possible d'améliorer les communications dans le cadre d'une communication avec une antenne en émission et une en réception [65, 96]
- MIMO : prendre l'hypothèse que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission comme à la réception permettra une amélioration [10]
- Data Muling : prendre l'hypothèse d'utiliser les savoir-faire en robotique mobile pour introduire des vecteurs mobiles dans une chaîne de transmission pour combiner des communications courtes portées aux déplacements de véhicules pour faire de la communication longue distance. [105]

Dans chacun des cas, cela passe par l'amélioration du matériel, une meilleure compréhension du canal de communication et de ses effets sur le signal ou les véhicules.



Figure 2.12 – Centre de transmissions de la Marine nationale de Rosnay [11]

Méthodes	Portée	Débits	Facilité d'usage
Filaire	+++	+++	- -
Acoustique	++	-	+++
Optique	-	++	++
RF (HF)	- - -	++	++
RF (VLF/ELF)	++++	- - -	- - -

Table 2.1 – Résumé qualitatif des points forts pour chaque méthode de transmission

C'est cette dernière approche que nous verrons dans la suite de ce travail pour se familiariser avec le concept de data muling, le modéliser et en estimer les performances.

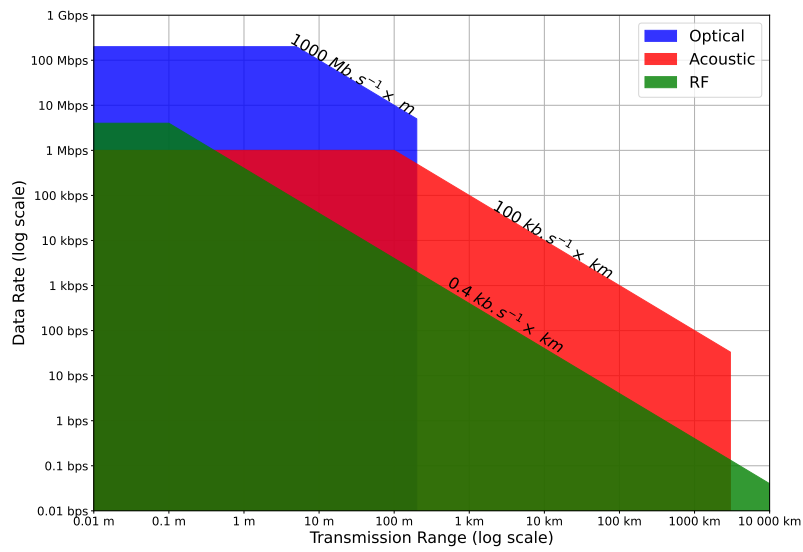


Figure 2.13 – État de l’art sur la répartition débit-portée dans le cadre d’une communication SISO, données extraites de [25]

RÉSEAUX SOUS-MARINS ET *DATA-MULING*

3.1 INTRODUCTION AU CHAPITRE

Mieux comprendre notre environnement sous-marin devient crucial en ces temps de profonds changements climatiques. Afin d'affiner les modèles et de mettre en évidence les différents phénomènes qui ont lieu, le besoin en données *in-situ* ne cesse d'augmenter. Dans le cas des océans qui couvrent 70.8% de la planète, collecter des données relève de déployer des capteurs, acquérir les mesures, récolter les mesures et enfin les analyser. Lors du déploiement de capteur par grands fonds, si ces quatre étapes de la chaîne de mesure sont faisables, pour le moment, et comme vu dans la partie précédente, le transfert de larges volumes de données du fond vers la surface reste un défi. Une première solution est de faire émerger le dispositif de l'eau afin de transmettre les données par satellites (Iridium, Starlink). Une autre solution consiste à récupérer le dispositif de mesure et à collecter les données du stockage interne.

L'objectif de ce chapitre, est premièrement de formuler la problématique de la récupération des données, ensuite de passer en revue les différentes solutions utilisées actuellement puis de présenter le concept de *data muling* qui constitue le cœur de cette thèse. Enfin, nous exposerons notre modélisation ainsi que les performances théoriques d'un tel système dans le but de créer un lien de communication longue portée et haut débit.

3.2 LE PROBLÈME DE LA COLLECTE DE DONNÉES

3.2.1 *Vocabulaire et définition*

Avant de formuler le problème, voici quelques définitions :

- Capteur : système capable de mesurer une grandeur physique et de la stocker.
- Nœud : système ayant la capacité de pouvoir échanger des informations avec un ou plusieurs autres nœuds. La qualité de la communication sera bien sûr dépendante des conditions de déploiement et du canal.

- Nœud-capteur : nœud composé d'un ou plusieurs capteurs
- Réseau : par réseau, on entendra ici la mise en relation de plusieurs nœuds.
- Source : nœud-capteur qui produit des données devant être acheminées vers un ou plusieurs puits.
- Puits : aussi appelé destination, nœud vers lequel des données doivent être acheminées.

3.2.2 Réseau sous-marin

Afin de pouvoir effectuer des applications de surveillance, d'exploration sous-marine, de prévention de catastrophes marines, les chercheurs ont souhaité déployer de nombreux capteurs en réseaux. Ainsi, tout un champ de recherche a débuté afin de s'adapter aux différentes problématiques induites par le caractère sous-marin. Du caractère très général des *Underwater Sensor Network* (Réseau de capteurs sous-marin) (USN) qui représentent l'ensemble global des réseaux sous-marins, deux branches existent :

- réseau filaire: les nœuds sont reliés par des câbles de communication. Comme vu au chapitre précédent, les problématiques inhérentes à la communication et à la mise en réseau ici sont identiques à celles que l'on peut observer de manière terrestre. Les solutions, elles aussi, proviennent de la profusion des recherches appliquées sur les réseaux terrestres.
- *Underwater Wireless Sensor Network* (Réseau de Capteurs Sous-Marin Sans Fil) (UWSN): ici, les nœuds sont reliés par des interfaces de communication sans-fil, acoustique, optique ou RF. Cela étant dit, la technologie acoustique est aujourd'hui majoritairement utilisée pour de telles activités du fait des avantages qu'elles possèdent en matière de propagation (Chapitre 2). Cependant, certaines problématiques, notamment pour le protocole de communication, restent à résoudre. Ainsi, il faut prendre en compte la grande latence introduite par la faible célérité de l'onde acoustique (environ $1500m.s^{-1}$ sous l'eau) ainsi qu'un possible mouvement des nœuds de par le fait qu'ils puissent être dérivants ou ancrés, mais tout de même en suspension dans la colonne d'eau. Dans ce cas-là, ces réseaux font partie de la famille des *Mobile Ad-hoc Network* (Réseau mobile ad-hoc) (MANET) ou *Mobile Wireless Sensor Network* (Réseau de capteurs mobiles sans fil) (MWSN) [62, 77].

La Figure 3.1 représente les différentes déclinaisons de réseau.

3.2.3 Formulation du problème

La formulation du problème de la collection de données est simple dans son énoncé. Il s'agit en effet de se poser la question suivante, lors

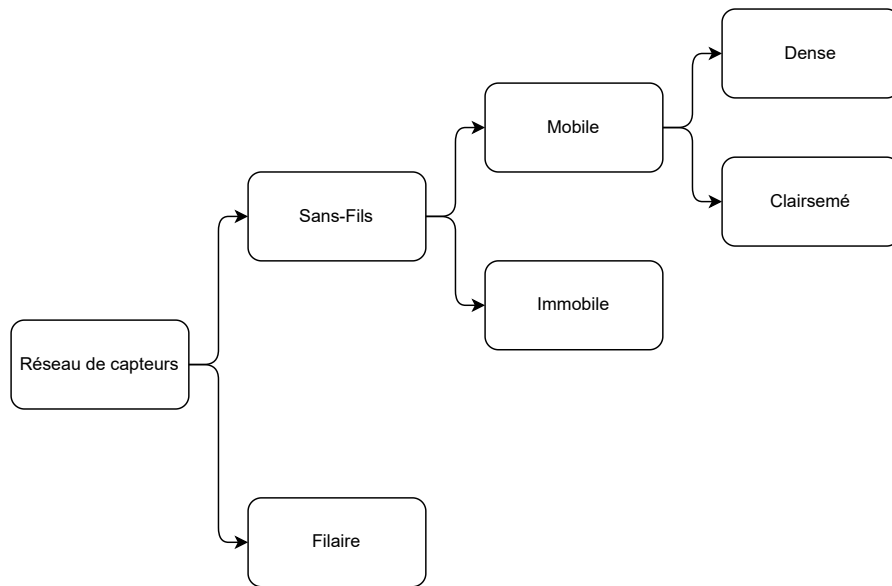


Figure 3.1 – Arbre représentant les différents types de réseau

du déploiement de nœud-capteur : **Comment est-ce que les données acquises au niveau des nœuds-capteurs peuvent être acheminée au puits le plus rapidement possible pour y être analysées et diffusées.**

3.2.4 Spécificités des réseaux sous-marins

De manière générale, les réseaux sous-marins présentent plusieurs particularités :

- Une mobilité des nœuds : dans le milieu sous-marin, les nœuds sont majoritairement mobiles du fait de courant. Cette mobilité est à prendre en compte dans les protocoles, comme notamment les implications sur la connaissance de la position des nœuds.
- Les nœuds sont souvent en autarcie énergétique, ainsi la consommation en énergie, tant du réseau que des nœuds, doit être maîtrisée.
- Plusieurs nœuds sont déployés et plusieurs nœuds peuvent être amenés à vouloir transmettre en même temps leurs données. Cette option doit être considérée dans les algorithmes pour éviter des éventuelles collisions.
- La latence dans les communications, notamment pour les communications acoustiques qui peut être très importante.
- L'absence d'infrastructure de réseau normalisée (contrairement aux réseaux aériens)

3.2.5 Familles de solution dans la littérature

Deux grandes familles d'organisation de réseau existent dans la littérature, guidant vers deux familles de réponse au problème de la collection de données. En effet, s'il existe toujours une route de communication pour chaque considération de sources et de puits réalisables, le réseau sera considéré comme dense (*dense sensor network*). La Figure 3.2a en est un exemple. Inversement, si la connexion entre la source et le nœud est non constante, telle que présentée en Figure 3.2b, on a un exemple de réseau clairsemé (*sparse sensor network*), où la transmission serait intermittente ou inexistante.

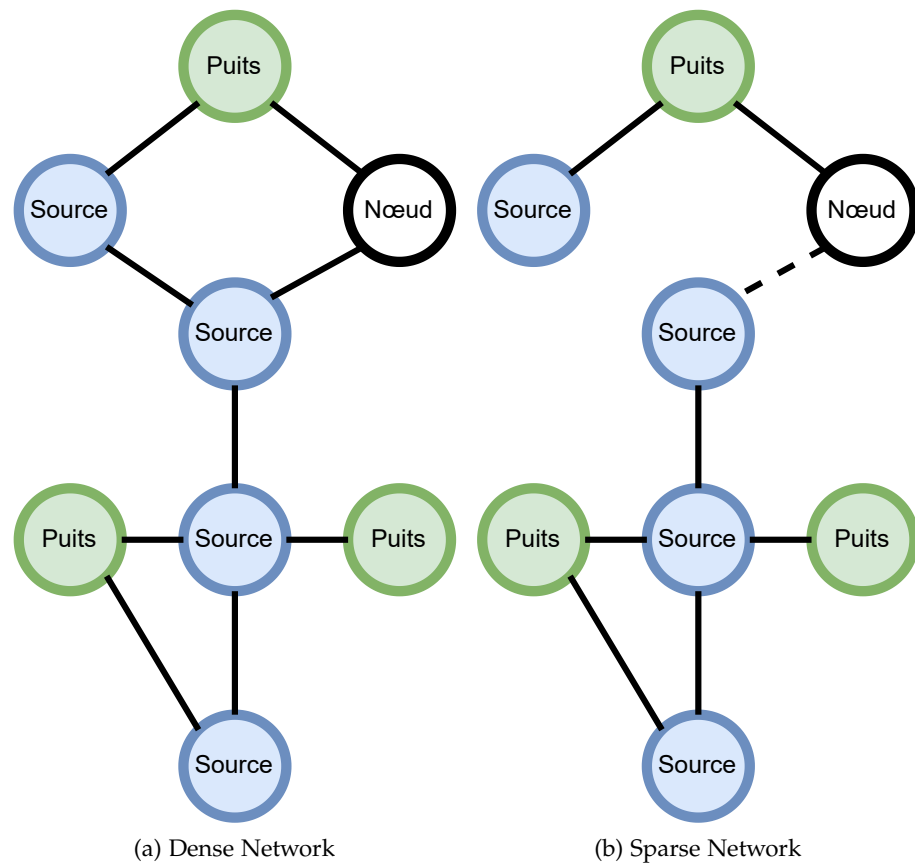


Figure 3.2 – Représentation de deux topologies de réseau

3.2.5.1 Solutions dans le cas des réseaux denses

Dans un tel réseau, le critère de densité permet de garantir l'existence d'une route entre une source et un puits, des solutions nommées Multi-Hop ou Hop-by-Hop peuvent être utilisées. Ces solutions consistent à acheminer les données depuis leur source jusqu'à un puits par des sauts successifs de nœuds en nœuds. Pour cela, plusieurs protocoles existent et ont été adaptés aux spécificités des réseaux sous-marins.

Le premier à faire cela utilisait une communication acoustique et se nomme *Vector-Based Forwarding* (VBF) [117]. Il a ensuite été amélioré avec le Hop-by-Hop Vector Based Forwarding (HH-VBF) [60]. Ils sont utilisés pour la remontée des mesures dans un champ d'hydrophones. Ces deux protocoles fonctionnent sur le principe de faire faire des sauts aux données entre les différents nœuds contenus dans un tunnel invisible formé autour d'un vecteur source-vers-puits, établis à l'émission (VBF) ou recalculés à chaque saut (HH-VBF). Ces deux protocoles ont l'avantage de ne pas avoir besoin d'une planification de routage préalable. Cependant, ces deux méthodes, bien qu'originales, ont plusieurs inconvénients. On peut citer le problème de ne pas prendre en compte la qualité du lien ou encore, l'introduction de plus de communication que nécessaires, entraînant une consommation inégale des nœuds du réseau. D'autres protocoles ont ainsi vu le jour pour essayer de palier ces limitations. Les solutions basées sur la découverte de réseau (*Dynamic source routing* (DSR)) [48] avec une prise en compte de la directivité pour le choix des nœuds (*Directional Flooding-based Routing* (DFR)) ont permis de restreindre le nombre de sauts nécessaires entre les nœuds tout en prenant en compte l'état des liens entre chaque nœud [39].

En plus du calcul de la route optimale entre la source et le puits, la question de quantité de données traversant le réseau doit aussi être adressée. Les solutions proposées dans ce cas, sont le fait de communiquer plus souvent et donc plus longtemps, ce qui nécessairement diminuera l'autonomie des nœuds. Cela reste ainsi un compromis à faire pour le dimensionnement des nœuds, le choix de l'interface de communication et donc des problématiques de déploiement.

3.2.6 Solutions dans le cas des réseaux clairsemés

Dans le cas des réseaux clairsemés, qui représente notre problématique pour le monde sous-marin, le problème majeur est la difficulté de prévoir l'existence d'un lien laissant la possibilité de transmettre les données. Par exemple, ce problème apparaît si l'un du capteur du réseau dérive. Il peut donc par moment sortir d'une zone dans laquelle la transmission est possible, mais y retourner à d'autres instants. Il peut aussi bien ne jamais y rentrer ou même avoir été volontairement déployé dans une zone où il était certain de ne pas pouvoir communiquer ses données collectées. Ainsi, ces réseaux ont un côté aléatoire et la résolution du problème de la collecte de données se fait le plus souvent au cas par cas. Cependant, une solution qui est assez étudiée ces dernières années est l'introduction d'agents mobiles spécifiques au sein de ce réseau. Ainsi, l'introduction d'agents mobiles capables d'atteindre les nœuds non connectés permet de former un nouveau réseau, appelé MANET dans le cas général, ou MWSN pour une application marine. Cette solution est communément appelée

data muling. Ce concept et ses particularités sont exposés dans la section suivante.

3.2.7 Synthèse

Nous avons présenté succinctement différentes typologies de réseau de capteurs avec le problème de la collection de données en particulier. Ainsi, nous avons évoqué le cas des réseaux denses et clairsemés, et les solutions possibles de la résolution du problème de la collecte de données. Dorénavant, nous nous concentrerons sur la solution du data muling et de ses apports dans différentes configurations à partir de la section suivante.

3.3 LE CONCEPT DE *data muling*

3.3.1 Origine

Le concept d'utilisation d'objets mobiles communiquant pour établir des liens de communications et améliorer les performances des réseaux est apparu dans les années 1990, avec l'émergence du concept de réseau. Ainsi, plusieurs travaux d'études ont été publiés sous le nom MANET. Ces travaux portent sur le fait de créer des réseaux composés seulement de nœuds mobiles qui se déplacent au cours du temps. Les premières expérimentations ont pris place au début des années 2000 avec ZebraNET [86, 118] où les nœuds sont installés sur des zèbres pour suivre leur déplacement. Ces nœuds communiquent entre eux dès qu'ils le peuvent et les scientifiques peuvent ainsi récupérer les données lorsqu'ils arrivent en portée de communication d'un zèbre équipé. Le data muling a pris son nom en 2003 à la publication de l'article *Data MULEs: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks* par Shah *et al.* [92], lorsqu'ils proposent un système de data Mobile Ubiquitous LAN Extension (MULE). Ce système propose une architecture pour transférer des données collectées par des capteurs jusqu'à des points de collection en utilisant un système de communication mobile.

Sur le même registre, les américains possèdent l'expression *sneakernet* (littéralement "le réseau aux chaussures de tennis"), le fait de transporter des données sur un support physique d'un point A à un point B. Sur ce thème, le webcomic américain *xkcd* a étudié aussi la bande passante de Fedex du maximum de donnée transportable sur des supports physiques qui rentreraient dans une boîte à chaussure [24].

3.3.2 Définitions

Le *data muling* consiste en l'utilisation d'agents mobiles dans le but de pouvoir faire du transport de données entre des sources $\mathcal{S}$, lieux où sont collectées des données, et un ou plusieurs puits ou destinations, $\mathcal{D}$, lieux où l'on souhaite récupérer les données collectées.

Une mule est définie comme étant un agent mobile avec la capacité de communiquer. Souvent cette communication se trouve être de faible portée vis-à-vis des distances séparant les sources des puits. Ainsi, l'utilisation de mules permet de tirer parti des avantages de communications courtes portées qui ont presque toujours un débit supérieur comparé à des moyens de communication sur de longues distances. Enfin, les communications limitées à une courte portée rendent les communications plus discrètes, ce qui peut être un réel atout dans un contexte militaire.

3.3.3 Critères de performances

Afin d'observer les performances des scénarios proposés, nous fixerons plusieurs critères; ceux-ci formeront la base de comparaison.

- Le critère du débit apparent, soit la somme totale des informations échangées divisée par le temps total. Ce critère met en évidence la capacité du lien établi entre la source et le puits,
- le temps total de transmission,
- la latence : la différence de temps entre l'émission d'une unité de donnée (un bit, un paquet) et sa réception complète.
- le nombre de bit transmis par unité d'énergie,
- l'endurance de la mule,
- la mise en place du système ainsi que son rapatriement.

3.3.4 Travaux précédents sur le *data muling*

Les études sur le *data muling* peuvent être divisées en deux catégories. La première relève de la considération de l'introduction d'agents mobiles se déplaçant de manière aléatoire. Les travaux majeurs dans cette catégorie sont ceux de Shah *et al.* [44, 92]. Dans ces travaux, les mules sont des agents mobiles se déplaçant selon une marche aléatoire dans un environnement discret où sont disposés aléatoirement des capteurs et des puits. La deuxième approche, que nous retiendrons, consiste à considérer les mules non plus avec un déplacement aléatoire, mais avec un déplacement bien choisi, de manière à améliorer *a minima* un des critères développés précédemment. C'est majoritairement cette deuxième approche qui est utilisée pour le *data muling* dans le milieu sous-marin.

3.3.5 *Data muling pour le milieu sous-marin*

La littérature sur le *data muling* en tant que système se divise en trois catégories.

La première considère le réseau dans un ensemble et cherche à optimiser les visites, et donc les trajectoires des différentes mules qui sont, ici, des véhicules autonomes sous-marins. Pour cela, les auteurs s'appuient sur la résolution d'un *Travelling Salesman Problem* (Problème du Voyageur de Commerce) (TSP) par divers algorithmes d'optimisation en considérant différentes heuristiques telles que la couverture des nœuds ou l'énergie utilisée [6, 38, 50, 59]. Les idées développées dans les articles ont pour le moment été seulement simulées.

Une deuxième approche, travaille au niveau de l'interaction particulière des mules avec les capteurs. Ainsi, plusieurs articles traitent de différents protocoles d'échange entre les capteurs et les mules afin de caractériser leur collaboration [20, 97, 103–105]. On retrouve dans ces articles plusieurs expérimentations sur le terrain, permettant de valider les modèles et algorithmes.

Enfin, on retrouve aussi des études mixant des solutions *multi-hop* couplées avec l'utilisation d'agents mobiles afin de maximiser l'arrivée des données aux puits selon leur importance [13].

Cependant, hormis l'équipe du GROW Project [36, 103], peu d'articles traitent du sujet du transfert de données sur de longues distances et à haut-débit.

3.3.6 *Modélisation*

Cette section présente les choix de modélisation du *data muling* ainsi que les résultats. Nous nous focaliserons sur le contexte présenté en introduction. Nous chercherons à évaluer le débit apparent d'échange de données entre une source et un puits, exprimer la latence et avoir des informations sur l'énergie consommée. Une fois les notations explicitées ainsi que les métriques utilisées, nous prendrons un temps pour évoquer les hypothèses de notre modélisation. Suite à cela, nous mettrons en œuvre la modélisation pour deux scénarios possibles de *data muling* dans notre étude. Nous finirons par comparer ces résultats afin de déterminer les différents domaines de fonctionnement desdits scénarios.

3.3.6.1 *Métriques*

Le débit apparent dans un tel système se définit comme étant le quotient entre la quantité totale de données échangées, M , entre la

source et le puits et le temps total mis pour faire cet échange, T_{total} . Il est noté R_{eq} et s'exprime en bps.

$$R_{eq} = \frac{M}{T_{total}} \quad (3.1)$$

On cherchera à maximiser le débit R_{eq} , ce qui est équivalent à faire diminuer T_{total} , pour une quantité de donnée M fixée.

Ainsi, afin de pouvoir évaluer le temps total, on le modélisera comme la somme des temps passés en communication, des temps de déplacement et des temps annexes. Les temps annexes étant des temps de pénalité, notamment si l'on souhaite prendre en compte un temps arbitraire d'initialisation de la communication. Ainsi, on estime le temps total T_{total}

$$T_{total} = \sum T_{com} + \sum T_{travel} \quad (3.2)$$

avec T_{com} , le temps d'une communication, T_{travel} un temps de déplacement. Chacun de ses temps seront explicités et exprimés par la suite.

Le temps de latence, noté $T_{latency}$, prendra la même définition que dans le chapitre précédent, à savoir la durée entre l'émission du premier bit de donnée d'un paquet au niveau de la source à la réception du dernier bit de donnée de ce paquet au niveau du puits.

L'énergie consommée pour une mule i , $E_{i \text{ spent}}$ est la somme de toute la consommation d'énergie durant la mission totale. Afin de l'estimer, on recense pour chaque scénario le nombre de communications par mule, $n_{i \text{ com}}$, ainsi que la distance parcourue, $d_{i \text{ travel}}$

$$E_{i \text{ spent}} = \sum n_{i \text{ com}} \cdot E_{com} + \sum d_{i \text{ travel}} \cdot E_{travel} \quad (3.3)$$

avec E_{com} l'énergie nécessaire pour une communication et E_{travel} , l'énergie nécessaire pour effectuer un déplacement d'une unité de distance, tous deux exprimés en Joules.

3.3.6.2 Notations

Pour faire suite au contexte présenté dans l'introduction, nous considérerons que le collecteur de données est fixe et sera appelé la **source**, $\mathcal{S}$. De même, on appellera **puits**, $\mathcal{D}$ le lieu où l'on souhaite récupérer les données. Ce dernier sera là aussi considéré comme fixe. On appellera D la distance entre la source et le puits. Considérons l'ensemble $\mathcal{N} = \{n_0, n_1, \dots, n_{N+1}\}$ avec n_0 et n_{N+1} respectivement la Source et le Puits et $\forall i \in [1, N]$ les n_i sont les agents mobiles, les mules. Les mules sont donc au nombre de N .

Ainsi, chaque agent, y compris la source et le puits, a la capacité de communiquer sur une distance d avec un débit moyen R et les mules ont en plus une mémoire m limitée.

La position de chaque agent est décrite par leur abscisse curvilinéaire. On prendra pour n_0 et n_{N+1} les positions $p_0 = 0$ et $p_{N+1} = D$

(la source et le puits étant des agents statiques). On désignera par le vecteur $\tilde{\mathbf{p}} = \{p_0, p_1, \dots, p_{N+1}\}$ la position des mules au cours du temps. Au sujet des mules, on considérera qu'elles ont la capacité de se déplacer à la vitesse v_{mule} ou de rester immobile.

Concernant les données à transmettre, on considère que l'on veut en communiquer une quantité M . Cette quantité de donnée est divisée en $P \in \mathbb{N}^*$ paquets, pour s'adapter à la taille de la mémoire des mules.

3.3.6.3 Hypothèses

Les trois hypothèses qui nous autorisent à modéliser le temps total comme en sous-section 3.3.6.1 sont les suivantes :

1. une communication parfaite entre les différents agents dans la zone de portée : le débit moyen est constant et répétable à chaque fois qu'une communication est établie ; ainsi, deux instants de communications entre deux agents à deux temps différents seront égaux pour une quantité de donnée à transmettre identique ;
2. les mules sont considérées comme disposant d'une énergie infinie
3. les mules naviguent parfaitement : elles suivent une ligne géodésique pour rejoindre le point auquel elles doivent se rendre.

3.3.6.4 Modélisation du temps de transmission entre deux agents

Le temps de communication, selon notre hypothèse, est une combinaison de plusieurs facteurs : la quantité de données à échanger, notée m en bits, le débit de données, noté R en bits par seconde, et le temps de propagation, qui est $\frac{d}{c}$ en secondes, où c représente la célérité du canal de communication en mètres par seconde (1500 m.s^{-1} pour l'acoustique sous-marine, environ $2,25 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ pour l'optique sous-marine) [61]. Si la distance entre deux agents est d , la portée du système de communication peut être modélisée comme suit :

$$T_{com} = \frac{m}{R} + \frac{d}{c} + T_{extracom} \quad (3.4)$$

avec $T_{extracom}$ des délais supplémentaires survenant à chaque communication et considérés de manière forfaitaire. Par exemple, cela pourrait être un temps nécessaire pour se docker, un temps d'alignement du système de communication, un temps de rendez-vous (temps pour que deux mules se retrouvent hors temps de navigation). Grâce à l'hypothèse de répétabilité que nous avons évoquée plus haut, ce temps représente chaque communication qui a lieu. Nous aurions pu aussi choisir de prendre en compte des effets probabilistes propre à chaque réalisation de communication. Dans ce cas précis, T_{com} ne représenterait plus le temps de communication, mais le majorant de tous les temps de communication ayant eu lieu. Pour la suite

des développements, $T_{extracom}$ sera pris comme nul bien que cela ne représente pas tout à fait la réalité ; en revanche, cela facilitera la compréhension. Cependant, si le lecteur souhaite l'ajouter, il suffira de reprendre les calculs au niveau de la mention T_{com} et de les continuer avec l'expression qui lui convient. Une possibilité de ce $T_{extracom}$ serait de prendre en compte un temps d'initialisation aléatoire, ou un temps forfaitaire d'alignement ou de rendez-vous des mules.

3.3.7 *Muling circulaire*

3.3.7.1 *Initialisation*

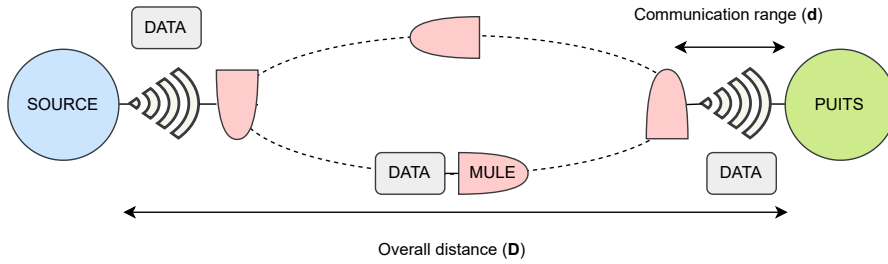


Figure 3.3 – Schéma du *muling circulaire*

Le scénario du *muling circulaire*, consiste à organiser N mules entre la source et le puits. Dans ce scénario en particulier, les mules ne peuvent pas communiquer entre elles. Elles ne communiquent qu'avec la source et le puits. Ce scénario est représenté sur la Figure 3.3 pour quatre mules. Ce scénario a été étudié par Teixeira et al. [103]. Nous avons adapté leur équation afin de faire apparaître le nombre de paquets échangés ainsi que la latence que nous avons définie.

Ainsi, en reprenant les notations précédentes, on considère que les mules sont réparties de manière uniforme sur l'intervalle de coordonnées $[d, L_{circ} + d]$. $L_{circ} = D - 2d$ est la distance sur laquelle les mules voyagent entre la source et le puits.

Avant de commencer la transmission, on considérera que les mules sont bien placées, et ce, afin de garantir la synchronisation. Ainsi, on positionne les mules de la manière suivante : $\forall i \in [1, N], p_i = i \cdot d + \frac{2L_{circ}}{N}$.

La synchronisation est ici importante afin de pouvoir étudier ce système en régime établi et le comparer avec son homologue linéaire, lui aussi en régime établi.

Cependant, un problème légèrement différent pourrait être traité, celui où il existe un moyen de communication qui permet à la source de notifier la mule qu'un paquet l'attend. Certainement, ce problème est en quelque sorte plus représentatif de la réalité, mais moins généralisable. C'est le parti qu'avait pris l'équipe de Teixeira et al. dans [103–105].

3.3.7.2 Comportement du système

Le système agit de manière à garantir une synchronisation entre les mules, leur temps d'arrivée pour collecter un paquet de données et leur temps pour transmettre le paquet au puits. Ainsi, les mules seront considérées comme conservant toujours la même distance à la mule qui les précède.

Lors de la mise en marche du système, la première mule recevra le premier paquet de la source puis se déplacera ensuite vers le puits. Pendant le déplacement, toutes les mules bougent de manière à conserver l'intervalle de distance les séparant de leurs voisines. Lorsqu'une mule vide se trouve à la source ou lorsqu'une mule chargée de données se trouve devant le puits, toutes les mules s'arrêtent le temps de laisser les mules, devant la source et le puits, échanger leurs données.

3.3.7.3 Temps de déplacement

On appelle T_{travel} le temps mis par une mule pour traverser l'ensemble de son intervalle. Par construction, celui-ci est de taille $L_{circ} = \frac{D-(N+1)d}{N}$. La vitesse des mules étant fixée à v_{mule} , le temps de déplacement est :

$$T_{travel}^{circ} = \frac{L_{circ}}{v_{mule}} \quad (3.5)$$

3.3.7.4 Latence

Chaque mule parcourt l'entière distance entre la source et le puits, soit une distance $L_{circ} = D - 2d$. Dans un tel scénario, le temps de latence, pour la transmission d'un paquet de m bits, est :

$$T_{latency}^{circ} = 2T_{com} + T_{travel}^{circ} \quad (3.6)$$

$$(3.7)$$

3.3.7.5 Temps total

Le temps total, lorsque le système est établi et que la source émet plusieurs paquets P , de taille m vers le puits, s'exprime par :

$$T_{total}^{circ} = T_{latency}^{circ} + \frac{(P-1)(2T_{com} + 2T_{travel}^{circ})}{N} \quad (3.8)$$

3.3.7.6 Énergie consommée

Selon le modèle défini dans la section 3.3.6, pour estimer l'énergie, nous avons besoin d'estimer le nombre de communications et la

distance parcourue par chaque mule i . Pour le *muling* circulaire, on obtient, pour P paquets transmis :

$$n_{i\ com}^{circ} = 2 \frac{P}{N} \quad (3.9)$$

$$d_{i\ travel}^{circ} = 2 \frac{P}{N} L_{circ} \quad (3.10)$$

3.3.7.7 Cas limites

Une première remarque, consiste à discuter du choix de relier la source et le puits en ligne droite pour chaque mule. En effet, des mules physiques entreraient en collision si elles suivaient ce chemin à l'aller comme au retour. Une solution aurait pu être de les modéliser comme circulant sur une ellipse. Au vu des grandes distances à parcourir, on fait l'hypothèse que le demi grand-axe de l'ellipse, orienté selon l'axe liant l'origine à la destination de la mule, est beaucoup plus grand que le demi petit axe. Ainsi, on se retrouve dans un cas que l'on pourra assimiler à une ligne droite.

Ensuite, dans le cas où il y aurait des paquets de données à transmettre en continu à la source, il faudrait *a minima* que les mules soient séparées de la distance égale à $T_{com} \cdot v_{mule}$. Ainsi,

$$\begin{aligned} 2 \frac{L_{circ}}{N} &\geq T_{com} \cdot v_{mule} \\ N &\leq \frac{2L_{circ}}{T_{com} \cdot v_{mule}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

On a exprimé ainsi une borne supérieure pour le nombre de mules que l'on peut introduire dans le système.

Dans le cas contraire, où la source produirait des données en temps réel, il deviendrait nécessaire que la distance entre chaque mule respecte le temps de production d'un paquet de données. Si la source produit des données avec un débit R_{prod} , alors :

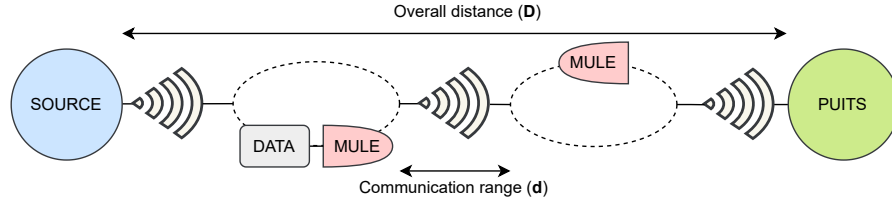
$$\begin{aligned} T_{prod} &\leq T_{intermules} \\ T_{prod} &\leq \frac{2L_{circ}}{N \cdot v_{mule}} \\ N &\leq \frac{2L_{circ}}{T_{prod} \cdot v_{mule}} \end{aligned} \quad (3.12)$$

avec $T_{prod} = \frac{m}{R_{prod}}$

3.3.8 Muling linéaire

3.3.8.1 Initialisation

Ce scénario de *muling* consiste à avoir N mules capables de communiquer entre elles et réparties entre la source et le puits. Une

Figure 3.4 – Schéma du *muling* linéaire

représentation du concept pour deux mules est donnée à la Figure 3.4. Ainsi, dans le cas où $d < \frac{D}{N+1}$, les mules peuvent se répartir dans N intervalles égaux, séparés par $N + 1$ points d'abscisse :

$$a_i = \frac{D}{N}i, i \in [0, N] \quad (3.13)$$

On choisit ainsi de mettre une mule par intervalle. Ainsi, $\forall i \in [1, N]$, la i -ème mule se trouve dans l'intervalle $[id + (i - 1)L, id + iL]$. Les mules sont séparées ainsi par une distance d correspondant à la portée maximale de leur système de communication. De même, les intervalles ont une largeur :

$$L_{circ} = \frac{D - (N + 1)d}{N} \quad (3.14)$$

Pour initialiser le système, plusieurs considérations sont possibles. Ainsi, on aurait pu les initialiser toutes à la source, ou bien toutes au puits, ou bien toutes sur une borne ou une position quelconque dans leur intervalle. Afin de permettre une synchronisation des mules entre les phases de communication et de déplacement, le système sera initialisé comme suit. La première mule, la plus proche de la source, sera initialisée à sa borne inférieure, la suivante à sa borne supérieure, la troisième celle inférieure, etc. Finalement, on obtient pour l'initialisation :

$$\forall i \in [1, N], i \mod 2 = \begin{cases} 1 & , p_i(t = 0) = id + (i - 1)L \\ 0 & , p_i(t = 0) = id + iL \end{cases} \quad (3.15)$$

Un exemple d'initialisation peut être trouvé sur la Figure 3.5.

3.3.8.2 Comportement du système

Grâce à l'initialisation choisie, on peut s'assurer d'une synchronisation dans le déroulement du scénario. Ainsi, il y aura une alternance de communication suivie d'un déplacement de la mule vers la borne opposée de son intervalle pour effectuer un nouveau déplacement et ainsi de suite. Ainsi, si on prend l'exemple à trois mules de la Figure 3.5, à la première étape, la première mule (au niveau de la source), reçoit les données pendant un temps T_{com} de communication, pendant que les autres restent au niveau de leur zone d'initialisation.

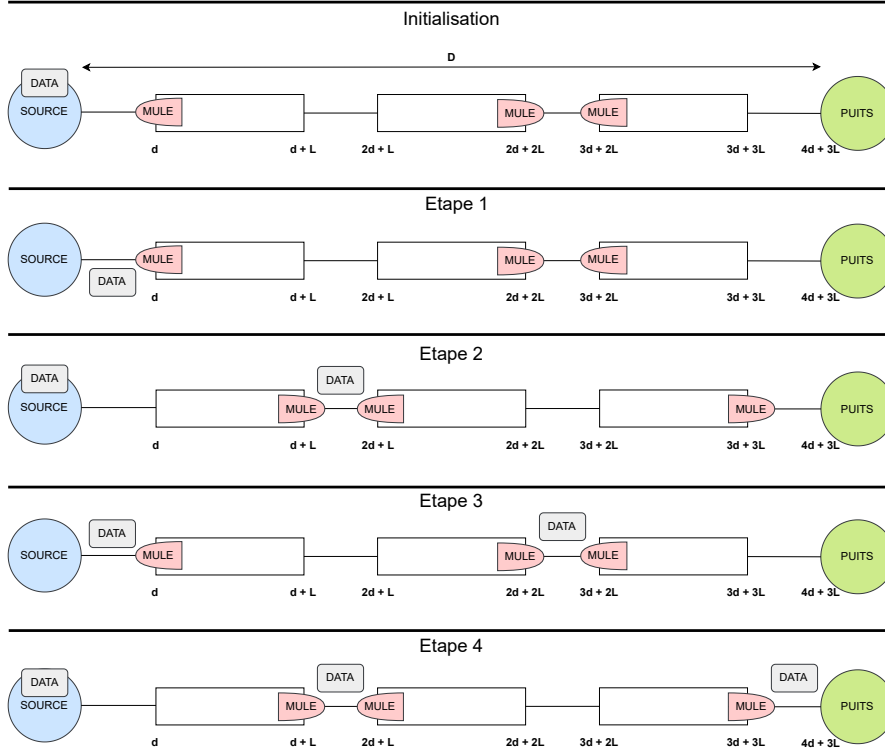


Figure 3.5 – Exemple d’initialisation et de fonctionnement pour un système de *muling* linéaire avec trois mules

Ensuite, lors de l’étape 2, toutes les mules se déplacent vers leur borne opposée, elles mettent un temps T_{travel} . Étape 3, on assiste de nouveau à un temps de communication, T_{com} , avant d’effectuer un autre déplacement à l’étape 4. À ce niveau, les étapes suivantes sont des alternances des étapes 3 et 4. Les états de communications et déplacements, constituent ainsi la base de notre étude pour ce scénario. Dans un système parfait, les temps T_{com} et T_{travel} sont vraiment identiques, lorsqu’on s’éloigne de cette hypothèse, ceux-ci deviennent alors les majorants sur l’ensemble sur l’étape.

3.3.8.3 Temps de déplacement

On appelle T_{travel}^{Lin} le temps mis par une mule pour traverser l’ensemble de son intervalle. Par construction, celui-ci est de taille $L_{circ} = \frac{D-(N+1)d}{N}$. La vitesse des mules étant fixées à v_{mule} , le temps de déplacement est :

$$T_{travel}^{circ} = \frac{L_{circ}}{v_{mule}} \quad (3.16)$$

3.3.8.4 Temps de latence

Dans le scénario de *muling* linéaire, et suivant les conditions d’initialisation, le temps de latence est donc le temps mis par chacune des mules à

faire une communication plus leur déplacement. Ainsi, on recense $N + 1$ communications et N déplacements.

$$T_{latency}^{circ} = (N + 1) \cdot T_{com} + N \cdot T_{travel}^{circ} \quad (3.17)$$

3.3.8.5 Temps total

En utilisant le résultat précédent, on peut estimer le temps total comme étant le temps de latence pour l'arrivée du premier paquet, puis du coût en temps effectif pour transmettre le suivant. Dessinons pour un système à trois mules la Figure 3.6 et portons attention sur les différents états qui s'effectuent en parallèle. On remarque, dans le cadre rouge, l'ajout de deux temps de déplacement et de deux temps de communication lors de la transmission d'un nouveau paquet.

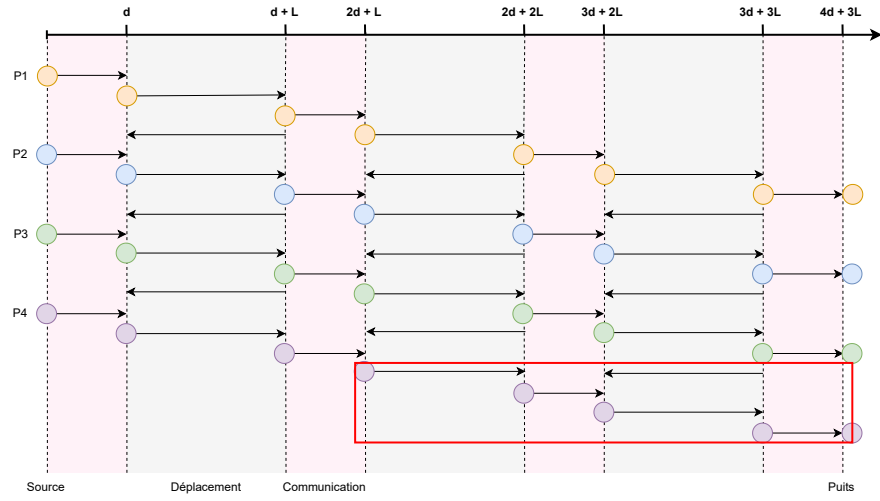


Figure 3.6 – Mise en évidence du temps effectif (le cadre rouge met en évidence les déplacements supplémentaires effectifs à chaque nouveau paquet transporté)

Ainsi, la transmission du premier paquet prendra le temps $T_{latency}$ et les suivants, prendront le temps effectif $2 \cdot T_{com} + 2 \cdot T_{travel}^{circ}$:

$$T_{total}^{circ} = T_{latency}^{circ} + 2(P - 1)(T_{com} + T_{travel}^{circ}) \quad (3.18)$$

avec P le nombre de paquets.

3.3.8.6 Énergie consommée

Afin d'exprimer l'énergie consommée selon le modèle défini dans la section 3.3.6, on recense le nombre total de communications effectuées ainsi que la distance que les mules ont parcourue.

$$n_{i\ com}^{circ} = 2P \quad (3.19)$$

$$d_{i\ travel}^{circ} = 2PL_{circ} \quad (3.20)$$

3.3.8.7 Cas limites du muling linéaire

Dans le *muling* linéaire, on ne peut pas ajouter indéfiniment des mules. En effet, à partir d'un certain nombre N de mules, la distance L_{circ} deviendra nulle et donc les mules agiront en tant que relais fixe. En ajouter plus serait redondant dans le cas idéal. Le nombre maximal de mules est donc :

$$N_{max} = \frac{D - d}{d} \quad (3.21)$$

De plus, si la source doit produire ses paquets de données en temps réel au débit R_{prod} , alors, pour que la mule numéro une ait un paquet à recevoir lorsqu'elle reviendra au début de sa zone, il faut que le nombre de mules respecte :

$$\begin{aligned} T_{prod} &\leq T_{intermule} \\ \frac{m}{R_{prod}} &\leq T_{com} + 2T_{travel} \\ N &\leq \frac{D - d}{(T_{prod} - T_{com}) \cdot \frac{v_{mule}}{2} + d} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Avec $T_{prod} = \frac{m}{R_{prod}}$

3.3.9 Synthèse

Dans cette section de formalisation du problème, nous nous sommes intéressés à deux scénarios de *data muling* en adéquation avec notre problème initial. Nous avons mis en évidence, pour chacun d'entre eux, l'expression de la latence et du temps de transmission total pour un nombre de paquets donné en fonction du nombre de mules et de leurs caractéristiques. Enfin, une expression de l'énergie consommée a été formulée.

3.4 ANALYSE ET COMPARAISON DE CES MODÈLES

Dans cette section, nous comparerons les différentes expressions obtenues dans la section précédentes avec une méthode de transmission directe entre la source et le puits, mais aussi entre elles. La méthode de comparaison relèvera du calcul d'un gain G .

3.4.1 Cas d'une communication directe entre la source et le puits pour la latence

Supposons que l'on puisse faire une transmission de données entre la source et le puits. Celle-ci devra donc transporter P paquets de m bits, avec un débit R_{circ} avec le $_{circ}$ pour *long range* (longue portée). De

plus, le signal, devra parcourir la distance D , à la célérité c_{circ} . Ainsi, le temps de transmission sera :

$$T_{total}^{circ} = \frac{M}{R_{circ}} + \frac{D}{c_{circ}} = \frac{P \cdot m}{R_{circ}} + \frac{D}{c_{circ}} \quad (3.23)$$

3.4.2 Cas de la propagation négligeable

Dans certaines sous-sections, lorsque cela sera mentionné, on se permettra de négliger le terme de propagation. Il s'agira ainsi de s'interroger si l'on peut négliger le terme $\frac{D}{c_{circ}}$ de l'Équation 3.23 et le terme $\frac{d}{c}$ qui apparaît dans l'expression du temps de communication, Équation 3.4 de la section 3.3.6.4.

Deux choix motivent cette décision. Premièrement, la célérité de l'onde est bien souvent grande devant la distance à parcourir. On rappelle que la célérité du son dans l'eau se situe autour des 1500 m.s^{-1} , celle de la lumière autour de $2.25 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Cette simplification trouve son sens pour une communication courte portée, peu importe la technologie. Cependant, elle est plus difficilement réalisable dans le cadre d'une communication à longue ou très longue portée. Si on se tient aux scénarios évoqués dans l'introduction, les portées maximales des systèmes de communications acoustiques en fond-surface se situent entre 6000 m et 10000 m. Ainsi, les temps de propagation du son se situent dans l'intervalle $[4, 6.7] \text{ s}$.

La deuxième raison concerne la comparaison entre ce temps de propagation et le temps pour transmettre la totalité des données. Ce dernier est exprimé par les termes $\frac{m}{R_{circ}}$ ou $\frac{m}{R}$ dans les Équations 3.23 et 3.4 de la section 3.3.6.4. En effet, dans la plupart du temps, les quelques secondes des temps de propagation sont faibles à partir d'un certain nombre de données à transmettre, que l'on considèrera atteint du fait que l'on souhaite transmettre de grandes quantités de données.

3.4.3 Étude du gain pour le data muling linéaire par rapport à une communication directe

Considérons l'émission d'une quantité $M = P \cdot m$ de données à transmettre. Une communication source-puits directe est modélisée par l'Équation 3.23. Pour le *muling* linéaire, le temps que l'on considère est le temps de latence exprimé par l'Équation 3.17, qui représente aussi la transmission d'un paquet. Le gain s'exprime ainsi :

$$G_{circ} = \frac{T_{total}^{circ}}{T_{total}^{circ}} \quad (3.24)$$

$$G_{circ} = \frac{\frac{P \cdot m}{R_{circ}} + \frac{D}{c_{circ}}}{(N + 1) \cdot T_{com} + N \cdot T_{travel}^{circ} + 2(P - 1)(T_{com} + T_{travel}^{circ})} \quad (3.25)$$

On se propose ici de regarder son évolution en fonction de l'évolution du nombre de mules et de la quantité de données à transmettre.

3.4.3.1 Cas du temps de déplacement faible devant le temps de communication

Dans le cas du temps de déplacement faible devant le temps de communication, nous considérons que $\frac{T_{travel}}{T_{com}} \ll 1$. En réécrivant l'Équation 3.24 pour faire apparaître le rapport $\frac{T_{travel}}{T_{com}}$ puis en procédant à la simplification tout en négligeant les termes de propagation et en considérant que nous sommes en régime établi, le nombre de paquets P tend vers $+\infty$.

$$\begin{aligned}
 G_{circ} &= \frac{T_{total}^{circ}}{\left[(N+1) + N \frac{T_{travel}}{T_{com}} + 2(P-1) \left(1 + \frac{T_{travel}}{T_{com}} \right) \right] \cdot T_{com}} \\
 &\simeq \frac{T_{total}^{circ}}{[(N+1) + N + 2(P-1)] \cdot T_{com}} \\
 &\simeq \frac{\frac{P \cdot m}{R_{circ}}}{(N+1) + N + 2(P-1) \frac{m}{B}} \\
 &\simeq \frac{P \cdot B}{[(N+1) + N + 2(P-1)] R_{circ}} \\
 &\simeq \frac{B}{2B_{circ}}
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Ainsi, afin d'obtenir un bénéfice pour le temps de communication total, il est nécessaire que le débit de la communication courte portée soit supérieur à celui de la communication longue portée dans le cas où cette dernière existerait.

3.4.4 Étude du gain pour le data muling circulaire par rapport à une communication directe

En se mettant dans la même situation qu'à la section 3.4.3, on peut exprimer le gain pour le *data muling* circulaire par rapport à une communication directe.

$$G_{circ} = \frac{T_{total}^{circ}}{T_{total}^{circ}} \tag{3.27}$$

$$G_{circ} = \frac{\frac{P \cdot m}{R_{circ}} + \frac{D}{c_{circ}}}{2 \cdot T_{com} + T_{travel}^{circ} + 2(P-1)(T_{com} + T_{travel}^{circ})} \tag{3.28}$$

3.4.4.1 Cas du temps de déplacement faible devant le temps de communication

En se mettant dans la configuration $\frac{T_{travel}}{T_{com}} \ll 1$, avec des termes de propagations négligeables et en régime établi, on obtient :

$$\begin{aligned}
 G_{circ} &= \frac{T_{total}^{circ}}{T_{com} \left[2 + \frac{T_{travel}^{circ}}{T_{com}} + \frac{2(P-1)}{N} \left(1 + \frac{T_{travel}^{circ}}{T_{com}} \right) \right]} \\
 &\simeq \frac{T_{total}^{circ}}{T_{com} \left[2 + \frac{2(P-1)}{N} \right]} \\
 &\simeq \frac{\frac{P \cdot m}{R_{circ}}}{\frac{m}{B} \left[2 + \frac{2(P-1)}{N} \right]} \\
 &\simeq \frac{N}{2} \cdot \frac{B}{R_{circ}}
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

On retrouve un résultat sensiblement identique à celui de la section 3.4.3.1. Cependant, il diffère puisque ici, le nombre de mules rentre en compte et leur augmentation permet l'amélioration du temps de communication et donc du débit équivalent.

3.4.5 Comparaison du muling circulaire et linéaire

3.4.5.1 Latence et temps total de communication

On peut comparer le scénario circulaire avec le scénario linéaire en exprimant le gain. Commençons par le gain en latence. Celui-ci s'écrit :

$$G_{latency} = T_{latency}^{circ} - T_{latency}^{lin} = (N-1) \left(T_{com} - \frac{d}{v_{mule}} \right) \tag{3.30}$$

On obtient un résultat similaire, en comparant les temps totaux :

$$G_{total} = T_{total}^{circ} - T_{total}^{lin} = K \left(T_{com} - \frac{d}{v_{mule}} \right) \tag{3.31}$$

Avec $K = \left(1 + \frac{2(P-1)}{N} \right) (N-1)$.

Ainsi, le signe des gains $G_{latency}$ et G_{total} est dirigé par le signe du facteur $T_{com} - \frac{d}{v_{mule}}$. Ce facteur compare le temps nécessaire pour envoyer des données via l'interface sans fil à courte portée au temps nécessaire à une mule pour parcourir une distance égale à la portée de communication (le second terme). Lorsque le critère est négatif, le temps nécessaire pour parcourir la distance d à la vitesse de la mule est supérieur au temps nécessaire pour communiquer sur cette distance d . Dans ce cas, le modèle linéaire est plus approprié. Dans le cas contraire, il est moins coûteux pour les mules de se déplacer, et le modèle circulaire est le plus approprié. Cependant, dans un monde sous-marin, T_{com} est généralement supérieur à $\frac{d}{v_{mule}}$. En effet,

pour des AUVs allant à une vitesse de 5 m.s^{-1} par exemple, et un système de communication optique d'une portée de 10 m pour un débit de 50 Mbps, si la quantité de donnée transportée est supérieure à 20 Mbps, on se retrouve dans le cas $T_{com} \geq \frac{d}{v_{mule}}$. Cela étant dû au cumul des portées de communication faible, et du grand volume de données à transporter. En ce qui concerne la latence, on retrouve les mêmes résultats.

Il s'agit ainsi d'un critère permettant de choisir le modèle de *data muling* le plus performant. Nous le formalisons comme suit :

$$T_{com} - \frac{d}{v_{mule}} = \begin{cases} < 0, & \text{Meilleur débit apparent pour le muling linéaire.} \\ > 0, & \text{Meilleur débit apparent pour le muling circulaire.} \end{cases}$$

On notera aussi, que ce terme $\frac{d}{v_{mule}}$ intervient dans la factorisation par le nombre de mules, N , du temps de latence pour le scénario de *muling* linéaire. On remarque alors dans ce cas que l'augmentation du nombre de mules n'est pas toujours synonyme d'une amélioration, i.e. d'une diminution, du temps communication. Ce qui dans le cas du *data muling* circulaire est toujours le cas. Dans ce scénario, augmenter le nombre de mules est toujours bénéfique pour la diminution du temps de communication.

3.4.5.2 Énergie consommée

Comparons le nombre de communications et la distance parcourue par les mules.

$$\frac{n_{i\ com}^{circ}}{n_{i\ com}^{circ}} = N \quad (3.32)$$

$$d_{i\ travel}^{circ} - d_{i\ travel}^{circ} = -2 \frac{P}{N} (N-1)d \quad (3.33)$$

Dans le cas d'une unique mule, $N = 1$ les deux scénarios sont identiques. En revanche, lorsque le nombre de mules augmente, le scénario circulaire est plus efficace en termes de nombre de communications par mules. D'un autre, coté, ce scénario implique aussi une plus grande distance parcourue pour chaque mule.

3.4.6 Simulations

Afin de se faire une idée des débits atteignables, nous exposons les variations du scénario suivant.

On considère une source de données possédant une quantité de données infinies, mais disponible par paquets de 10 GB. On souhaite les déplacer sur une distance de 200 mètres à l'aide de mules, fonctionnant soit en mode circulaire, soit en mode linéaire. Ces mules sont équipées

d'une interface de communication optique entre elles capable de s'échanger 50 Mbps, sur une distance de 10 mètres. Les mules seront considérées comme ayant une vitesse de déplacement de 2 m.s^{-1} . Ainsi, nous obtenons les courbes suivantes, traçant le débit en fonction du nombre de paquets transmis et en fonction du nombre de mules.

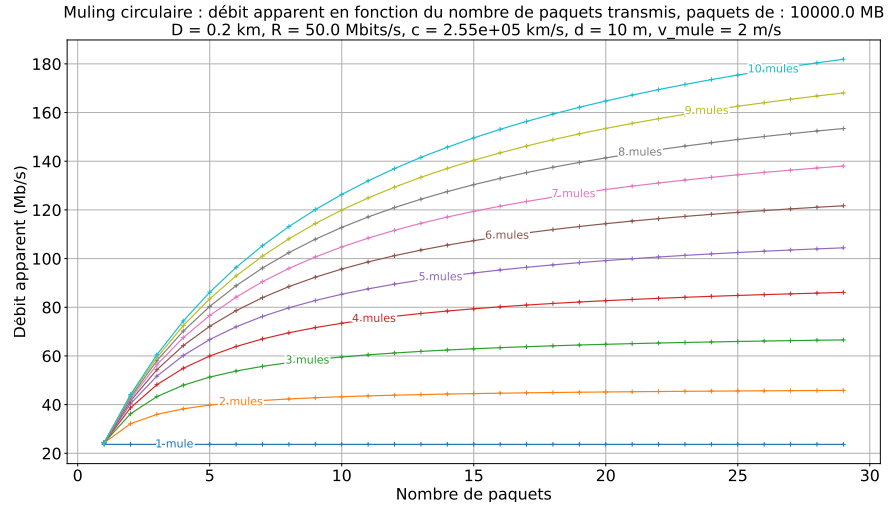


Figure 3.7 – Variation du débit apparent R_{eq} de l'approche du *data muling* linéaire en fonction du nombre P de paquets, chaque paquet étant de taille $m = 10000 \text{ MB}$.

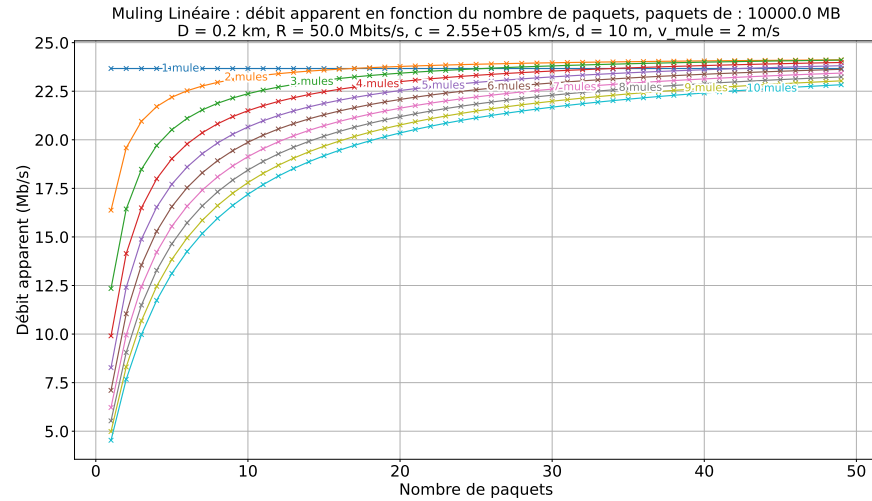


Figure 3.8 – Variation du débit apparent R_{eq} de l'approche du *data muling* linéaire en fonction du nombre P de paquets, chaque paquet étant de taille $m = 10000 \text{ MB}$.

De plus pour une communication directe en acoustique, en reprenant la Figure 2.13, pour cette distance, les débits maximums sont de l'ordre de 500 kbps.

Ainsi, avec nos hypothèses (navigation sans erreurs, en ligne droite et sans erreurs de communications), les deux scénarios de *data muling* promettent des débits plus importants, supérieur à 10 Mbps. En comparant les deux sortes de *data muling*, Figure 3.7 et Figure 3.8, on se rend compte aussi dans ce scénario que pour le muling circulaire, les débits deviennent plus important en augmentant le nombre de mules alors que c'est l'inverse pour le muling linéaire. En effet, on obtient ce résultat lorsque l'on calcule le critère exprimé par l'Équation 3.4.5.1. Dans cette illustration, ce critère vaut 15. Ce qui signifie en effet que le muling circulaire possédera le meilleur débit apparent.

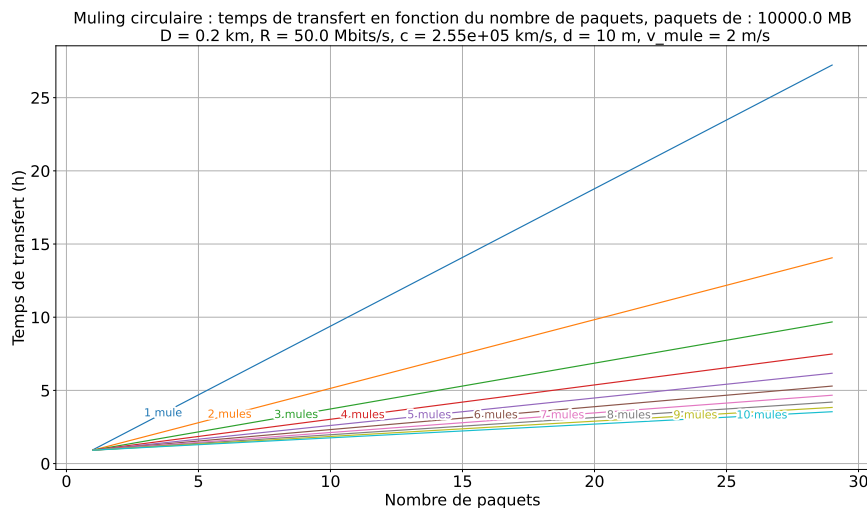


Figure 3.9 – Variation du temps de transfert de l'approche du *data muling* linéaire en fonction du nombre P de paquets, chaque paquet étant de taille $m = 10000 \text{ MB}$.

Cependant, lorsque l'on observe les temps de transmission, Figure 3.7 et Figure 3.8, plutôt que les débits, on remarque qu'en dépit de l'optimisme du modèle, les temps de transfert restent importants. Ceci devenant contraignant pour le choix de la mule qui devra nécessairement pouvoir fonctionner durant tout ce temps.

Afin de diminuer le temps de rapatriement des données, on pourra ainsi choisir des mules plus rapides, endurantes ou bien équipées d'un système de communication plus performant. On pourra aussi jouer sur la taille des paquets à chaque communication comme le montre les Figure 3.11 et Figure 3.12.

Afin d'avoir une vue un peu plus complète, on peut aussi tracer la variation de débit en fonction de la distance séparant la source du puits. On obtient ainsi les Figure 3.13 et Figure 3.14.

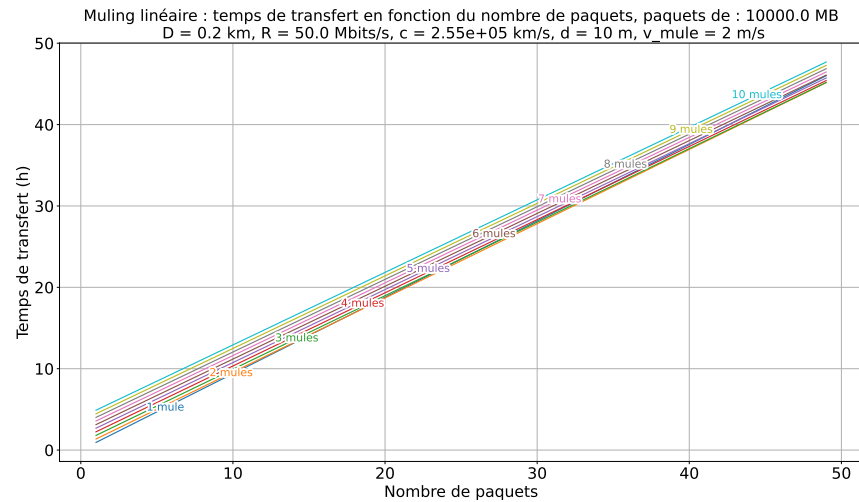


Figure 3.10 – Variation du temps de transfert de l’approche du *data muling* linéaire en fonction du nombre P de paquets, chaque paquet étant de taille $m = 10000 \text{ MB}$.

3.4.7 Synthèse

Dans cette section, nous avons comparé les performances du *data muling* linéaire et circulaire avec d’un côté une communication équivalente directe entre la source et le puits et de l’autre entre elles.

La comparaison avec la communication directe a fait apparaître l’importance d’avoir une communication courte portée avec des débits importants afin de maximiser le gain des solutions de *data muling*. De plus, dans le cas du *muling* circulaire, on observe aussi la possibilité d’augmenter ce gain en augmentant le nombre de mules.

Lorsque l’on compare les deux scénarios de *muling*, il apparaît que le gain de l’un par rapport à l’autre en termes de débit équivalent met en évidence le critère 3.4.5.1. Celui-ci lie le temps d’une communication au temps de déplacement d’une mule sur la portée de celle-ci.

Avec ces outils on peut désormais réaliser des abaques permettant de prédire les performances du *data muling*.

Au final, en les traçant dans le cadre de la section 3.4.6, on se rend compte du temps qu’il faut pour rapatrier une centaine de gigaoctets de données depuis une source, dans le milieu sous-marin. Dans notre cas, si on prend deux mules pour un scénario circulaire, pour le transport de 100 GB, on obtient, selon la Figure 3.7, un débit apparent de 43 Mbps, contre 500 kbps pour une communication acoustique directe. On retiendra que le *data muling* permet de mettre en avant une solution visant à améliorer le débit des communications sous-marine, sur de courtes périodes, de l’ordre de l’autonomie des mules choisies. L’état de l’art montre que des micro-AUV tels que ceux proposés par la société Seaber ou bien RTSYS, pourrait convenir à une utilisation

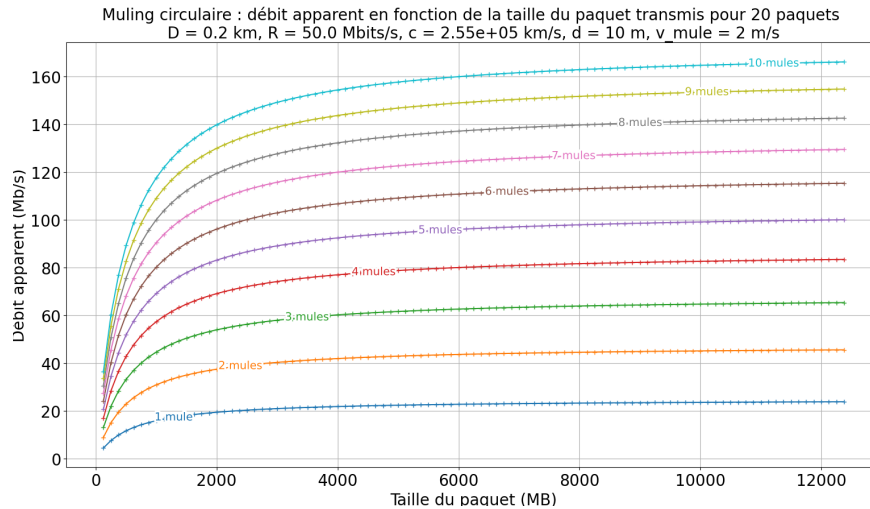


Figure 3.11 – Variation du temps de transfert de l'approche du *data muling* circulaire en fonction de la taille d'un paquet, pour le transfert de 20 paquets

potentielle en tant que mule. Ceux-ci ont une autonomie, sans système de communication optique, annoncée entre 6 et 10 heures [73, 114].

3.5 CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre a permis premièrement de présenter le problème de la collection de données dans le cadre d'un réseau de capteurs. De plus, plusieurs réponses connues ont été présentées dont le *data muling* qui est une réponse à ce problème par l'utilisation d'agents mobiles.

Ensuite, nous avons regardé plus en détails le *data muling*, son historique et les travaux faits à ce sujet. C'est dans ce cadre que nous avons proposé une modélisation de deux scénarios différents, linéaire et circulaire. L'expression des performances de chacun des modèles se trouve aux équations 3.18 et 3.8. Elles sont valables avec les hypothèses : navigation sans erreurs en ligne droite des mules qui savent se retrouver pour se communiquer les données, avec des communications qui se font à un débit maximal dès que la paire émetteur-destinataire est en portée, sans alignement ou initialisation nécessaire, sans aucune erreur de transmission. Nous avons ensuite pu les comparer sur divers aspects : la latence, le temps total de transmission et la performance énergétique. Le point important à retenir est l'établissement du critère, exprimé dans l'Équation 3.4.5.1. Celui-ci permet en effet de discriminer lequel des deux systèmes de *data muling* exposés performera le mieux en fonction du temps de communication d'un paquet entre deux mules, de la portée du système de communication et de la vitesse d'avance des mules.

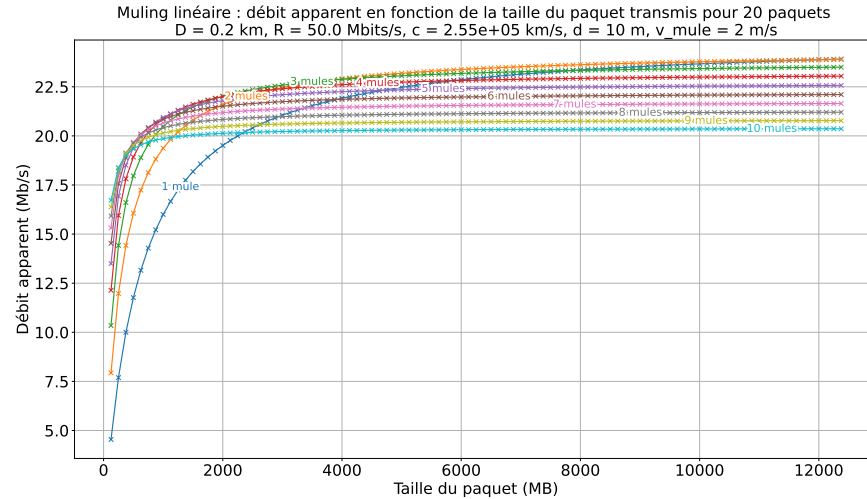


Figure 3.12 – Variation du temps de transfert de l'approche du *data muling* circulaire en fonction de la taille d'un paquet, pour le transfert de 20 paquets

Enfin, nous avons exposé un exemple afin de montrer les différentes tendances des modèles et mettre en avant les meilleures performances en termes de débit du *data muling* vis-à-vis d'une communication acoustique directe entre la source et le puits.

Un dernier point de vigilance, sont les hypothèses très fortes, notamment sur la navigation des mules. Ces hypothèses ne seront jamais rencontrées dans la vie réelle et ne peuvent faire que diminuer les performances du *data muling* si elles venaient à être prise en compte. Une chose est certaine cependant, le scénario circulaire sera moins impacté par ces changements que le scénario linéaire qui profite amplement de la navigation parfaite dans les multiples échanges entre les mules.

Muling circulaire : débit apparent en fonction de la distance entre la source et le puits pour 20 paquets de : 10000.0 MB
 $R = 50.0 \text{ Mbits/s}$, $c = 2.55\text{e}+05 \text{ km/s}$, $d = 10 \text{ m}$, $v_{\text{mule}} = 2 \text{ m/s}$

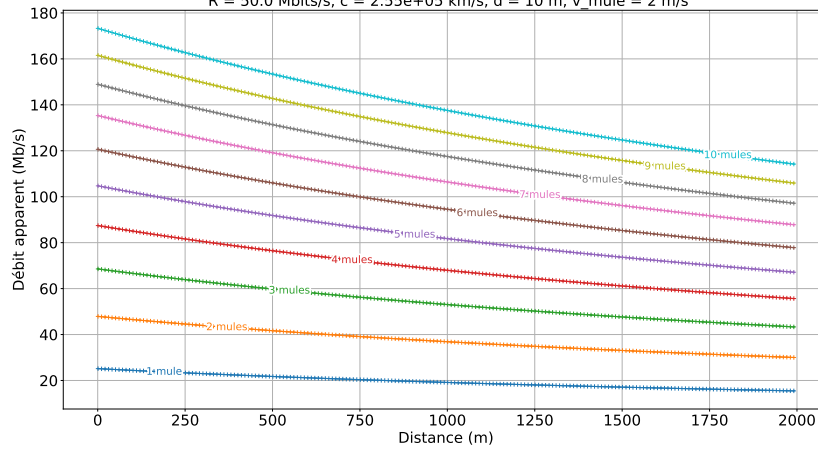


Figure 3.13 – Variation du temps de transfert de l'approche du *data muling* circulaire en fonction de la distance entre la source et le puits, pour le transfert de 20 paquets de 10 GB

Muling linéaire : débit apparent en fonction de la distance entre la source et le puits pour 20 paquets de : 10000.0 MB
 $R = 50.0 \text{ Mbits/s}$, $c = 2.55\text{e}+05 \text{ km/s}$, $d = 10 \text{ m}$, $v_{\text{mule}} = 2 \text{ m/s}$

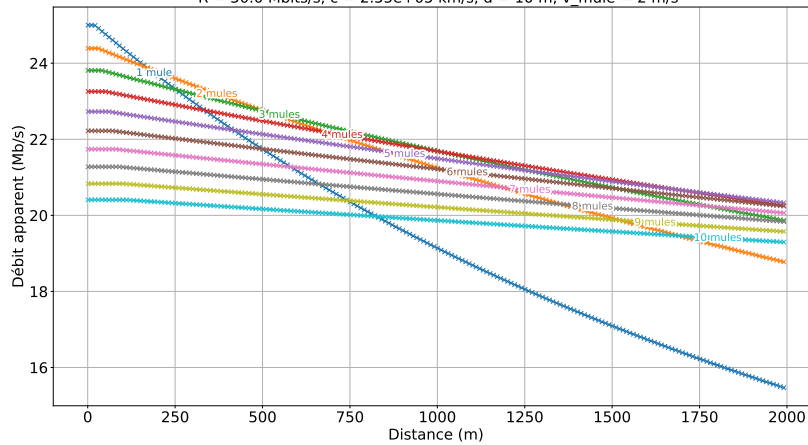


Figure 3.14 – Variation du temps de transfert de l'approche du *data muling* linéaire en fonction de la distance entre la source et le puits, pour le transfert de 20 paquets de 10 GB

EXPÉRIMENTER LE *DATA MULING*

4.1 INTRODUCTION AU CHAPITRE

Ce chapitre a pour but de mettre en relation les modèles de performance développés aux chapitres précédents et une expérimentation des différents principes qui interviennent dans les scénarios de *data muling*. Ce chapitre couvrira ainsi les différents choix techniques et les développements réalisés pour mettre en œuvre un scénario de *data muling*. Il présentera premièrement une introduction à l'expérience, puis exposera chacune des piles technologiques utilisées pour réaliser les missions de *data muling*. Enfin, une dernière section présentera les résultats des tests qui se sont déroulés sur le lac de Guerlédan lors du Submeeting qui a eu lieu du 24 au 28 avril 2023.

4.2 INTRODUCTION À L'EXPÉRIENCE

4.2.1 *Objectif*

Nous souhaitons monter une expérience pour expérimenter les concepts et enjeux du *data muling*. Ainsi, nous avons plusieurs besoins afin de pouvoir mener les tests:

- créer les données à transmettre
- créer une source dans laquelle seront stockées les données,
- créer un puits de destination où les données devront être acheminées,
- créer une ou plusieurs mules, i. e. des agents mobiles avec une interface de communication courte portée

4.2.2 *Choix d'expérimentation*

Nous avons choisi de faire l'expérimentation en surface, à l'aide de bateaux automatisés pour la réalisation d'un scénario de *data muling*. L'avantage de le faire en surface est double pour nous. Premièrement, il permet de diminuer les temps de développements, car construire un porteur sous-marin communicant et capable de faire des rendez-vous est complexe, les mettre en œuvre l'est d'autant plus. Deuxièmement,

nous bénéficions des DDboats, des bateaux automatisables fabriqués à l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA) Bretagne, nous permettant d'utiliser une interface *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) pour les mules pour s'échanger les données pour faire cela. Ce choix est discuté dans la conclusion quant au passage à une éventuelle expérimentation en sous-marin.

On considère le scénario suivant :

- les positions de la Source et du Puits seront définies par leurs coordonnées,
- les données seront des données factices dont on contrôle la taille et sont situées aux niveaux de la source.
- la mise en place d'un scénario de *data muling* linéaire, en spécifiant les zones de navigation des mules
- la mise en place d'un scénario de *data muling* circulaire

Ainsi, la première section décrira le fonctionnement choisi pour les communications entre les différents agents. La deuxième section présentera les spécificités de la Source et du Puits. La troisième section abordera les algorithmes implémentés dans les mules pour leur déplacement. Enfin, la dernière section présentera les résultats et viendra conclure sur les expérimentations.

4.3 COMMUNICATION ENTRE LES AGENTS

Pour les transmissions des données entre les agents, le fait d'être en surface permet de pouvoir utiliser les interfaces et technologie réseau grand public : Antenne Wifi 2.4 GHz, routeur, point d'accès. Les DDboats n'ayant qu'une seule interface Wifi, nous nous sommes appuyés donc sur un unique réseau. Afin de simuler les différentes interfaces des agents, deux processus tournent pour les communications : un client qui a pour but de se connecter à un serveur hébergé par l'agent suivant. Ainsi, on se retrouve dans la situation décrite sur la figure 4.1 et chaque agent ne peut parler qu'avec l'agent désigné.

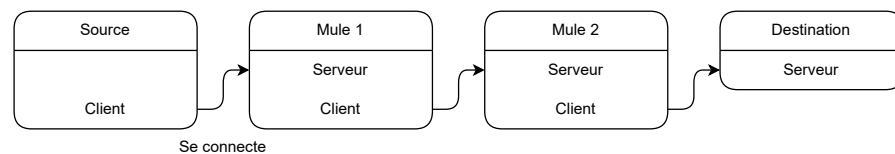


Figure 4.1 – Architecture Client-Serveur des mules représentant les différentes connexions dans le cas d'un scénario linéaire. Dans le cas d'un scénario circulaire, chaque mule n'est reliée qu'au client de la source et au serveur du puits.

De plus, du fait de n'avoir qu'un unique réseau, pour simuler que les mules sont en portée de communication, le client communique régulièrement la position estimée du porteur. Ainsi, le serveur peut autoriser la communication des données seulement lorsque les porteurs

sont à une distance équivalent à la portée de communication choisie par l'utilisateur (Fig. 4.2). Ainsi, cette petite architecture permet de simuler partiellement une interface de communication en spécifiant la portée de communication. Cependant, avec cette modélisation, il ne nous est pas possible de spécifier les débits de communication, ni tout autre paramètres qui composent un système de communication. Cette solution ne nous a pas permis de fixer les débits. Comme on le verra dans la section 4.7 cette solution s'est avérée problématique pour la constance des débits de communication, mettant en valeur l'importance dans la gestion des communications pour le *data muling*. Néanmoins, nous avons pu comparer les différents scénarios avec les modélisations.

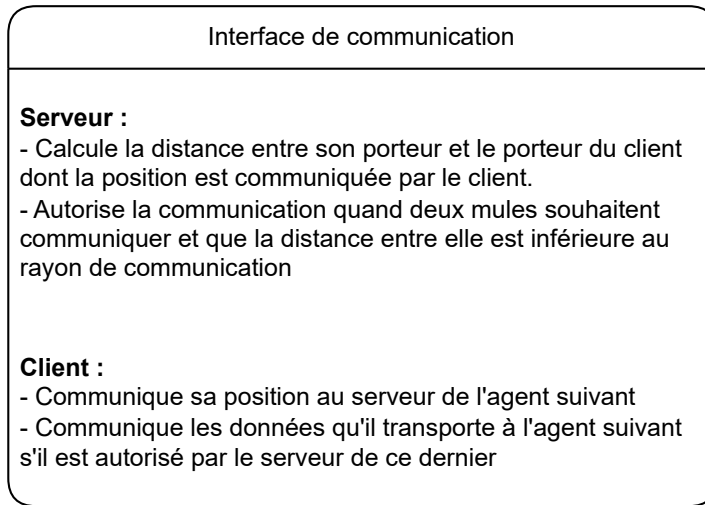


Figure 4.2 – Description des fonctionnalités de l'interface de communication

4.4 OUTILS ET NOTATION

4.4.1 Repères et changements de repères

Pour les développements qui suivront, nous avons besoin de manipuler plusieurs référentiels différents. Ainsi, on nommera un système de référence $\mathcal{F}$ avec un indice pour identifier ce système, par exemple $\mathcal{F}_{nav}$ pour le système associé au repère inertiel. L'expression d'un vecteur dans la base de ce système s'écrira avec un exposant identifiant la base, ainsi $\mathbf{u}^{nav}$ représente le vecteur $\mathbf{u}$ dans la base associé au repère inertiel $\mathcal{F}_{nav}$. De plus, pour passer d'un repère à un autre, on notera la matrice de rotation associée $\mathbf{C}_{from}^{to} \in \text{SO}(3)$ avec en indice la base de départ et en exposant la base d'arrivée. Ainsi, $\mathbf{C}_{nav}^b$ représente la rotation du repère inertiel *nav* dans un repère *body* *b*.

4.4.2 Projection

Pour cette expérimentation, nous utiliserons un repère cartésien dont l'origine est une latitude et une longitude arbitraire. Dans la mesure où l'étendue spatiale de la zone expérimentale est très petite, l'approximation du plan tangent à la surface de la Terre est une excellente approximation pour les deux coordonnées horizontales. Ainsi, pour passer d'une mesure de latitude et de longitude venant d'un récepteur *Global Navigation Satellite System* (Système de Navigation par Satellite) (GNSS), on peut utiliser la projection suivante:

$$\begin{cases} x &= \rho \cdot \cos(lon \cdot \frac{\pi}{180}) \cdot (lat - LAT_REF) \cdot \frac{\pi}{180} \\ y &= \rho \cdot (lon - LON_REF) \cdot \frac{\pi}{180} \end{cases} \quad (4.1)$$

où lat, lon sont la latitude et la longitude exprimées en degré décimal, ρ est le rayon moyen de la Terre et LAT_REF, LON_REF sont la latitude et la longitude du point de référence que nous avons choisi pour être l'origine du repère

En faisant, ainsi, on passe d'un repère géographique à un repère cartésien dont l'axe y est orienté positivement dans la direction du Nord et l'axe x est orienté positivement vers l'Est du point de référence.

4.4.3 Fonction "dent de scie" (sawtooth)

Nous allons aussi devoir calculer des différences d'angles. La solution consistant à soustraire directement ces angles n'est pas intéressante, car d'une part rien ne garantit que le résultat se retrouve dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$ et d'autre part cela peut amener à devoir faire des rotations qui ne sont pas optimales. Cette fonction devra donc renvoyer le plus petit angle à parcourir pour passer d'un angle à un autre. Celle-ci possède plusieurs définitions dont une est donnée ici:

$$sawtooth(x) = ((x - \pi) \bmod 2\pi) - \pi \quad (4.2)$$

Exemple (Figure 4.4): De quel angle faut-il tourner pour passer d'un angle de $\frac{\pi}{4}$ à un angle de $\frac{7\pi}{4}$? Sans l'utilisation de la fonction *sawtooth*, en faisant la différence, nous obtenons $\frac{3\pi}{2}$. Cela signifie qu'il faudrait parcourir un tel angle dans le sens trigonométrique pour arriver en $\frac{7\pi}{4}$. Cependant, une deuxième solution existe, celle de tourner d'un angle de $\frac{\pi}{2}$ dans le sens horaire (i. e. $-\frac{\pi}{2}$ pour avoir le même résultat). C'est ce que donne l'application de la fonction *sawtooth*, un angle de $-\frac{\pi}{2}$.

4.5 SOURCE ET Puits

L'utilisation d'un unique réseau permet d'implémenter la Source et le Puits comme étant deux processus distincts tournant sur le réseau,

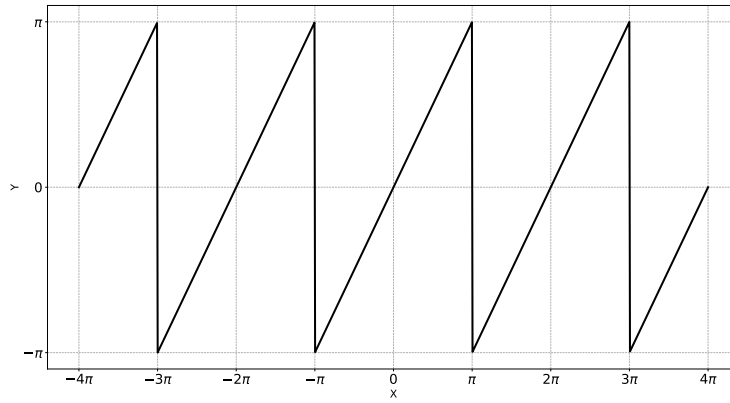


Figure 4.3 – Évolution de la fonction *sawtooth* sur l'intervalle $[-4\pi, 4\pi]$

i. e. les deux sont virtuels. Il s'agit d'une expérimentation que l'on pourrait qualifier d'*Hardware in the Loop* (HiL).

Ainsi la Source possède comme attribut sa position, ses données à transmettre et un client pour pouvoir les communiquer à la mule qui viendra les chercher. Quant au Puits, il possède sa position, un espace de stockage vide et un serveur pour gérer le processus de réception des données transportée par une mule et les stocker.

Pour l'expérimentation, la Source sera placée en $(0,0)$ du repère cartésien, le Puits, lui, se situera au coordonnées $(50, -40)$ mètres.

4.6 DES DDBOATS COMME MULES

Le DDboat est un petit bateau créé à partir d'une coque de bateau radioguidé qui a pour vocation d'être automatisé. Il a été créé en tant que support d'enseignement pour les étudiants de Master 2 de robotique mobile. Son faible prix permet d'avoir une vingtaine d'exemplaires disponibles. De plus, tout un système de réseau est développé pour pouvoir accéder à son système embarqué.

4.6.1 Modèle

Le DDboat, est un robot mobile, et donc il peut être représenté par un système dynamique. On le modélise par un système d'équations différentielles de la forme :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{y}(t) = g(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \end{cases} \quad (4.3)$$

Avec le vecteur $\mathbf{x}(t)$ qui représente l'état du robot à l'instant t , la fonction f qui modélise l'évolution temporelle de $\mathbf{x}$ à partir de l'état $\mathbf{x}$ et d'un vecteur d'entrée (appelé *input*) ou commande $\mathbf{u}(t)$. De même,

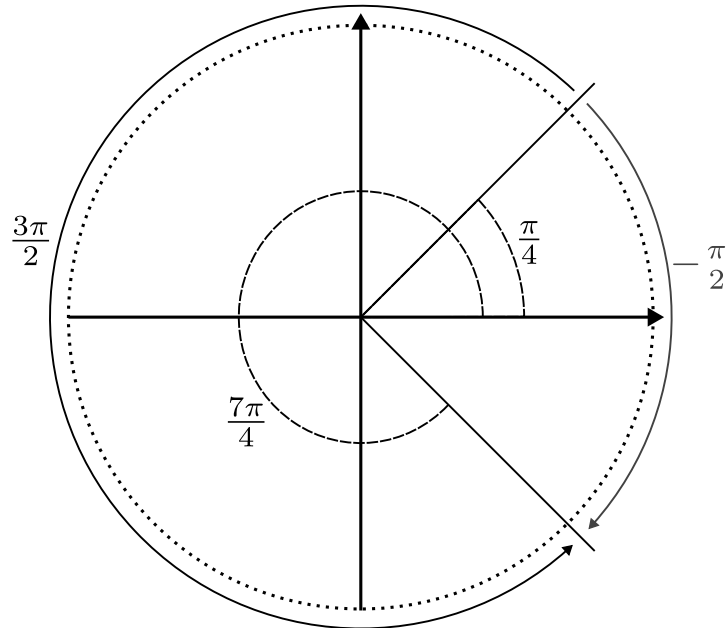


Figure 4.4 – Représentation de l'exemple pour l'effet du *sawtooth* sur la différence d'angle (en pointillé le cercle unité)

le vecteur y représente la sortie du système, c'est-à-dire les grandeurs que l'on peut mesurer à partir de l'état et de l'entrée, avec un certain degré de précision.

La première étape pour la modélisation consiste à établir les composantes du vecteur d'état. Ce vecteur se décompose en deux blocs : un pour la gestion de la position, et l'autre pour la gestion de l'orientation. Pour notre problème, le DDboat est représenté par sa position x, y ainsi que son cap θ et sa vitesse d'avance v .

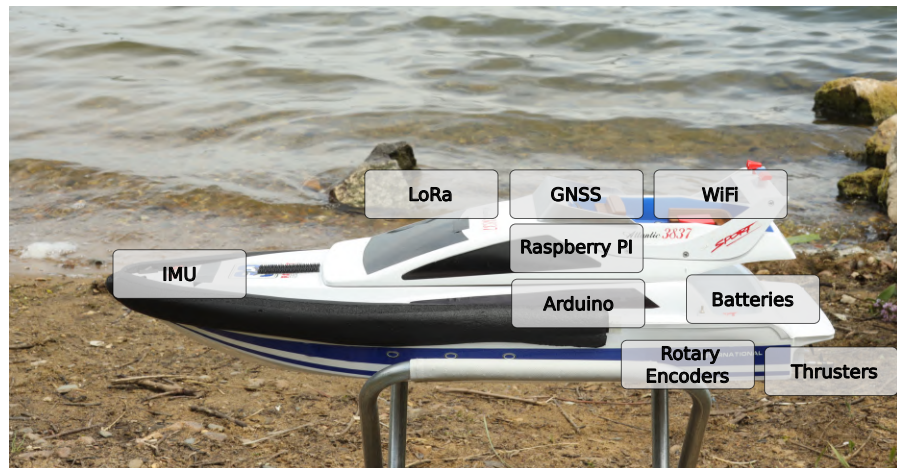


Figure 4.5 – DDboat et sa composition

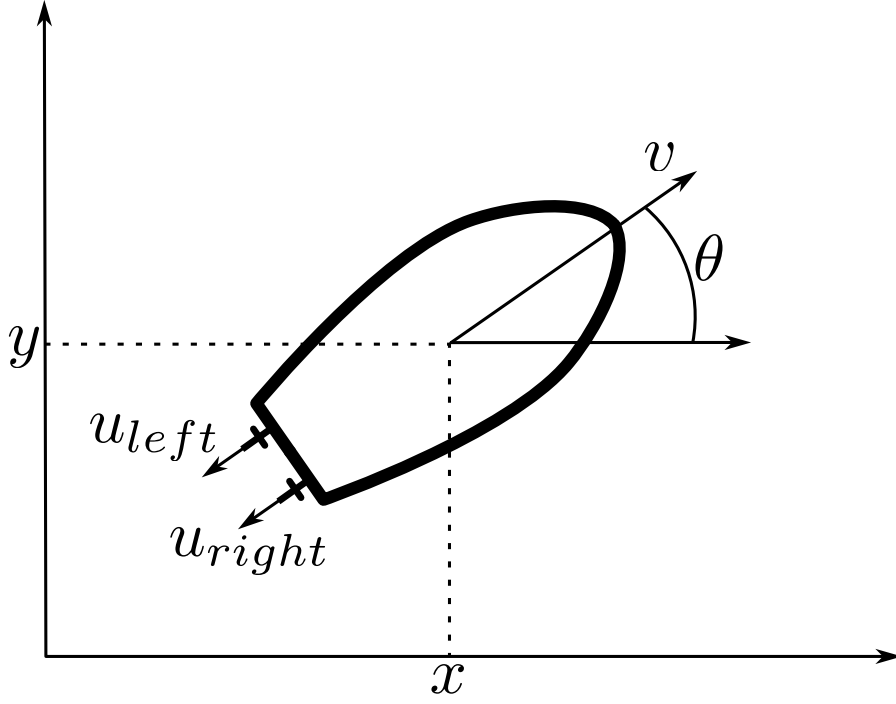


Figure 4.6 – Représentation cinématique du DDboat

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ v \\ \theta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Dans un cas plus général, l'état $\mathbf{x}$ se compose d'un triplet pour la position accompagné de son orientation représenté par des quaternions ou une matrice de rotation. Dans le cas d'une modélisation plus complète, notamment pour des représentations dans un espace à trois dimensions, le lecteur pourra se référer aux ouvrages qui traitent de la modélisation générale cinématique et dynamique [28, 47] et de la représentation des rotations [98].

Une fois le modèle d'état spécifié, on peut formuler un modèle cinématique. Les DDboats sont des bateaux à commande différentielle, ce qui signifie que la différence de poussée entre les deux actionneurs contrôle la vitesse et le cap. En se basant sur la Figure 4.6, on déduit la représentation cinématique suivante :

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{cases} \dot{x} &= v \cdot \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \cdot \sin(\theta) \\ \dot{v} &= \frac{1}{2} \cdot (u_{right} + u_{left}) \\ \dot{\theta} &= u_{right} - u_{left} \end{cases} \quad (4.5)$$

Avec $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{right} & u_{left} \end{bmatrix}^T$ les forces exercées par les hélices des propulseurs.

Ce modèle cinématique permet de comprendre le mouvement du bateau pour la construction d'un filtre d'estimation de l'état du robot à partir de mesures réalisées par les capteurs.

Ce modèle simple permet de simuler le DDboat, et de pouvoir construire un algorithme de suivi de cap.

Cet algorithme fonctionne comme suit et il est détaillé dans la section 4.6.5:

- Acquisition du cap magnétique et de la position courante
- Calcul du cap à suivre pour rejoindre le point objectif
- Estimation de l'erreur de cap
- Calcul des Rotation Par Minutes (RPM) pour les moteurs
- Application des RPM aux moteurs

4.6.2 Électronique

4.6.2.1 Actionneurs

Le DDboat possède deux actionneurs : deux moteurs qui entraînent deux hélices à l'arrière selon une configuration différentielle représentée sur la Figure 4.5. La vitesse de rotation de chacun des moteurs est pilotée par un *Electronic Speed Controller* (ESC) commandé par un signal *Pulse Width Modulation* (PWM), généré selon la sortie de l'algorithme de suivi de cap par une valeur entre 0 et 255.

4.6.2.2 Capteurs

Afin de suivre les informations sur son évolution lorsqu'il navigue, le DDboat est équipé de plusieurs capteurs :

1. une Unité de mesure Inertielle (IMU) 9 *Degrees of Freedom* (Degrés de Liberté) (DoF) [83] composées de :
 - a) Trois accéléromètres,
 - b) Trois gyroscopes,
 - c) Trois magnétomètres,
2. une antenne GNSS et sa carte de traitement qui transmet la latitude et la longitude mesurée de l'antenne,
3. une roue codeuse solidaire de chacun des axes moteurs sur lesquels sont fixées des hélices accompagnées d'un système optique pour déterminer la vitesse de rotation des hélices,
4. un capteur de température pour chaque moteur.

Afin de pouvoir accéder aux données mesurées de chacun des capteurs et pouvoir réaliser des opérations, le DDboat embarque aussi :

1. une Raspberry Pi,

2. une carte Arduino.

Ces deux cartes communiquent entre elles avec une liaison série.

Ainsi, la carte Arduino permet d'incrémenter le compteur des codeurs pour estimer la vitesse de rotation des hélices, lire les valeurs des capteurs de température et fournir un signal PWM pour piloter chacun des moteurs.

4.6.3 Mesure de la vitesse de rotation des hélices

Les encodeurs du DDboat se composent d'une roue codeuse à 4 états soit huit transitions qui sont détectées pour venir incrémenter un compteur sur 16 bits.

Ainsi, on peut calculer l'information de la vitesse de rotation de chaque hélice, connaissant le temps entre deux mesures successives de la valeur des codeurs et leur sens de rotation.

$$\omega = \frac{|\Delta Odometrie| / nbticks}{\Delta t} \quad (4.6)$$

où $\Delta Odometrie$ correspond à la différence entre deux instants t_1 et t_2 , et Δt qui correspond à $t_2 - t_1$. Quant à lui $nbticks$ correspond au nombre de transitions d'état de la roue codeuse, soit huit dans notre cas.

4.6.4 Estimation du cap suivi

Dans cette partie, l'objectif est de proposer une calibration simple pour un magnétomètre *low-cost* qui permet néanmoins de pouvoir avoir une estimation du cap suffisante pour le suivre sur de faibles distances.

Ainsi, considérant un vecteur champ magnétique local $\mathbf{m}^{nav}$ exprimé dans le repère de navigation *nav*. Le magnétomètre mesure un vecteur $\mathbf{y}_{mes}^b \in \mathbb{R}^3$, avec les trois composantes exprimées dans le repère *body* b du capteur. En théorie, si l'on connaît la position du capteur :

$$\mathbf{y}_{mes}^b = \mathbf{C}_{nav}^b \mathbf{m}^{nav} \quad (4.7)$$

Cependant, dans notre cas, on ne connaît pas l'orientation du magnétomètre dans le bateau. À cela, s'ajoutent aussi les sources d'erreurs à prendre en compte. Une première source d'erreur est liée au capteur [52]:

1. La non-orthogonalité des trois axes de mesures. On définit une matrice $\mathbf{E}_{or} \in \mathbf{M}(3)$ pour représenter celle-ci.
2. Présence d'un biais $\mathbf{o}_{bias}$ représentant le fait que même en présence d'un champ magnétique nul, sa mesure de l'est pas.
3. Les différences de sensibilité des trois axes du magnétomètre, représentées par $\mathbf{E}_{se} \in \mathbf{M}(3)$.

4. Présence de bruit de mesure : $\mathbf{e}^b$.

Ainsi, on obtient :

$$\mathbf{y}_{mes}^b = \mathbf{E}_{se} \mathbf{E}_{or} (\mathbf{C}_{nav}^b \mathbf{m}^{nav}) + \mathbf{o}_{bias} + \mathbf{e}^b \quad (4.8)$$

De plus, le magnétomètre ne mesure pas seulement le champ magnétique terrestre, mais aussi les champs magnétiques additionnels dus à la présence d'éléments ferromagnétiques. On considérera ces champs magnétiques supplémentaires comme stationnaires et constants. Cela signifie qu'ils impactent le champ mesuré de manière constante dans le temps et dans l'espace. Ces effets sont divisés en deux catégories :

- les effets de magnétisme permanent (*hard iron effects*) : il s'agit de la contribution de la magnétisation des matériaux magnétiques du porteur du capteur. Cela conduit à l'apparition d'un champ qui viendrait s'ajouter au champ magnétique terrestre. Par exemple la présence d'un aimant dans la structure ou une antenne polarisée. On le modélisera ainsi par un vecteur additif $\mathbf{o}_{hi}$ agissant comme un biais.
- les effets de magnétisme induit (*soft iron effects*) : il s'agit des effets ici liés à la magnétisation de certains matériaux sous l'action des champs magnétiques environnants. Ces effets sont souvent liés à certaines orientations du porteur et peuvent conduire à des inférences en termes de magnitude ou d'orientation du champ mesuré. Ils sont représentés par une matrice $\mathbf{E}_{si} \in \mathbf{M}(3)$.

Ainsi, en résumé, il nous reste à estimer les différentes matrices et vecteurs tels que :

$$\mathbf{y}_{mes}^b = \mathbf{E}_{se} \mathbf{E}_{or} \mathbf{C}_{nav}^b (\mathbf{E}_{si} \mathbf{m}^{nav} + \mathbf{o}_{hi}) + \mathbf{o}_{bias} + \mathbf{e}^b \quad (4.9)$$

Pour obtenir une bonne calibration du magnétomètre, nous n'avons pas forcément besoin d'identifier chaque matrice de (4.9) individuellement. On les combinera en une matrice de distorsion $\mathbf{D} \in \mathbf{M}(3)$ et un vecteur d'*offset* $\mathbf{o}$. De plus, on procédera à une calibration dans laquelle on estimera que le capteur ne possède pas de bruit aléatoire de mesure.

Ainsi,

$$\mathbf{D} = \mathbf{E}_{se} \mathbf{E}_{or} \mathbf{C}_{nav}^b \mathbf{E}_{si} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{o} = \mathbf{E}_{se} \mathbf{E}_{or} \mathbf{C}_{nav}^b \mathbf{o}_{hi} + \mathbf{o}_{bias} \quad (4.11)$$

Ce qui revient au modèle suivant pour le magnétomètre :

$$\mathbf{y}_{mes}^b = \mathbf{D} \mathbf{m}^{nav} + \mathbf{o} \quad (4.12)$$

Calibrer un magnétomètre revient à faire coïncider l'ensemble des mesures sur la sphère unité centrée en zéro. Cela se fait en prenant un grand nombre de points de mesure, qui formeront de fait un ellipsoïde,

puis de résoudre un problème inverse afin de la transformer en une sphère unité, exprimant ainsi le fait que le champ magnétique terrestre est constant quelque soit l'orientation du capteur. Cette sphère unité est ensuite tournée afin de faire coïncider le vecteur champ magnétique mesuré avec le vecteur champ magnétique vrai (pour cela, il faut deux mesures de référence). Ce qui résulte à trouver $\mathbf{D}$ et $\mathbf{o}$ [76]. Cependant, cette méthode, bien qu'efficace dans des applications, ne permet pas de réorienter correctement la sphère dans le cas où il y aurait des perturbations non-homogènes d'une structure ou d'élément extérieur type *soft ou hard iron* ou comme dans notre cas, où on ne connaît pas l'orientation du capteur dans le bateau.

Une autre façon de faire est de placer le véhicule avec son magnétomètre installé dans un équipement qui permet de générer des champs magnétiques connus tout en compensant le champ magnétique terrestre. Un montage possible est celui de trois paires de bobines de Helmholtz arrangées orthogonalement. Ainsi, on peut en effet identifier les matrices $\mathbf{D}$ et $\mathbf{o}$ tout en les recalant du fait de la connaissance de l'orientation des champs magnétiques appliqués. Cette méthode est plutôt utilisée dans l'industrie, car elle nécessite une structure pour la génération du champ qui peut être très coûteuse suivant la taille du véhicule et ses capteurs. En effet, il s'agit à chaque fois de faire la calibration avec le magnétomètre installé sur sa plateforme pour que la calibration puisse compenser les effets du porteur sur le champ magnétique mesuré.

Ne connaissant pas l'orientation du capteur dans le bateau, on ne peut donc pas utiliser la première méthode. Cependant, si on possède la connaissance du champ magnétique local, on peut se ramener à la deuxième méthode si tentée qu'on soit capable d'orienter le porteur dans des directions dans lesquelles on connaît le champ magnétique à mesurer. C'est le cas avec le DDboat, qui est orientable manuellement pour aligner certains de ces axes dans celui du champ magnétique. Ainsi, en prenant quatre mesures sur des axes bien choisis (i.e. dont on connaît la valeur du champ magnétique terrestre), on pourra approximativement résoudre le problème inverse.

Ainsi, nous avons choisi de faire ces quatre mesures comme suit :

- Une mesure $\mathbf{y}_x^b$ avec l'axe x^b du DDboat qui pointe dans la direction du champ magnétique mesurant $\mathbf{m}_{Nord}^n$
- Une autre $\mathbf{y}_{-x}^b$ avec maintenant l'axe $-x^b$ qui pointe dans la direction du champ magnétique mesurant $\mathbf{m}_{Sud}^n$
- Une troisième $\mathbf{y}_y^b$ avec l'axe y^b qui pointe dans la direction du champ magnétique mesurant $\mathbf{m}_{Est}^n$
- Une dernière $\mathbf{y}_z^b$ avec l'axe z^b qui pointe dans la direction du champ magnétique mesurant $\mathbf{m}_U^n$.

Connaissant β la valeur du champ magnétique terrestre, on a:

$$\mathbf{m}_{Nord}^n = \begin{pmatrix} \beta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{m}_{Sud}^n = \begin{pmatrix} -\beta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{m}_{Est}^n = \begin{pmatrix} 0 \\ \beta \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{m}_U^n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

$$(4.15)$$

$$\begin{cases} \mathbf{m}_{Nord}^n &= \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{y}_x^b - \mathbf{o}) \\ \mathbf{m}_{Sud}^n &= \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{y}_{-x}^b - \mathbf{o}) \\ \mathbf{m}_{Est}^n &= \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{y}_y^b - \mathbf{o}) \\ \mathbf{m}_U^n &= \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{y}_z^b - \mathbf{o}) \end{cases} \quad (4.16)$$

En additionnant les deux premières lignes du système 4.16 on calcule $\mathbf{o}$:

$$\mathbf{o} = \frac{1}{2}(\mathbf{y}_x^b + \mathbf{y}_{-x}^b) \quad (4.17)$$

De plus, en combinant les lignes 1, 3 et 4 de ce même système, on exprime la matrice $\mathbf{D}$ comme étant la concaténation des trois vecteurs suivants :

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_x^b - \mathbf{o} & \mathbf{y}_y^b - \mathbf{o} & \mathbf{y}_z^b - \mathbf{o} \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Maintenant que les paramètres de $\mathbf{M}$ et $\mathbf{o}$ sont estimés, on considérera que l'on peut donc mesurer le champ magnétique terrestre sans distorsion du capteur ou de l'environnement proche. Ainsi, on accède à la valeur du champ magnétique en inversant l'Équation 4.12. On obtient le cap magnétique en prenant l'arctangente entre les composantes m_Y^n et m_X^n mesurées selon les axes $\mathbf{x}^{nav}$ et $\mathbf{y}^{nav}$.

$$\theta = \arctan2(m_Y^n, m_X^n) \quad (4.19)$$

Cette méthode de calibration présente l'avantage, pour des petits véhicules, d'être extrêmement simple à réaliser. De plus, le fait d'utiliser le champ magnétique comme référence, permet de mieux s'approprier le fonctionnement d'un magnétomètre. En revanche, cette calibration a plusieurs inconvénients. Le premier, c'est qu'elle devient de moins en moins facile à réaliser lorsque les véhicules deviennent grands. Cependant, une variante permet de pouvoir faire la calibration dans le plan en prenant en compte l'inclinaison magnétique dans les valeurs attendues au niveau de l'Équation 4.13[46]. Un autre inconvénient de l'utilisation de cette méthode concerne l'hypothèse que durant la navigation, le véhicule reste à l'horizontale tout au long de son fonctionnement. Cette dernière hypothèse peut être transgressée, par exemple dans le cas où il y aurait des vagues sur le plan d'eau. Ce phénomène est envisagé dans cet exposé [34].

4.6.5 Suivi de cap

La sous-section précédente présentait la méthode qui nous utilisons pour obtenir une information de cap calibrée. Cette section présentera comment nous l'utilisons afin de suivre les points de passage successif de la mule. Il s'agit ainsi de calculer les commandes $\mathbf{u}$. Pour cela, nous avons en entrée le cap mesuré et calibré par la boussole $\hat{\theta}$, la position $\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T$ du bateau dans le repère cartésien $\mathcal{C}_{ref}$ et $\mathbf{w} = \begin{bmatrix} x_{objectif} & y_{objectif} \end{bmatrix}^T$ les coordonnées dans le repère $\mathcal{C}_{ref}$ du point de passage.

Pour calculer les poussées souhaitées, nous avons construit un algorithme de suivi de point de route basé sur un contrôleur proportionnel calculant les instructions RPM pour les actionneurs. L'algorithme 1 explique comment l'erreur calculée à la ligne 3, entre le cap souhaité ϕ (calculée ligne 2) et le cap mesuré, $\hat{\theta}$ est un retour d'information pour calculer la commande RPM. La valeur RPM_{median} est la valeur nominale RPM utilisée lorsque le véhicule doit avancer sans tourner ; elle constitue un compromis entre une vitesse décente, tout en limitant la surchauffe du moteur et en préservant le contrôle du courant. Le facteur k est un gain fixé empiriquement à 40 [47].

Algorithm 1 Waypoint Follower

```

1: procedure WAYPOINT( $\hat{\theta}, \mathbf{p}, \mathbf{w}$ )
2:    $\phi = \arctan 2(\mathbf{p} - \mathbf{w})$ 
3:    $e = \text{sawtooth}(\phi - \hat{\theta})$ 
4:    $u_{left} = u_{median} - k * e$ 
5:    $u_{right} = u_{median} + k * e$ 
6: end procedure

```

La Figure 4.7 résume la manière dont nous contrôlons le DDboat en tant que mule pour son déplacement vers un objectif unique. La partie suivante explique comment les mules choisissent les objectifs.

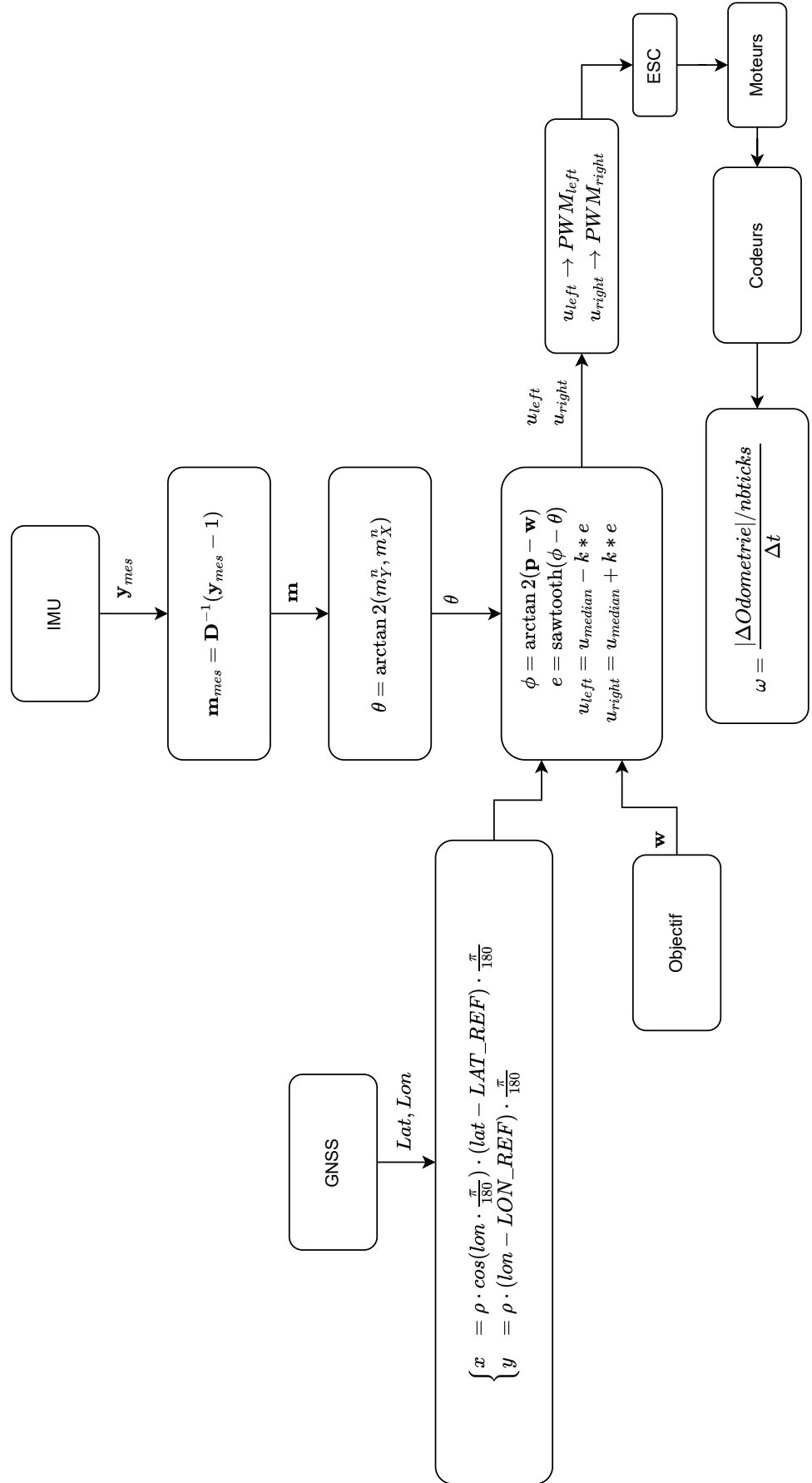


Figure 4.7 – Schéma de contrôle du DDboat

4.6.6 Machine à états

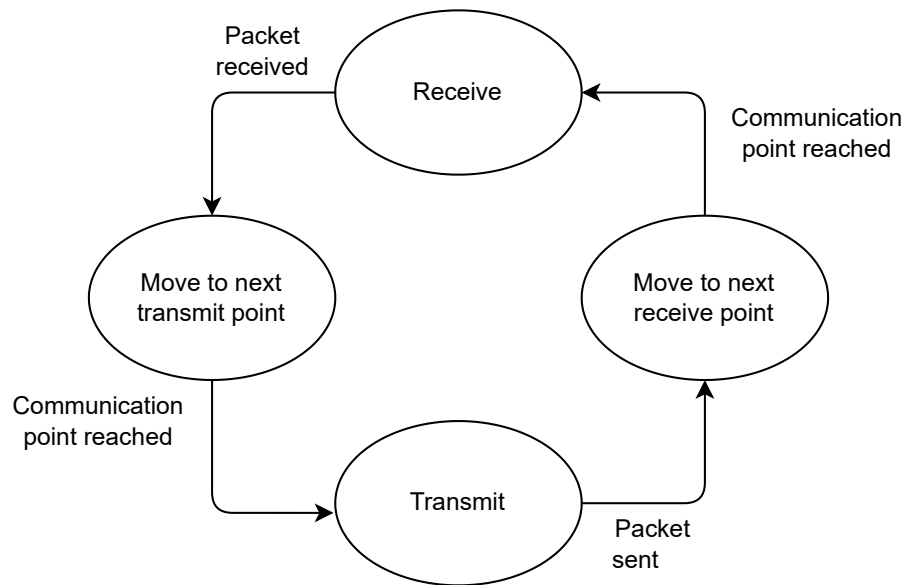


Figure 4.8 – Machine à état pour le choix de l’objectif

Chaque mule choisit son objectif de navigation et ses phases de communication selon la machine à état Figure 4.8. Cette machine à état régit le comportement de la mule par quatre états :

- *Receive*: la mule attend sur sa borne inférieure qu’une mule ou que la source lui transmette des données.
- *Transmit*: la mule attend sur sa borne supérieure pour transmettre des données à la mule suivante ou au puits.
- *Move to next transmit point* ou *Full*: la mule connaît son point supérieur où elle doit se rendre pour transmettre les données qu’elle possède.
- *Move to next receive point* ou *Empty*: la mule connaît son point inférieur vers lequel elle doit se rendre pour aller chercher des données à communiquer.

À l’initialisation, les mules commencent leur comportement par l’action “*Move to the next receive point*” afin de pouvoir s’initialiser comme nous l’avons présenté au chapitre précédent.

4.7 RÉSULTATS

4.7.1 Description des données

Nous avons pu réaliser l'expérimentation avec les DDboats sur le lac. La trajectoire de la navigation des mules se lit sur la Figure 4.9a pour le *muling* circulaire et la Figure 4.10a pour le *muling* linéaire. De plus avec les fichiers récapitulant les temps des différents évènements, on construit le Tableau 4.1 qui vient récapituler les différentes grandeurs que l'on suit. À partir de ces grandeurs, nous avons alimenté un simulateur en une dimension dans les hypothèses de navigation en ligne droite, à vitesse constantes, et aux communications parfaites. Ce simulateur est une implémentation des modèles du *data muling* évoqué au Chapitre 3. On retrouve la trajectoire au cours du temps des deux mules simulées à la Figure 4.9b pour le *muling* circulaire et Figure 4.10b pour le *muling* linéaire, avec les paramètres et les résultats dans le Tableau 4.2.

4.7.2 Tableaux des résultats et des données

4.7.2.1 Au sujet de l'expérimentation pour les scénarios de *muling* circulaire et linéaire

	Symboles	Linéaire	Circulaire
Distance totale source-puits	D	78 m	78 m
Débits apparents (expérimentation)	R_{eq}	73.6 kbps	89.3 kbps
Temps de mission	T_{total}	916 s	755 s
Latence mesurée	$T_{latency}$	130 s	97 s
Débit communication entre agents	R	812 kbps	814 kbps
Temps de communication pour un paquet	T_{com}	14 s	9 s
Portée de la communication entre agents	d	10 m	10 m
Vitesse des mules	v_{mule}	0.9 m/s	0.8 m/s
Taille d'un paquet	m	1.06 MB	1.06 MB
Nombre de paquets échangés	P	8	8
Distance des zones des mules	L	28 m	68 m
Distance parcourue par mule	$d_{travel/mule}$	563 m 598 m	501 m 485 m
Temps de déplacement des mules	T_{total}	669 s 596 s	662 s 587 s
Critère (Eq.3.4.5.1)		-0.66	-2.9

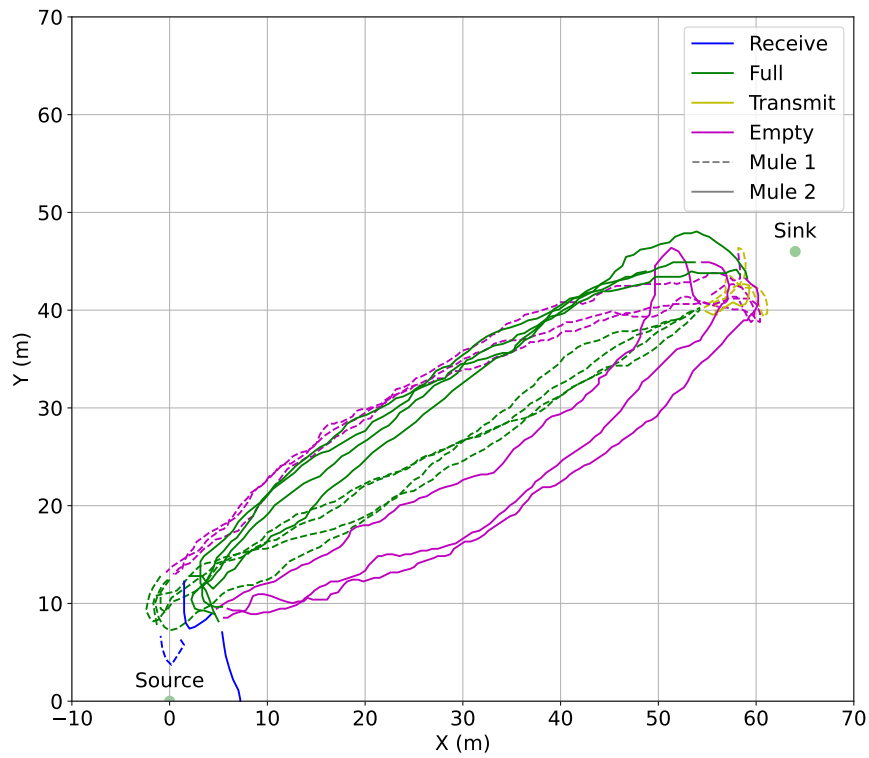
Table 4.1 – Paramètres et résultats suivant les scénarios pour l'expérimentation sur le lac

4.7.2.2 *Au sujet des simulations pour les scénarios de muling circulaire et linéaire*

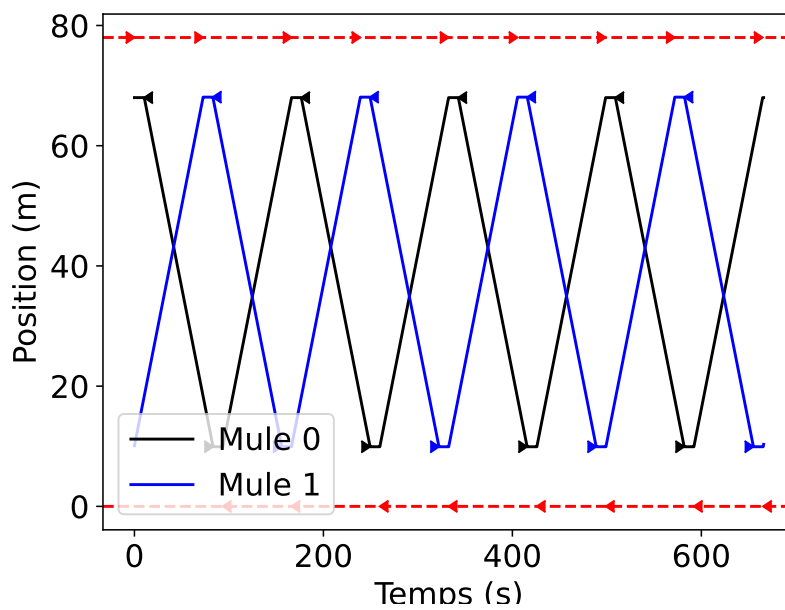
	Symboles	Linéaire	Circulaire
Distance totale source-puits	D	78 m	78 m
Débits apparents (modèles)	R_{eq}	111 kbps	101 kbps
Temps de mission	T_{total}	604 s	755 s
Latence	$T_{latency}$	84.8 s	93.5 s
Débit communication entre agents	R	812 kbps	814 kbps
Temps de communication pour un paquet	T_{com}	11 s	9 s
Portée de la communication entre agents	d	10 m	10 m
Vitesse des mules	v_{mule}	0.9 m/s	0.8 m/s
Taille d'un paquet	m	1.06 MB	1.06 MB
Nombre de paquets échangés	P	8	8
Distance des zones des mules	L	28 m	68 m
Distance parcourue par mule	$d_{travel/mule}$	360 m 384 m	465 m 466 m
Temps de déplacement des mules	T_{total}	400 s 427 s	580 s 582 s
Critère (Eq.3.4.5.1)		-11	-12

Table 4.2 – Paramètres et résultats suivant les scénarios en environnement simulé

4.7.3 *Figures de résultat*

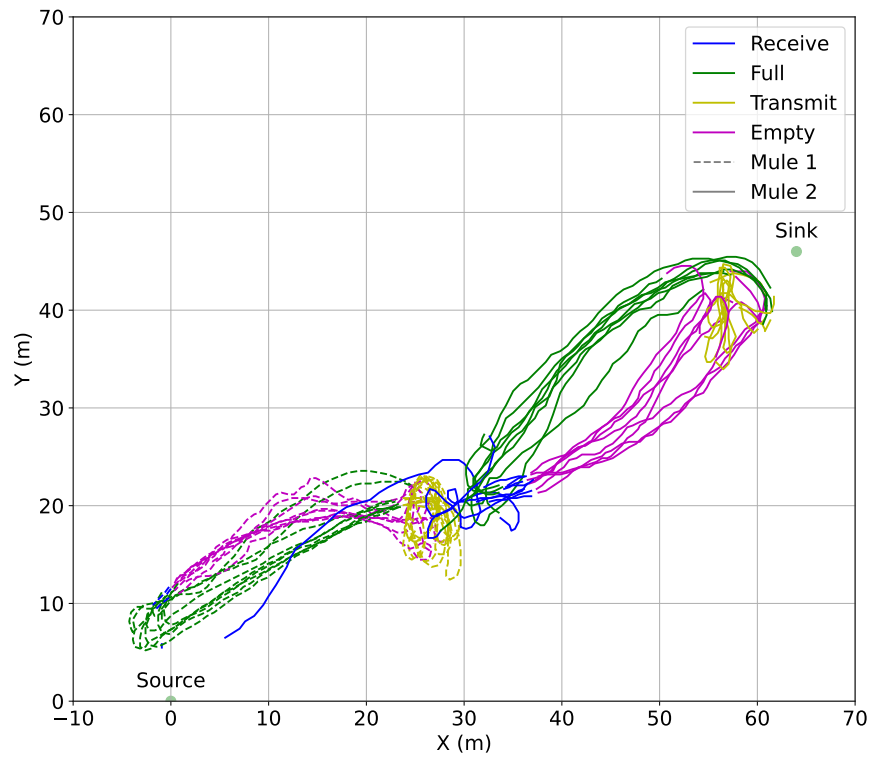


(a) Trajectoires des mules pour le scénario circulaire expérimental

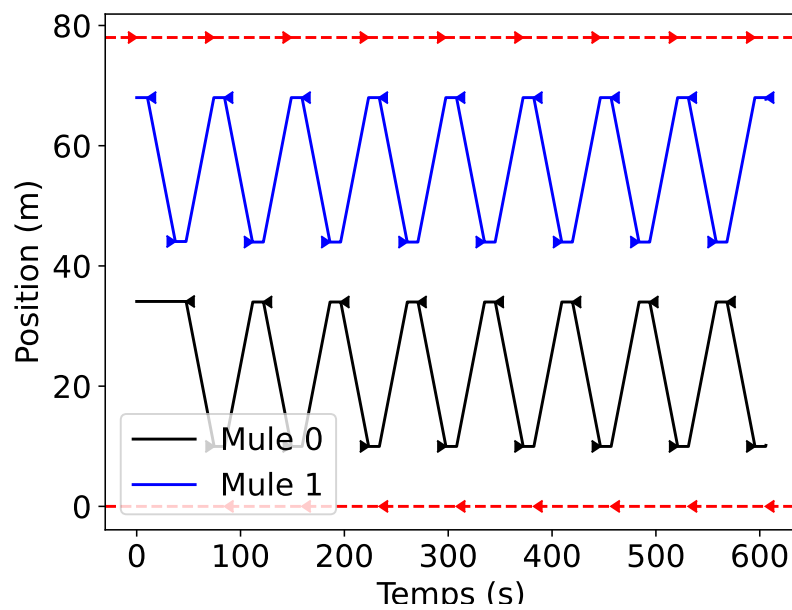


(b) Simulation du scénario circulaire en une dimension. Les triangles marquent le début et la fin de la réception des paquets de données. Ainsi, la ligne rouge du haut représente la position de la source au cours du temps, la ligne inférieure, celle du puits

Figure 4.9 – Au sujet du scénario circulaire



(a) Trajectoires des mules pour le scénario linéaire



(b) Simulation du scénario linéaire en une dimension. Les triangles marquent le début et la fin de la réception des paquets de données. Ainsi, la ligne rouge du haut représente la position de la source au cours du temps, la ligne inférieure, celle du puits

Figure 4.10 – Au sujet du scénario linéaire

4.7.4 Résultat des expériences

Le premier résultat est la réalisation des deux scénarios de *data muling*. Cela a permis de valider l'architecture, et de démontrer la faisabilité en surface. Le deuxième résultat est d'avoir pu obtenir des données, et alimenter le simulateur afin de pouvoir comparer les prédictions avec les données résultantes de l'expérience. On note ainsi une différence de -34% dans le débit apparent entre la simulation et l'expérience pour le scénario linéaire. De même, on trouve une différence de -11% pour le scénario circulaire. Cette différence s'explique en majorité par l'estimation de la distance parcourue qui est sous-estimée dans la simulation sous l'hypothèse d'une navigation au plus court sans erreurs et une expérimentation non optimisée pour des trajectoires en ligne droite.

De plus, les données ont été choisies en amont pour pouvoir comparer les deux scénarios entre eux. Ainsi, dans le cas simulé, le critère de choix entre les deux scénarios est bien négatif, signifiant de meilleures performances en termes de débit apparent pour le scénario linéaire, ce qui est en effet le cas. En revanche, pour ce qui est de l'expérimentation, les critères sont aussi négatifs, mais d'une marge trop fine pour constituer une conclusion. En effet, les erreurs de navigation et de communication font que le résultat attendu où le scénario linéaire serait le meilleur en termes de débit apparent n'est pas atteint, puisque les débits du scénario circulaire sont meilleurs.

La Figure 4.10a et la Figure 4.9a représentent la trajectoire des mules pendant la mission, associées à leur état correspondant de leur machine à états. Les différentes grandeurs sont reportées dans le tableau 4.1.

4.7.5 Remarques au sujet des résultats obtenus

La première chose que l'on peut dire est que les trajectoires réelles de l'expérimentation réalisées par les mules ne peuvent pas être confondues avec la ligne droite parcourue par les mules dans la simulation. Cela s'explique par le fait que la simulation (et par extension le modèle) ne prend pas en compte les effets de l'environnement ni les erreurs de navigation et de positionnement. De plus, le choix d'un algorithme de suivi de point n'est certainement pas la meilleure implémentation dans l'objectif de suivre une ligne droite. Un algorithme de suivi de ligne aurait été plus adapté. Afin de pouvoir comparer les distances parcourue avec le modèle, seules les distance dans les états *Full* ou *Empty* ont été comptabilisés dans le Tableau 4.1.

Une deuxième remarque que l'on peut faire au sujet de l'expérience est le problème du *station keeping*, c'est-à-dire de rester sur place, le temps de la transmission des données. Ainsi, comme on peut le voir au travers des courbes jaunes ou bleues sur la Figure 4.9a, la mule

parcourt une distance supplémentaire. C'est encore plus visible dans le cas du *muling* linéaire Figure 4.10a. Cette distance supplémentaire s'explique ici par le design du DDBoat, qui ne permet pas de faire de garder cette position de manière statique. Dans le cas de l'utilisation d'un robot ROV à 6 DoF cela aurait été possible, bien que le *station keeping* consommera de l'énergie, contrairement à ce que le modèle suggère.

Une troisième remarque concerne l'utilisation du même réseau wifi et par cela, les débits de transmission, était loin d'être constant durant toute la mission. Cela s'explique par la communication simultanée par moment des agents, venant diviser la capacité totale de la transmission. La valeur exprimée dans le tableau, représente la moyenne des débits obtenus afin de pouvoir alimenter le simulateur et ainsi pouvoir comparer avec les expériences.

4.8 CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce quatrième chapitre a présenté les différentes étapes qui ont été nécessaires pour expérimenter le *data muling*. Ainsi, une première section a présenté les différents éléments nécessaires pour la source et le puits. Une seconde est venue détailler le fonctionnement des DDboat en tant que mule. Celle-ci est régie par une machine à état lui permettant d'effectuer son alternance communication et déplacement. La troisième section présentait les résultats des expériences ainsi que les conclusions que nous pouvions en tirer au sujet de la mise en place d'un système de *data muling*.

Cette expérimentation peut-être critiqué sur bien des aspects mais nous souhaitons mettre l'attention, sur les différentes étapes qui sont nécessaires afin de créer le scénario ainsi que les mules:

- Création de la source : Quelles données acquiert-elle ? A quelle fréquence ? Quelle est sa localisation ? Comment faire pour que les mules puissent la retrouver pour communiquer avec elles ?
- Création du puits : Sa position et comment les mules vont-elles le retrouver ?
- Création des mules : Combien ? Quelles seront leur interface de communication Haut débit ? Comment feront-elles pour se retrouver pour se communiquer leur données ? Que faire en cas de panne d'une mule ?

Et puis les questions plus généraliste : comment mettre à l'eau les mules, ici nous n'en avons que deux mais dans le cas où i y en aurait plus un système de gestion de flotte serai plus convenable, notamment pour l'initialisation des scénarios et des paramètres.

Concernant la pertinence de l'expérience vis-à-vis du mon de sous-marin, celle-ci est toute relative. En effet, l'accès à des coordonnées via satellite n'est pas envisageable sous l'eau. En revanche, des systèmes équivalent existent afin que les engins autonome sous-marin puissent

connaître leur position comme des USBL, *Long Baseline* (LBL), ou en complète navigation à l'estime via des méthodes qui prendraient en compte les différents acteurs de la flotte de mule pour un recalage local par exemple.

CONCLUSION

La cartographie autonome des fonds marins à l'aide d'AUV équipés de capteurs permet un accès plus facile pour la récolte de donnée sur l'océan. En particulier, ils trouvent leur utilité dans le secteur académique pour une meilleure compréhension de nos océans. Dans le secteur militaire pour la recherche et la détections d'objets posés sur le fond. On peut citer des mines, des épaves d'avions, de bateau. Dans le secteur commercial pour la prospection pétrolière ou plus l'inspection de l'intégrité des structures éoliennes offshore.

Les récents développements des véhicules et des capteurs ont conduit à une forte augmentation de la quantité de données collectées corrélée à la possibilité de faire des missions de plus en plus longues. Cela tend ainsi à rendre plus long le temps entre la prise des données et leur analyse. Dans un contexte de guerre des mines, accéder aux données sonar le plus tôt possible permettrait de commencer la recherche de contact et de commencer les phases d'identifications et de neutralisation le cas échéant.

5.1 RÉSUMÉ DES CHAPITRES

5.1.1 *Systèmes existants*

Comme nous l'avons analysé dans le Chapitre 2, il n'existe pas actuellement de solution viable pour une telle application. En effet, les moyens de communication filaire bien qu'autorisant des débits importants, ne possèdent pas la souplesse d'un système de communication sans-fil. À l'inverse, les systèmes de communication sont plus souples à l'utilisation, mais possède des débits trop faibles pour le transfert de grande quantité de données sur des grandes distances. En revanche, en champ proche, ceux-ci sont suffisants. Ainsi, l'idée du *data muling* prend tout son intérêt.

5.1.2 *Le concept du data muling*

Le *data muling* consiste en l'utilisation d'agents mobiles propres au système ou bien extérieurs afin d'allier la communication à courte portée et la mobilité des agents dans l'optique d'améliorer les perfor-

mances. Dans notre cas d'application pour le milieu sous-marin, le *data muling* permet par l'ajout d'agents extérieurs, la possibilité d'allier les très bonnes performances des systèmes de communication à courtes portées avec la mobilité des agents pour envisager un système de communication sous-marin performant. Pour cela, nous avons mis en évidence deux organisations de *data muling* permettant de réaliser un lien entre une source productrice de données et un puits. Un scénario que nous avons nommé linéaire où les mules se communiquent les données de proche en proche et un scénario circulaire, où chaque mule transporte la donnée sur la totalité de la distance de communication.

5.1.3 Étude des performances

Nous avons modélisé ces deux scénarios, dans un environnement non soumis à des perturbations et dont la navigation et les communications s'effectuent sans erreurs afin de pouvoir quantifier le débit maximal atteignable, la latence et la consommation de chacun des agents. En étudiant ces grandeurs, nous avons mis en évidence différents comportements qui permettent de choisir entre les deux scénarios, mais aussi d'appréhender les variables qui jouent sur les performances des scénarios. Ainsi, concernant les performances, nous pouvons conclure que:

- Les deux scénarios impliquent un gain de performance supérieur à 40 fois celle d'un lien acoustique direct entre la source et le puits.
- Le *muling* circulaire est intéressant dans le cas où le rapport entre le temps de parcours des mules sur la distance de portée des systèmes de communication courte portée des mules est faible devant le temps de transfert du paquet de donnée transportée entre deux mules. De plus, il paraît aussi plus facile à mettre en place du fait que les mules n'ont pas à se retrouver entre elles sous l'eau pour se relayer la donnée. Cependant, cela se fait au prix d'une distance nécessairement plus importante à parcourir pour les mules.
- Inversement, le *muling* linéaire permet une distance parcourue par les mules plus faible, mais nécessitant aux mules de se retrouver pour se communiquer les données entre elles.
- Pour choisir entre ses méthodes, un critère Équation 3.4.5.1 permet de prédire laquelle performera le mieux en fonction du temps de communication d'un paquet entre deux mules, de la portée du système de communication et de la vitesse d'avance des mules.

Nous insistons sur le caractère très générique de la modélisation, qui ne présuppose pas le milieu ou le domaine dans lequel évolueront les mules. Ainsi, nos résultats s'appliquent aussi bien à des scénarios sous-

marins qu'à des scénarios aériens ou terrestres, voire des scénarios hybrides.

5.1.4 Une base d'expérimentation

Le fait de pouvoir expérimenter les deux scénarios a permis de se confronter aux différentes problématiques inhérentes à l'utilisation d'agents mobiles pour effectuer un transport de données. Même si dans les faits, les choix techniques n'ont certainement pas été les plus pertinents, cela a quand même permis de mettre en évidence les différentes problématiques afin de pouvoir réaliser une telle expérimentation. On peut diviser ces phases en deux catégories, celles appartenant à la communication qui comprennent :

- la technologie de communication et ses particularités dans l'émission et la réception
- le format et la taille des paquets envoyés.

Et celles appartenant à la mobilité des mules:

- l'algorithme de navigation
- la désignation des points de rendez-vous
- la centralisation ou décentralisation des données de navigation de chaque mule.

De plus, l'expérimentation a permis de mettre en évidence les effets de l'environnement qui affecte la mobilité des mules et qu'il sera nécessaire d'ajouter dans un second temps aux modélisations afin d'avoir une estimation plus réelle des performances *data muling* adapté en milieu sous-marin. Ce travail a été effectué dans l'optique de voir un jour la démocratisation de tels systèmes.

5.2 CONTRIBUTIONS

Les principales contributions de cette thèse sont présentées en suivant. Une étude du concept de *data muling* a été réalisée par le biais de deux utilisations de véhicules autonome pour l'amélioration des communications longue portée et haut débit. Ainsi, nous avons exposé un scénario de *data muling* circulaire (Équation 3.8) et linéaire (Équation 3.18). Nous les avons ensuite comparées, mettant en évidence l'existence d'un critère permettant de connaître le domaine de performance de ces deux scénarios. Ce critère est exposé à l'Équation 3.4.5.1. Ces modélisations, ce critère ainsi que les résultats de l'expérience chapitre 4 ont donné lieu à la publication d'un article de conférence [29]. Son contenu est disponible en annexe A.

5.2.1 Contributions complémentaires

J'ai aussi eu l'opportunité de présenter mes travaux dans deux conférences internationales :

- [1] *Data Muling : An Innovative Solution to Extend Ranges and Data Rate*. MAST Conference. Athens, Greece, Nov. 2022. URL: <https://mastconfex.com/med2022/>.
- [6] *Underwater Data Muling: Scenarios, Implementation, and Performances*. Oceans 2023 Gulf Coast. Biloxi, Mississippi, USA, Sept. 2023. URL: <https://gulfc coast23.oceansconference.org/>.

Ainsi que dans des conférences nationales :

- [2] *Data Muling: Communication via Autonomous Naval Intermediate Relays*. Submeeting 2022. Saint-Raphaël, France, Apr. 2022. URL: <https://submeeting2022.univ-tln.fr/>.
- [3] *CoRINA : Communication par Relais Intermédiaires Navals Autonomes*. Journée CORMORAN 2023. Brest, France, Feb. 2023.
- [4] *Data Muling : concept et experimentation*. Submeeting 2023. Guelédan, France, Apr. 2023. URL: <https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/submeeting2023.html>.
- [5] *Data muling: An Innovative Solution to monitor faraway sensors that collect huge data*. L@bIsen. Ysen Ouest, Brest, France, Jan. 2023.
- [8] *Journées Drones & Capteurs embarqués*. Opération d'un AUV et d'un USV fabriqués à l'ENSTA Bretagne. Drones&Cap 2021. Ile de Ré, France, June 2021.

5.3 AXES DE RECHERCHES FUTURS

Inévitablement, plutôt que de clore la problématique du *data muling*, les différents thèmes peuvent être traités encore un peu plus en détail, voire à explorer complètement.

La modélisation. Concernant la modélisation des performances du système, la relaxe des hypothèses très fortes profiterait à avoir une modélisation plus juste. Envisager des agents réels encouragerait la nécessité à estimer les erreurs au niveau de la navigation, des communications et donc des interactions entre les agents et le système complet. On pourrait par exemple regarder le domaine de l'estimation garanti avec des outils comme l'analyse par intervalles et la modélisation sous la forme d'un système dynamique global à intégrer. Une telle modélisation permettrait d'obtenir des garanties sur les performances *a priori*.

Le scénario. Dans ce document, nous avons fait le choix de détailler deux scénarios que nous considérons comme atomique et qui permettrait de décrire tous les scénarios possibles en réalisant des compositions de ceux-ci. Cependant, ces scénarios ne sont pas génériques dans le cas de la présence de plusieurs sources et de plusieurs puits et restent délicats pour ce qui est de la synchronisation des points de rendez-vous. Une piste d'étude sur l'existence et la modélisation

de scénarios atomiques dans le cadre d'un nombre quelconque de mules, de sources et de puits accompagné d'un outil d'optimisation des performances pour le choix des compositions et des paramètres seraient très intéressants et précieux.

La réalisation d'un démonstrateur. Pour le *data muling* et la robotique sous-marine, il n'existe pas encore de standard d'architecture de mule. Ainsi, des études approfondies sur des architectures physiques optimisées d'AUV pouvant être utilisés en tant que mule serait une avancée majeure dans ce domaine, avec un grand nombre d'applications. Une piste de recherche serait la réalisation d'AUV pour faire une transmission du fond vers la surface. Ainsi, cela compléterait le maillon sous-marin, permettant à la donnée de transiter ensuite dans l'air.

Des expérimentations. Du côté de l'expérimentation, il n'existe que très peu de réalisation à grande échelle comme à petite échelle de système *data muling*. Un bon début serait de réaliser une expérimentation ne comportant qu'une source et qu'un puits dans un scénario avec une seule mule dans des scénarios similaires à ceux des expérimentations présentées dans [103] et [84]. Ensuite, l'idée serait de passer à l'échelle en ajoutant plusieurs mules collaborant entre elles faisant intervenir la robotique distribuée dans un milieu avec lequel les communications sont limitées.



ANNEXES

Underwater Data Muling: Scenarios, Implementation, and Performances

Nathan Fourniol¹, Andreas Arnold², Pierre-Jean Bouvet³, Luc Jaulin¹

¹ ENSTA Bretagne, 2, Rue François Verny, 29200 Brest, France

² Thales DMS France SAS, 10 avenue de la 1^{ère} DFL, 29200 Brest, France

³ ISEN Yncréa Ouest, 20 Rue du Cuirassé Bretagne, 29200 Brest, France

Abstract—The exploration of the seabed is of strategic importance for various applications, including military, scientific, and commercial purposes. However, underwater communication is limited by the poor propagation of radio waves and the low data rates of acoustic communication. This leads to the topic of retrieving large amounts of data over a long range. To address this challenge, the concept of *data muling*—which involves the use of mobile agents to physically carry data from underwater nodes or Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)—seems to be an interesting solution. In this paper, we focus on the scenario of a fixed data *source* and *sink* point separated by a large distance. We propose a relay system that uses mobile agents assigned to specific areas. Each agent can communicate with neighbouring agents and travel within its assigned area to transport data and act as a moving relay.

We evaluate the performance of this data muling solution using three metrics: equivalent throughput, latency, and energy. We compare our solution with a scenario inspired by previous work and show that our relay system can extend the range and data rate of underwater communication. The paper provides a detailed system model and presents experimental results to implement muling along testing scenarios.

I. INTRODUCTION

The exploration of the seabed has become a strategic issue due to military, scientific, or commercial use. With technological progress, these missions are increasingly carried out using Autonomous Underwater Vehicles (AUVs). This represents advantages in terms of area coverage rate and discretion, but also in terms of human resources, thus reducing costs and human risks. However, the use of AUVs for such missions means that the data is not immediately accessible. It is common to carry out long campaigns with long periods below the surface, meaning that a large amount of data is generated but not immediately sent to the surface. Radio waves propagate poorly underwater, and acoustic communication generally has a fairly low data rate. Thus, quickly communicating a large amount of data, over a long distance, is a real problem.

On the one hand, with a range of 100 m up to several hundred kilometres, acoustic communication is the most energy-efficient mode. However, the product data rate (in kb/s) times range (in km) is of the order of one hundred [4] which is

not suitable for the transfer of large amounts of data. On the other hand, Underwater Wireless Optical Communications (UWOCs) can reach up to several hundred megabits in a typical range of the order of ten meters [6][2] depending on the turbidity of the water. Directional UWOC systems using lasers can reach farther, but they require aligning the transmitter and receiver, which adds a layer of complexity. A third approach is the use of Radio Frequency (RF) communications. Such systems have a performance figure capped at 10 Mb/s over a range of a few centimetres for the gigahertz frequency band [6] [4] due to strong attenuation of RF waves in salt water. As a result, wireless underwater transfer of a large amount of data over a range of a few kilometres is not feasible in a reasonable time with existing communication technologies.

To address the problem of retrieving large amounts of data from underwater sensor nodes or AUVs, the interest in data muling solutions is increasing. The key idea is the use of a mobile vector such as an AUV, hereafter called “mule” to physically carry data in its internal memory. A mule is characterized by its ability to move, to relocate other agents (mules or source/sink nodes), and to communicate with a high-bandwidth, short-range communication system that involves docking or not. This idea of using mobile entities within the network was exposed in [11], using random moving entities.

Literature provides several data muling scenarios in the underwater environment. The first considers the case of Underwater Sensors Networks (USNs) where a series of sensing nodes (such as environment monitoring stations) collect data, which is stored locally, and where a mule is periodically sent to visit the nodes and collect the data to bring them to the surface. This is a specific instance of Travelling Salesman Problem (TSP), solved using optimization algorithms (simulated annealing, genetic algorithms, *etc.*) with constraints such as the node coverage or the energy used [3][8][12]. The energy constraints of this problem are addressed by putting a reloading station on the sea floor in the middle of the sensor network or by using a larger ship on the surface that has some means of energy production (solar panels, generators) and a surface docking station to reload AUV [3]. In addition, underwater data gathering problems are also studied with multi-communication regarding the criticality of the data, or spatial layer introduced in the network [1], [7], [14]

A second use case is long range communication in the

This work was in part sponsored by the Regional Council of Brittany and by Thales Group.

vertical plane (bottom to surface) using one or more mobile agents. Two experimental results presented in [10], [13], tackle the problem of developing a solution where a few AUVs go down to the node, download its data and come back to the surface. Teixeira *et al.* [13] developed a protocol called Underwater Data Muling Protocol (UDMP) protocol to retrieve data from a node or an AUV over a long range. In this protocol, they considered that the node always has a secondary acoustic communication link with the sink point to request data; this is feasible in the vertical plane when the channel depth is not too important (a few hundred meters). They provided a comparison of the impact of the size of the batch of data transported, the number of mules, and the distance travelled by the mule on the overall throughput of the whole system. Then they experimentally showed their solution solves their problem. A limitation of their approach is that mules cannot communicate with each other, but only with the sensor node and the surface ship.

In this paper, we focus on a scenario where one fixed *source* node producing data is separated, by a large distance, to one fixed *sink* node. Our study considers moving mules to transfer information between the source and the sink. These mules travel along a path going from the source to the sink. Each mule in the relay system is assigned to a specific section of the path, which can be fairly large. At the edge of its path section, it can communicate with the agent (another mule or the source/sink nodes) of the neighboring path section. The mule can travel within its assigned path section to physically transport the data and act as a moving relay. To put things into perspective, this is nothing more than a transposition of the short-lived Pony Express mail service (April 3, 1860 – October 26, 1861) to the marine case! We review the pros and cons of this system and compare it with the one inspired from [13]. We will show that, depending on physical parameters such as speed, data transfer rate, *etc.*, this solution improves the data throughput of the system. We believe this is the first time this scenario is formalized in the literature.

To do so we will go through these three different metrics that are interested in building up a data muling solution.

1) *Equivalent throughput*:: To characterise the performance of the model, we use the metric introduced in [13]: the equivalent throughput $R_{b,eq}$ defined as the total amount M of data to transfer over the time, T_{total} , it took to be delivered:

$$R_{b,eq} = \frac{M}{T_{total}} \quad (1)$$

The expression of T_{total} will be detailed for each scenario.

2) *Latency*:: Data muling is known to add latency within networks [11]. Here, latency refers to the span between the moment one data packet is emitted by the source and the moment it arrives at the sink.

3) *Energy*:: Another key performance indicator is energy. In general data muling scenarios, energy is spent to communicate and to move. For this paper, energy will be a function of the number of communications and total travelled distance.

The rest of the paper is organized as follows: in Section II we present a linear and circular data muling scenario. In Section III, we compare their performance. Section IV presents

an implementation of the scenarios and Section V concludes the paper.

II. SYSTEM MODEL

Let the set of agents be designated as $\mathcal{N} = \{n_0, n_1, \dots, n_{N+1}\}$, where agent n_0 and n_{N+1} are the data source ($\mathcal{S}$) and sink ($\mathcal{D}$), respectively. The others are the “mules”. The source is the agent producing the data, while the sink is the agent that waits for the data. All agents can communicate in a maximum range d with a data rate R . The mules have a limited memory m .

We assume that the agents move along a polygonal line. The position of agent n_i is uniquely described by a curvilinear abscissa p_i . Without loss of generality, we may consider this polygonal line to be a simple line. We further assume that the source and sink are static, with $p_0 = 0$ and $p_{N+1} = D$. We shall denote by vector $\mathbf{p} = \{p_0, p_1, \dots, p_{N+1}\}$ the positions of all agents at a given time; the dependence on time is implicit and left out for the sake of brevity. We assume that the other agents can move at a speed of modulus v_{mule} and that they are initially evenly distributed between p_0 and p_{N+1} in areas of length L . This length L depends on the scenario. For this paper, to simplify the study, we assume the navigation range and positioning accuracy are not an issue, meaning that the navigation range is infinite and positioning is accurate. Also, we consider that agents never fail and that the environment disturbs neither communication nor navigation.

A. Communication time

We assume all agents can communicate. The communication time with our hypothesis is a combination of the amount m of data to exchange in bits, the data rate R in bits/seconds, and the propagation time $\frac{d}{c}$ in seconds, where c is the celerity of the communication channel in meters per seconds (1500 m/s for underwater acoustics, about 2.25×10^8 m/s in underwater optics) [9]. We add a term T_{rdv} as a penalty to model the initialization time when communication must occur.

If the distance between two agents is d , the range of the modelled communication system is:

$$T_{com} = \frac{m}{R} + \frac{d}{c} + T_{rdv} \quad (2)$$

In the following, we will neglect the channel latency term d/c for convenience and because, in most cases, it is negligible for short-range communication, being small in front of the time to transmit all data.

B. A linear scenario

A first possible scenario could resemble the one presented in Fig. 1. To create a communication link between agents n_0 and n_{N+1} , the mules are distributed in non-overlapping areas of length L . The space between the areas is equal to the communication range d . By dividing distance D in N equal chunks separated by the communication range d , we end up with:

$$L_{lin} = \frac{D - (N + 1)d}{N} \quad (3)$$

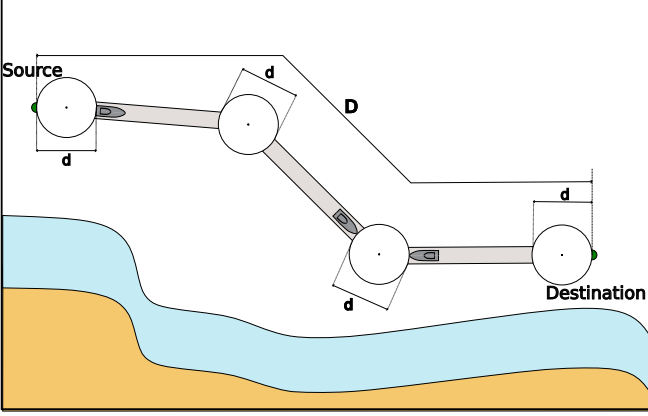


Fig. 1. Linear data muling scenario to transmit data from agent n_0 to n_{N+1} over the distance D

So, for $i \in [1, N]$, the i -th mule lies in interval $[id + (i - 1)L, id + iL]$.

For our study, we consider the following generic operational scenario in which mules are distributed over a straight line that joins the source to the sink:

1) *Situation*:: Let's have an amount M of data in the agent n_0 to send with our data muling protocol. This amount of data is divided into $P \in \mathbb{N}^*$ packets, to be adapted to the memory capacity m of the mules.

2) *Initialisation*: The agent n_0 is placed in the abscissa 0 and the agent n_{N+1} in D . Then we compute the position and the bounds for the roaming area of each mule, as defined in 3. After that, mules are initialized at their lower bound:

$$\forall i \in 1..N, p_i(t=0) = id + (i - 1)L$$

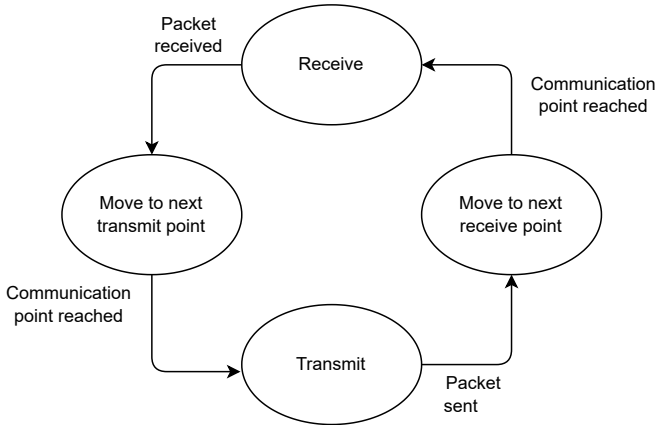


Fig. 2. State machine describing the behavior of a mule

3) *Behavior of a mule*: Each mule follows the state machine shown in figure 2. After initialization, each mule is in the state "Receive", on the lower bound of its area. Once a mule is fully loaded with data, it switches to state "Move to next transmit point" and moves towards the other bound of its area. When the mule reaches the communication point, and when communication is allowed (i.e., the next mule is at a distance $\leq d$), the loaded mule sends all its data loaded to the next

mule. Its state changes to "Move to next receive point". Having done so, it waits for another batch of data. We ensure that we are not locked in the state because of our hypotheses of perfect navigation and communication and by the definition of the areas. This simple state machine fully describes the behavior of a mule in a simulation context. To implement data muling in real life, failure management, a rendezvous solution and communication protocols must be added.

In the above scenario, latency is expressed as the time to send one packet of size m from the source to the sink:

$$T_{latency}^{lin} = (N + 1) \times T_{com} + N \times T_{travel}^{lin} \quad (4)$$

...with T_{com} referring to the communication time, T_{travel} the travel time of a mule over its area L_{lin} i.e $T_{travel}^{lin} = \frac{L_{lin}}{v_{mule}}$. In most cases there is more than one packet to transmit; if P is the total number of packets, the total transmission time becomes:

$$T_{total}^{lin} = T_{latency}^{lin} + (P - 1)(2 \times (T_{com} + 2 \times T_{travel}^{lin})) \quad (5)$$

Here T_{total}^{lin} represents the total time of data transmission fairly well, but it does not express the distance traveled and short-range data transfers. For each mules, those two quantities are equal to:

$$n_{com/mule}^{lin} = 2P \quad (6)$$

$$d_{travel/mule}^{lin} = 2PL_{lin} \quad (7)$$

C. A circular approach

In their paper, Teixeira *et al.* [13] use a circular data muling. In this scenario, the mules can only communicate with the source and the sink but do not communicate with another. Therefore, mules will travel the entire distance, $L_{circ} = D - 2d$ from the source to the sink to carry data. The latency to transmit one packet of size m to the sink is now :

$$T_{latency}^{circ} = 2T_{com} + T_{travel}^{circ} \quad (8)$$

$$(9)$$

And the total time to transmit the data becomes:

$$T_{total}^{circ} = T_{latency}^{circ} + \frac{(P - 1)(2T_{com} + 2T_{travel}^{circ})}{N} \quad (10)$$

both with $T_{travel}^{circ} = \frac{L_{circ}}{v_{mule}}$

The number of communication events and the distance travelled are, respectively, for each mule:

$$n_{com/mule}^{circ} = 2\frac{P}{N} \quad (11)$$

$$d_{travel/mule}^{circ} = 2\frac{P}{N}L_{circ} \quad (12)$$

$$(13)$$

III. COMPARISON

We compare in this section the scenarios described above and give some practical considerations. According to the models above, we can estimate the total time needed to send a fixed amount of data, by varying the speed of the mules and the communication interface.

A. Transmission time

The comparison of the two models leads to the following criterion regarding the data transmission latency:

$$T_{latency}^{lin} - T_{latency}^{circ} = (N - 1) \left(T_{com} - \frac{d}{v_{mule}} \right) \quad (14)$$

The total transfer time generalizes this criterion:

$$T_{total}^{lin} - T_{total}^{circ} = K \left(T_{com} - \frac{d}{v_{mule}} \right) \quad (15)$$

where $K = \left(1 + \frac{2(P-1)}{N} \right) (N - 1)$.

The sign of this criterion is driven by a factor $T_{com} - \frac{d}{v_{mule}}$, which is equivalent to comparing the time to send data over the short-range wireless interface to the time for a mule to travel a distance equal to the communication range (the second term). When the criterion is negative, the time to travel distance d at mule speed exceeds the time to communicate over this distance d . If this happens, the linear model is more suitable. Otherwise, it is cheaper for the mules to move, and the circular model is best. However, in an underwater world, T_{com} is generally greater than $\frac{d}{v_{mule}}$. So, with respect to latency, the linear scenario is less suitable than the circular case.

B. Energy

The energy spent by each mule can be approximated by the sum of $n_{com/mule} \cdot P_{com}$ and $d_{travel/mule}$.

Regarding the expressions of the number of communication events, circular muling is more economical. For navigation, the first thing that appears is that in circular muling, the mule will travel over a longer distance at each time. The difference of both total travelled distances is:

$$d_{travel/mule}^{lin} - d_{travel/mule}^{circ} = -2 \frac{P}{N} (N - 1) d \quad (16)$$

This expression is always negative: a mule in the linear approach travels less than a mule in the circular approach, by a factor $-2 \frac{P}{N} (N - 1) d$.

IV. IMPLEMENTING DATA MULING

To illustrate data muling, we performed an experiment at Lake Guerlédan (Brittany, France) in April 2023. A sink was located 78 meters away from the source, at coordinates (64, 46) meters using the source as the origin. The parameters are provided in the table I. Two small Unmanned Surface Vehicles (USVs) acted as mules. In the following, we detail their architecture and the algorithms they ran.

A. DDBoats

The USV are DDBoats (Fig. 3) which are toy remote-controlled boats modified at ENSTA Bretagne to run autonomously, initially as teaching aids, but also used to experiment with robotic swarms and multi-robot missions (up to twenty). All DDBoats have the same architecture. They integrate a 9 Degrees of freedom (DoF) Inertial Measure Unit (IMU) with a magnetometer, and a Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver, all integrated using

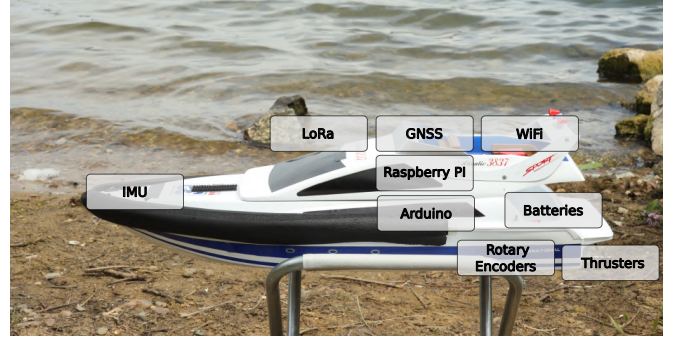


Fig. 3. A “DDBOAT” with its electronic architecture

a Raspberry Pi+Arduino setup using the ROS middleware (www.ros.org). The DDBOats communicate using a WiFi antenna. They have also a LoRa antenna which is unused here. The only actuators are two independent propellers whose rotation speed is controlled.

This section describes the different steps to implement data muling and the basic steps to make it work. A generalized, simple model for a mule is a collection of times spent to receive data, times spent to reach a sending point, times to relay the collected data, and times to reach the next agent. The state machine represented in Fig. 2 summarizes this behavior. To implement data muling is to find a technical solution for:

- A communication interface that can be connected/disconnected when agents to communicate with are within range
- A path planning algorithm to provide the next rendezvous point
- Commands to allow the mule to reach the rendezvous points

B. Communication

Because the DDBOats share a single WiFi network with an actual communication range exceeding the total distance between the source and sink, we used a software emulation to simulate a communication interface with a shorter range d and specific throughput. Each mule runs a custom-designed client to send data and a server to receive data from another mule client. Each client periodically sends its estimated position over the network, and the server enables communication only when they are in a predefined range d . The source and the sink are virtual: when the vehicles are within a range d of these points, they instead communicate with the control computer put ashore. Using this setup allows to simplify the experiment: rendezvous is made because GNSS-measured positions are robust and always available and communication using WiFi is simple. In real life, using underwater agents, that would be much harder to experiment.

C. Rendezvous point

Because our scenarios have predefined reference rendezvous points, we implemented them as parameters of the mission at the start.

D. Command and control

DDboats are differential controlled boats, meaning the difference of thrust between the two actuators controls the speed and heading. To compute the desired thrusts, we built up a waypoint follower algorithm based on a proportional controller computing the Rotation per Minute (RPM) instructions for actuators. Algorithm 1 explains how the error between the desired heading ϕ and the measured heading $\hat{\theta}$ is a feedback to compute the RPM control. Value RPM_{median} is the nominal RPM value used when the vehicle should advance without turning; it compromises between a decent speed, while limiting motor overheating and preserving control in the current. Factor k is a gain empirically set to 40. $\mathbf{p}$ is the mule position, and $\mathbf{w}$ is the position of the desired destination [5].

Algorithm 1 Waypoint Follower

```

1: procedure WAYPOINT( $\hat{\theta}, \mathbf{p}, \mathbf{w}$ )
2:    $\phi = \arctan 2(\mathbf{p} - \mathbf{w})$ 
3:    $e = \text{sawtooth}(\phi - \hat{\theta})$ 
4:    $\text{cmdLeft} = RPM_{median} - k * e$ 
5:    $\text{cmdRight} = RPM_{median} + k * e$ 
6: end procedure

```

The *sawtooth* function is used to avoid a problem of $2k\pi$ modulus. It can be taken as:

$$\text{sawtooth}(\theta) = \arctan(\tan(\frac{\theta}{2})) = \text{mod}(\theta + \pi, 2\pi) - \pi \quad (17)$$

E. Positioning

For the sake of our communications and navigation, the position is computed by the GNSS coordinate projected in a local Cartesian plane using the spherical Earth approximation, where x denote the eastings and y the northings. LAT_REF , LON_REF correspond respectively to the origin of the map, set at the source. Value ρ refers as the earth radius, while lat , lon are the latitude and longitude measured by the GNSS receiver.

$$x = \rho \cdot \cos\left(lon \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot (lat - LAT_REF) \cdot \frac{\pi}{180} \quad (18)$$

$$y = \rho \cdot (lon - LON_REF) \cdot \frac{\pi}{180} \quad (19)$$

F. Results

Figure 4 and 5 expose the trace of the mules and their state. Firstly, compared to our model, the path of the mules is not a straight line: this is due to our control algorithm and some wind and current during the navigation. This effect is well represented in the distance travelled reported in table I, where mules in the linear scenario travel more than in the circular scenario. This discrepancy can explain the factor 12 between the theoretical apparent data rate and the experimental result. In addition, the short range data rate R shown in the table, is the average over all the communication events; but logs show the data rates are not constant as our formula state. The second point is that when evaluating energy consumption, we assumed

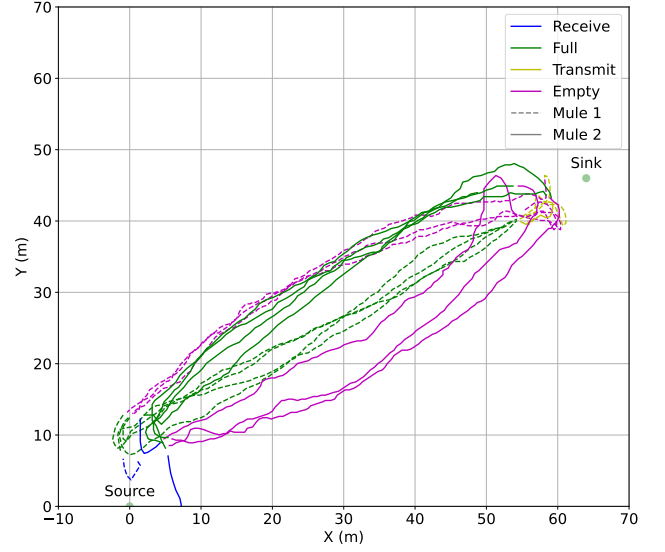


Fig. 4. Mule trajectories for a circular scenario

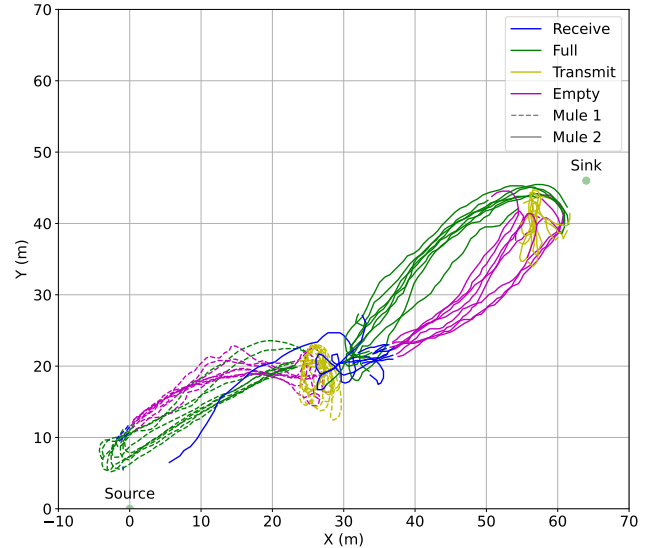


Fig. 5. Mule trajectories for a linear scenario

that mules had two behaviours: either they were mobile to travel between communication points or they were static when communicating. In our implementation, to do station keeping, mule needed to spend some additional energy to resist wind and current, which piles up as the number of communication events increases. Finally, our experiment could not validate the criteria comparing the circular to the linear scenario with respect to latency and total communication time. Due to the experimental parameters, the actual value of the criteria are not significant enough to be compared to theory. In fact, even if the latency criterion is negative, circular muling appears to be still better. This can be explained mostly by the fact that in the circular scenario, all mules communicate over the same network, leading to saturation, whereas in the linear scenario, one mule gathers data from the source and the other

	Symbols	Linear	Circular
Apparent data rate from equations	$R_{b,eq}$	90 kb/s	103 kb/s
Apparent data rate field experimentation	$R_{b,eq}$	73.6 kb/s	89.3 kb/s
Mission duration	T_{total}	916 s	755 s
Short range data rates	R	812 kb/s	814 kb/s
Communication time for one packet	T_{com}	14 s	9 s
Communication range	d	10 m	10 m
Rendezvous Time	T_{rdv}	0 s	0 s
Speed	v_{mule}	0.9 m/s	0.8 m/s
Packet Size	m	1.06 MB	1.06 MB
Number of packets sent	P	8	8
Distance zone	L	28 m	68 m
Distance travelled by mule	$d_{travel/mule}$	563 m — 598 m	501 m — 485 m
Total travel time	T_{total}	669 s — 596 s	662 s — 587 s
Criteria		-0.66	-2.9

TABLE I
PARAMETERS AND RESULT OF THE EXPERIMENTATION

communicates with the sink. Another experiment would be welcome to better compare theory with practice.

V. CONCLUSIONS, FUTURE WORK

Long range, high data rate communication is a key topic for future years. Because of limitation of wireless communication in the underwater environment, there is no such communication system today. This paper exposes data muling, exposing two variants (linear and circular), modeling them functionally and mathematically. The models are valid whatever the environment (underwater, surface, aerial) and whatever the communication system, even if our first motivation was underwater communication. This makes the model suitable for very high-level simulation.

We then exposed a simple data muling experiment using surface vehicles. We showed that, for underwater communication, circular muling is the best variant in terms of data rates, while the linear variant can have its advantages too, especially in the case where communication paradigm could change (environment change, another communication system...).

We believe data muling is a worthy approach to consider to get data in near real-time from highly data-producing sources, instead of awaiting for these sources to come back to surface or back to the harbour to unload them.

REFERENCES

- [1] Chien-Fu Cheng and Lung-Hao Li. Data gathering problem with the data importance consideration in Underwater Wireless Sensor Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 78:300–312, January 2017.
- [2] Marek Doniec. AquaOptical: A Lightweight Device for High-rate Long-range Underwater Point-to-Point Communication. *Marine technology society journal*, 44:6, 2010.
- [3] Marek Doniec, Iulian Topor, Mandar Chitre, and Daniela Rus. Autonomous, Localization-Free Underwater Data Muling Using Acoustic and Optical Communication. In Jaydev P. Desai, Gregory Dudek, Oussama Khatib, and Vijay Kumar, editors, *Experimental Robotics*, volume 88, pages 841–857. Springer International Publishing, Heidelberg, 2013. Series Title: Springer Tracts in Advanced Robotics.

- [4] Matthew Fewell. Empirical Range–Data-Rate Relationships for Undersea Wireless Communications Systems. *Defense Science and Technology Group Australian Government General Document DSTG-GD-1101*, page 52, October 2020.
- [5] Luc Jaulin. *Mobile Robotics*. John Wiley & Sons, September 2019. Google-Books-ID: OMWxDwAAQBAJ.
- [6] Hemani Kaushal and Georges Kaddoum. Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*, 4:1518–1547, 2016.
- [7] Jawaad Ullah Khan and Ho-Shin Cho. Data-Gathering Scheme Using AUVs in Large-Scale Underwater Sensor Networks: A Multihop Approach. *Sensors*, 16(10):1626, October 2016. Number: 10 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [8] Ke Li, Chien-Chung Shen, and Guanling Chen. Energy-constrained bi-objective data muling in underwater wireless sensor networks. In *The 7th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS 2010)*, pages 332–341, November 2010. ISSN: 2155-6814.
- [9] Xavier Lurton. *An Introduction to Underwater Acoustics*. Springer Praxis Books. Springer Berlin Heidelberg, 2 edition, 2010.
- [10] Clifford Pontbriand, Norm Farr, Johanna Hansen, James C. Kinsey, Leo-Paul Pelletier, Jonathan Ware, and Dehann Fourie. Wireless data harvesting using the AUV Sentry and WHOI optical modem. In *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, pages 1–6, Washington, DC, October 2015. IEEE.
- [11] R.C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette. Data mules: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, 2003.*, pages 30–41, Anchorage, AK, USA, 2003. IEEE.
- [12] Alberto Signori, Filippo Campagnaro, Davide Zordan, Federico Favaro, and Michele Zorzi. Underwater Acoustic Sensors Data Collection in the Robotic Vessels as-a-Service Project. In *OCEANS 2019 - Marseille*, pages 1–9, June 2019.
- [13] Filipe B. Teixeira, Nuno Moreira, Rui Campos, and Manuel Ricardo. Data Muling Approach for Long-Range Broadband Underwater Communications. In *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pages 1–4, Barcelona, Spain, October 2019. IEEE.
- [14] Duc Van Le, Hoon Oh, and Seokhoon Yoon. HiCoDG: A Hierarchical Data-Gathering Scheme Using Cooperative Multiple Mobile Elements. *Sensors*, 14(12):24278–24304, December 2014. Number: 12 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Yasin Al-Aboosi, Mustafa Ahmed, Nor Shahida Mohd Shah, and Nor Khamis. « Study of absorption loss effects on acoustic wave propagation in shallow water using different empirical models. » In: *Journal of Engineering and Applied Sciences* 12 (Nov. 2017).
- [2] Ocean Aero. *The TRITON*. en-US. URL: <https://www.oceanaero.com/the-triton> (visited on 11/02/2023).
- [3] ALSEAMAR. *SEAEXPLORER | ALSEAMAR innovation & services at sea*. URL: <https://www.alseamar-alcen.com/index.php/products/underwater-glider/seaexplorer> (visited on 11/03/2023).
- [4] « Autonomous Underwater Vehicles: Equations of Motion. » en. In: (), p. 17.
- [5] C. R. Barnes, M. M. R. Best, B. D. Bornhold, S. K. Juniper, B. Pirenne, and P. Phibbs. « The NEPTUNE Project - a cabled ocean observatory in the NE Pacific: Overview, challenges and scientific objectives for the installation and operation of Stage I in Canadian waters. » In: *2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies* (Apr. 2007). Conference Name: 2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies ISBN: 9781424412075 9781424412082 Place: Tokyo, Japan Publisher: IEEE, pp. 308–313. DOI: [10.1109/UT.2007.370809](https://doi.org/10.1109/UT.2007.370809). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4231139/> (visited on 01/12/2024).
- [6] Deepak Bhadauria, Onur Tekdas, and Volkan Isler. « Robotic data mules for collecting data over sparse sensor fields. » en. In: *Journal of Field Robotics* 28.3 (2011). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/rob.20384>. pp. 388–404. ISSN: 1556-4967. DOI: [10.1002/rob.20384](https://doi.org/10.1002/rob.20384). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.20384> (visited on 03/14/2023).
- [7] *BLUECOMM 200 – WIRELESS UNDERWATER VIDEO AND VEHICLE CONTROL*. en-US. URL: <https://www.innova.no/e/products/subsea-communication/sonardyne-bluecomm-underwater-optical-modem/> (visited on 03/27/2023).

- [8] Pierre-Jean Bouvet. « Récepteurs itératifs pour systèmes multi-antennes. » fr. PhD thesis. INSA de Rennes, Dec. 2005. URL: <https://theses.hal.science/tel-00011415> (visited on 06/09/2023).
- [9] Pierre-Jean Bouvet, Philippe Forjonel, Béatrice Tomasi, Yves Auffret, Yassine Amirat, Gilles Feld, Maëlle Deniel, and Pauline Simon. « Contactless data transfer for autonomous underwater vehicle docking station. » In: *OCEANS 2021*. OCEANS 2021 San Diego - Porto Online Proceedings. San Diego, CA, United States, Sept. 2021. URL: <https://hal.science/hal-03454717> (visited on 01/05/2024).
- [10] Pierre-Jean Bouvet and Alain Loussert. « Capacity analysis of underwater acoustic MIMO communications. » en. In: *OCEANS'10 IEEE SYDNEY*. Sydney, Australia: IEEE, May 2010, pp. 1–8. ISBN: 978-1-4244-5221-7. DOI: [10.1109/OCEANSSYD.2010.5603661](https://doi.org/10.1109/OCEANSSYD.2010.5603661). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5603661/> (visited on 12/15/2021).
- [11] *Centre de transmissions de la Marine nationale de Rosnay — Wikipédia*. URL: https://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_de_transmissions_de_la_Marine_nationale_de_Rosnay (visited on 09/08/2023).
- [12] Chen-Tung Chen and Frank J. Millero. « Speed of sound in seawater at high pressures. » In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 62.5 (Nov. 1977), pp. 1129–1135. ISSN: 0001-4966. DOI: [10.1121/1.381646](https://doi.org/10.1121/1.381646). URL: <https://doi.org/10.1121/1.381646> (visited on 11/21/2023).
- [13] Chien-Fu Cheng and Lung-Hao Li. « Data gathering problem with the data importance consideration in Underwater Wireless Sensor Networks. » en. In: *Journal of Network and Computer Applications* 78 (Jan. 2017), pp. 300–312. ISSN: 1084-8045. DOI: [10.1016/j.jnca.2016.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.10.010). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804516302399> (visited on 06/20/2023).
- [14] Bruce T. Clough. *Metrics, Schmetrics! How The Heck Do You Determine A UAV's Autonomy Anyway?* Tech. rep. Proceedings of the 2002 Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop: Air Force Research Laboratory, Wright-Patterson AFB, OH, 45433, Aug. 2002. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA515926.pdf> (visited on 12/15/2023).
- [15] Robert Codd-Downey and Michael Jenkin. « LightByte: Communicating Wirelessly with an Underwater Robot using Light: » en. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. Porto, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2018, pp. 299–306. ISBN: 978-989-758-321-6. DOI: [10.5220/0006855202990306](https://doi.org/10.5220/0006855202990306).

- URL: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006855202990306> (visited on 11/28/2023).
- [16] Alan B. Coppens. « Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 69.3 (Mar. 1981), pp. 862–863. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.385486](https://doi.org/10.1121/1.385486). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/69/3/862/663503/Simple-equations-for-the-speed-of-sound-in> (visited on 12/07/2023).
- [17] Charles Coquet, Andreas Arnold, and Pierre-Jean Bouvet. « Control of a Robotic Swarm Formation to Track a Dynamic Target with Communication Constraints: Analysis and Simulation. » en. In: *Applied Sciences* 11.7 (Apr. 2021), p. 3179. ISSN: 2076-3417. DOI: [10.3390/app11073179](https://doi.org/10.3390/app11073179). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/7/3179> (visited on 12/28/2023).
- [18] Rona Rita David. *Submarine Cables: Risks and Security Threats*. en-GB. Mar. 2022. URL: <https://energyindustryreview.com/analysis/submarine-cables-risks-and-security-threats/> (visited on 09/06/2023).
- [19] V. A. Del Grosso. « New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 56.4 (Oct. 1974), pp. 1084–1091. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.1903388](https://doi.org/10.1121/1.1903388). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/56/4/1084/764059/New-equation-for-the-speed-of-sound-in-natural> (visited on 12/07/2023).
- [20] Marek Doniec. « AquaOptical: A Lightweight Device for High-rate Long-range Underwater Point-to-Point Communication. » en. In: *Marine technology society journal* 44 (2010), p. 6.
- [21] Seibert Q. Duntley. « Light in the Sea*. » EN. In: *JOSA* 53.2 (Feb. 1963). Publisher: Optica Publishing Group, pp. 214–233. DOI: [10.1364/JOSA.53.000214](https://doi.org/10.1364/JOSA.53.000214). URL: <https://opg.optica.org/josa/abstract.cfm?uri=josa-53-2-214> (visited on 09/08/2023).
- [22] Paul C. Etter. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. en. Google-Books-ID: 3a1SDwAAQBAJ. CRC Press, Apr. 2018. ISBN: 978-1-351-67972-5.
- [23] EvoLogics. *SONOBOT 5 System* | EvoLogics. en-US. URL: <https://evologics.de/sonobot-5-system> (visited on 11/02/2023).
- [24] *FedEx Bandwidth*. URL: <https://what-if.xkcd.com/31/> (visited on 01/19/2024).
- [25] Matthew Fewell. « Empirical Range–Data-Rate Relationships for Undersea Wireless Communications Systems. » en. In: *Defense Science and Technology Group Australian Government General Document DSTG-GD-1101* (Oct. 2020), p. 52.

- [26] F. H. Fisher and V. P. Simmons. « Sound absorption in sea water. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 62.3 (Sept. 1977), pp. 558–564. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.381574](https://pubs.aip.org/jasa/article/62/3/558/764543/Sound-absorption-in-sea-water). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/62/3/558/764543/Sound-absorption-in-sea-water> (visited on 12/07/2023).
- [27] NOAA Fisheries. *Ocean Noise | NOAA Fisheries*. en. Archive Location: National. May 2023. URL: <https://www.fisheries.noaa.gov/national/science-data/ocean-noise> (visited on 06/15/2023).
- [28] Thor I. Fossen. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. en. Google-Books-ID: oR3sBgAAQBAJ. John Wiley & Sons, May 2011. ISBN: 978-1-119-99149-6.
- [29] Nathan Fourniol, Luc Jaulin, Pierre-Jean Bouvet, and Andreas Arnold. « Underwater Data Muling: Scenarios, Implementation, and Performances. » In: *Oceans 2023 Gulf Coast*. Biloxi, Mississippi, USA, 2023.
- [30] R. E. Francois and G. R. Garrison. « Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 72.6 (Dec. 1982), pp. 1879–1890. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.388673](https://pubs.aip.org/jasa/article/72/6/1879/670261/Sound-absorption-based-on-ocean-measurements-Part). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/72/6/1879/670261/Sound-absorption-based-on-ocean-measurements-Part> (visited on 12/07/2023).
- [31] Chadi Gabriel, Mohammad-Ali Khalighi, Salah Bourennane, Pierre Leon, and Vincent Rigaud. « Channel modeling for underwater optical communication. » In: *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*. ISSN: 2166-0077. Dec. 2011, pp. 833–837. DOI: [10.1109/GLOCOMW.2011.6162571](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2011.6162571).
- [32] GeoSci. *Phase Velocity — Electromagnetic Geophysics*. URL: https://em.geosci.xyz/content/maxwell1_fundamentals/harmonic_planewaves_homogeneous_phasevelocity.html (visited on 10/10/2023).
- [33] Howard R. Gordon. « Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? » en. In: *Limnology and Oceanography* 34.8 (1989). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.4319/lo.1989.34.8.1389>. pp. 1389–1409. ISSN: 1939-5590. DOI: [10.4319/lo.1989.34.8.1389](https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1389). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4319/lo.1989.34.8.1389> (visited on 03/22/2023).
- [34] Ressources naturelles Canada Gouvernement du Canada. *Éléments du champ magnétique*. fr. URL: https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/comp-fr.php (visited on 05/16/2023).

- [35] Vincent Groizeleau. *AUSS : Quand Thales entreprend de révolutionner les drones sous-marins* | *Mer et Marine*. fr. Nov. 2016. URL: <https://www.meretmarine.com/fr/defense/auss-quand-thales-entreprend-de-revolutionner-les-drones-sous-marins> (visited on 10/30/2023).
- [36] *GROW project*. en-US. URL: <https://grow.inesctec.pt/> (visited on 11/21/2023).
- [37] Tasnim Hamza, Mohammad-Ali Khalighi, Salah Bourennane, Pierre Léon, and Jan Opderbecke. « Investigation of solar noise impact on the performance of underwater wireless optical communication links. » EN. In: *Optics Express* 24.22 (Oct. 2016). Publisher: Optica Publishing Group, pp. 25832–25845. ISSN: 1094-4087. DOI: [10.1364/OE.24.025832](https://doi.org/10.1364/OE.24.025832). URL: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-24-22-25832> (visited on 01/05/2024).
- [38] Geoffrey A. Hollinger, Sunav Choudhary, Parastoo Qarabaqi, Christopher Murphy, Urbashi Mitra, Gaurav S. Sukhatme, Milica Stojanovic, Hanumant Singh, and Franz Hover. « Underwater Data Collection Using Robotic Sensor Networks. » In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 30.5 (June 2012). Conference Name: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, pp. 899–911. ISSN: 1558-0008. DOI: [10.1109/JSAC.2012.120606](https://doi.org/10.1109/JSAC.2012.120606).
- [39] Daeyoup Hwang and Dongkyun Kim. « DFR: Directional flooding-based routing protocol for underwater sensor networks. » In: *OCEANS 2008*. ISSN: 0197-7385. Sept. 2008, pp. 1–7. DOI: [10.1109/OCEANS.2008.5151939](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5151939). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5151939> (visited on 10/05/2023).
- [40] Ifremer. *Victor 6000*. fr. URL: <https://www.ifremer.fr/fr/flotte-oceanographique-francaise/decouvrez-les-navires-de-la-flotte-oceanographique-francaise/victor-6000> (visited on 11/02/2023).
- [41] ISO/IEC 7498-1:1994(en), *Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model — Part 1*. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:7498:-1:ed-1:v2:en> (visited on 12/07/2023).
- [42] iXblue. *DriX Uncrewed Surface Vehicles*. EN. URL: <https://www.ixblue.com/maritime/maritime-autonomy/uncrewed-surface-vehicles/> (visited on 11/02/2023).
- [43] J.S. Jaffe. « Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems. » In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 15.2 (Apr. 1990). Conference Name: IEEE Journal of Oceanic Engineering, pp. 101–111. ISSN: 1558-1691. DOI: [10.1109/48.50695](https://doi.org/10.1109/48.50695).

- [44] Sushant Jain, Rahul C. Shah, Waylon Brunette, Gaetano Borriello, and Sumit Roy. « Exploiting Mobility for Energy Efficient Data Collection in Wireless Sensor Networks. » en. In: *Mobile Networks and Applications* 11.3 (June 2006), pp. 327–339. ISSN: 1572-8153. DOI: [10.1007/s11036-006-5186-9](https://doi.org/10.1007/s11036-006-5186-9). URL: <https://doi.org/10.1007/s11036-006-5186-9> (visited on 03/28/2023).
- [45] *Jason* 3. fr. Apr. 2015. URL: <https://jason-3.cnes.fr/fr/JASON3/Fr/index.htm> (visited on 11/03/2023).
- [46] L Jaulin. « Calibration des magnétomètres et accéléromètres. » en. In: *Submeeting 2023* (Apr. 2023). URL: https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/speech_calibration.pdf.
- [47] Luc Jaulin. *Mobile Robotics*. en. Google-Books-ID: OMWxD-wAAQBAJ. John Wiley & Sons, Sept. 2019. ISBN: 978-1-119-66349-2.
- [48] David B. Johnson and David A. Maltz. « Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. » en. In: *Mobile Computing*. Ed. by Tomasz Imielinski and Henry F. Korth. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 1996, pp. 153–181. ISBN: 978-0-585-29603-6. DOI: [10.1007/978-0-585-29603-6_5](https://doi.org/10.1007/978-0-585-29603-6_5). URL: https://doi.org/10.1007/978-0-585-29603-6_5 (visited on 10/06/2023).
- [49] Pierre Juhel and Pierre Alais. *Histoire de l'acoustique sous-marine*. fre. Inflexions. Paris: Vuibert Adapt, 2005. ISBN: 978-2-7117-5383-3 978-2-909680-68-2.
- [50] Jawaad Ullah Khan and Ho-Shin Cho. « Data-Gathering Scheme Using AUVs in Large-Scale Underwater Sensor Networks: A Multihop Approach. » en. In: *Sensors* 16.10 (Oct. 2016). Number: 10 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 1626. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s16101626](https://www.mdpi.com/1424-8220/16/10/1626). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/10/1626> (visited on 09/05/2022).
- [51] D.B. Kilfoyle and A.B. Baggeroer. « The state of the art in underwater acoustic telemetry. » In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25.1 (Jan. 2000). Conference Name: IEEE Journal of Oceanic Engineering, pp. 4–27. ISSN: 1558-1691. DOI: [10.1109/48.820733](https://doi.org/10.1109/48.820733).
- [52] Manon Kok, Jeroen D. Hol, Thomas B. Schön, Fredrik Gustafsson, and Henk Luinge. « Calibration of a magnetometer in combination with inertial sensors. » In: *2012 15th International Conference on Information Fusion*. July 2012, pp. 787–793.

- [53] Kongsberg. *HISAS 1030 data-sheet.pdf*. URL: <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/high-resolution-interferometric-synthetic-aperture-sonar---hisas-1030/> (visited on 10/26/2023).
- [54] Alexandre Lampe. « Méthodologie d'évaluation du degré d'autonomie d'un robot mobile terrestre. » fr. PhD thesis. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, Dec. 2006. URL: <https://theses.hal.science/tel-00136386> (visited on 12/15/2023).
- [55] Fabio Leccese and Giuseppe Spagnolo. « State-of-the art and perspectives of underwater optical wireless communications. » In: *ACTA IMEKO* 10 (Dec. 2021), p. 25. DOI: [10.21014/acta_imeko.v10i4.1097](https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v10i4.1097).
- [56] Claude C. Leroy and François Parthiot. « Depth-pressure relationships in the oceans and seas. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 103.3 (Mar. 1998), pp. 1346–1352. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.421275](https://doi.org/10.1121/1.421275). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/103/3/1346/557949/Depth-pressure-relationships-in-the-oceans-and> (visited on 12/07/2023).
- [57] Claude C. Leroy, Stephen P. Robinson, and Mike J. Goldsmith. « A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 124.5 (Nov. 2008), pp. 2774–2782. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.2988296](https://doi.org/10.1121/1.2988296). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/124/5/2774/910920/A-new-equation-for-the-accurate-calculation-of> (visited on 12/07/2023).
- [58] *Les signes en plongée : Le langage universel des plongeurs*. fr-FR. Aug. 2021. URL: <https://www.21o2.me/6117-les-signes-en-plongee-sous-marine/> (visited on 09/08/2023).
- [59] Ke Li, Chien-Chung Shen, and Guanling Chen. « Energy-constrained bi-objective data muling in underwater wireless sensor networks. » In: *The 7th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS 2010)*. ISSN: 2155-6814. Nov. 2010, pp. 332–341. DOI: [10.1109/MASS.2010.5664026](https://doi.org/10.1109/MASS.2010.5664026).
- [60] Mingyang Li and Anastasios I. Mourikis. « Improving the accuracy of EKF-based visual-inertial odometry. » In: *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St Paul, MN, USA: IEEE, May 2012, pp. 828–835. ISBN: 978-1-4673-1405-3 978-1-4673-1403-9 978-1-4673-1578-4 978-1-4673-1404-6. DOI: [10.1109/ICRA.2012.6225229](https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225229). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6225229/> (visited on 10/14/2022).

- [61] Xavier Lurton. *An Introduction to Underwater Acoustics*. en. 2nd ed. Springer Praxis Books. Springer Berlin Heidelberg, 2010. URL: <https://link.springer.com/book/9783540784807> (visited on 06/26/2023).
- [62] Jian Ma, Canfeng Chen, and Jyri P. Salomaa. « mWSN for Large Scale Mobile Sensing. » en. In: *Journal of Signal Processing Systems* 51.2 (May 2008), pp. 195–206. ISSN: 1939-8115. DOI: [10.1007/s11265-007-0118-x](https://doi.org/10.1007/s11265-007-0118-x). URL: <https://doi.org/10.1007/s11265-007-0118-x> (visited on 05/15/2023).
- [63] Kenneth V. Mackenzie. « Nine-term equation for sound speed in the oceans. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 70.3 (Sept. 1981), pp. 807–812. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.386920](https://pubs.aip.org/jasa/article/70/3/807/771547/Nine-term-equation-for-sound-speed-in-the-oceans). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/70/3/807/771547/Nine-term-equation-for-sound-speed-in-the-oceans> (visited on 12/07/2023).
- [64] Bernard Marr. *The 4 Ds Of Robotization: Dull, Dirty, Dangerous And Dear*. en. Section: Tech. URL: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/10/16/the-4-ds-of-robotization-dull-dirty-dangerous-and-dear/> (visited on 12/15/2023).
- [65] MATS3G | Sercel. URL: <https://www.sercel.com/en/products/mats3G> (visited on 09/08/2023).
- [66] Larry Mayer, Martin Jakobsson, Graham Allen, Boris Dorschel, Robin Falconer, Vicki Ferrini, Geoffroy Lamarche, Helen Snaith, and Pauline Weatherall. « The Nippon Foundation—GEOCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World’s Oceans Completely Mapped by 2030. » en. In: *Geosciences* 8.2 (Feb. 2018), p. 63. ISSN: 2076-3263. DOI: [10.3390/geosciences8020063](http://www.mdpi.com/2076-3263/8/2/63). URL: <http://www.mdpi.com/2076-3263/8/2/63> (visited on 12/12/2023).
- [67] Andrew McAfee and Erik Brynjolfsson. *Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future*. English. Illustrated edition. New York: W. W. Norton & Company, June 2017. ISBN: 978-0-393-25429-7.
- [68] Herman Medwin. « Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 58.6 (Dec. 1975), pp. 1318–1319. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.380790](https://pubs.aip.org/jasa/article/58/6/1318/749398/Speed-of-sound-in-water-A-simple-equation-for). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/58/6/1318/749398/Speed-of-sound-in-water-A-simple-equation-for> (visited on 12/07/2023).
- [69] Chris Mentzer, Ryan D. Lamm, and Jerry Towler. « Automated Driving Impediments. » en. In: *SAE International Journal of Commercial Vehicles* 9.2 (Sept. 2016), pp. 51–56. ISSN: 1946-3928. DOI: [10.4271/2016-01-8007](https://www.sae.org/content/2016-01-8007/). URL: <https://www.sae.org/content/2016-01-8007/> (visited on 12/28/2023).

- [70] Farshad Miramirkhani and Murat Uysal. « Visible Light Communication Channel Modeling for Underwater Environments With Blocking and Shadowing. » en. In: *IEEE Access* 6 (2018), pp. 1082–1090. ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2777883](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2777883). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8119913/> (visited on 06/08/2021).
- [71] *Modèle OSI*. fr. Page Version ID: 204505331. May 2023. URL: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mod%C3%A8le_OSI&oldid=204505331 (visited on 06/16/2023).
- [72] Steve Mwangi and Quinn, Sterling. « Hamming Codes. » In: *Interdisciplinary Journal of Student Research and Scholarship* 4.1 (Nov. 2020). URL: <https://digitalcommons.tacoma.uw.edu/access/vol4/iss1/6> (visited on 12/08/2023).
- [73] *NemoSens® microAUV*. en-US. URL: <https://rtsys.eu/nemosens-micro-auv> (visited on 03/18/2024).
- [74] France 3 Occitanie. *Aéronautique : mais quel est donc cet étrange appareil fabriqué par Airbus ?* fr-FR. May 2023. URL: <https://france3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/haute-garonne/toulouse/aeronautique-mais-quel-est-donc-cet-etrange-appareil-fabrique-par-airbus-2780938.html> (visited on 11/02/2023).
- [75] Sofar Ocean. *Smart Mooring*. en. URL: <https://www.sofaroccean.com/products/smart-mooring> (visited on 11/02/2023).
- [76] Alberto Olivares, Gonzalo Ruiz-Garcia, Gonzalo Olivares, Juan Manuel Górriz, and Javier Ramirez. « Automatic Determination of Validity of Input Data Used in Ellipsoid Fitting MARG Calibration Algorithms. » en. In: *Sensors* 13.9 (Sept. 2013). Number: 9 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, pp. 11797–11817. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s130911797](https://doi.org/10.3390/s130911797). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/9/11797> (visited on 11/24/2023).
- [77] Jesús Hamilton Ortiz and Alvaro Pachon De La Cruz. *Ad Hoc Networks*. en. Google-Books-ID: kPSODwAAQBAJ. BoD – Books on Demand, May 2017. ISBN: 978-953-51-3109-0.
- [78] Commission OSPAR. *Underwater Noise OSPAR*. en-gb. URL: <https://www.ospar.org/work-areas/eiha/noise> (visited on 06/15/2023).
- [79] Thierry Deschamps de Paillette. « Transmissions numériques sans-fil pour la surveillance environnementale en milieu sous-marin. » fr. In: ().

- [80] Charalampos Papapavlou, Konstantinos Paximadis, Dimitris Uzunidis, and Ioannis Tomkos. « Toward SDM-Based Submarine Optical Networks: A Review of Their Evolution and Upcoming Trends. » In: *Telecom 3* (Apr. 2022). DOI: [10.3390/telecom3020015](https://doi.org/10.3390/telecom3020015).
- [81] Michael Pidwirny and Scott Jones. *Introduction to the Oceans*. URL: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/80.html> (visited on 11/02/2023).
- [82] Bouvet Pierre-Jean, Forjonel Philippe, Tomasi Beatrice, Auffret Yves, Amirat Yassine, Feld Gilles, Deniel Maëlle, and Simon Pauline. « Contactless data transfer for autonomous underwater vehicle docking station. » In: *OCEANS 2021: San Diego – Porto*. ISSN: 0197-7385. Sept. 2021, pp. 1–5. DOI: [10.23919/OCEANS44145.2021.9705698](https://doi.org/10.23919/OCEANS44145.2021.9705698).
- [83] STMicroelectronics Pololu. « iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope. » In: DocID027423 Rev 4 (), p. 2015. URL: <https://www.pololu.com/file/0J1087/LSM6DS33.pdf>.
- [84] Clifford Pontbriand, Norm Farr, Johanna Hansen, James C. Kinsey, Leo-Paul Pelletier, Jonathan Ware, and Dehann Fourie. « Wireless data harvesting using the AUV Sentry and WHOI optical modem. » en. In: *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*. Washington, DC: IEEE, Oct. 2015, pp. 1–6. ISBN: 978-0-933957-43-5. DOI: [10.23919/OCEANS.2015.7401985](https://doi.org/10.23919/OCEANS.2015.7401985). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7401985/> (visited on 09/14/2021).
- [85] John Potter, João Alves, Dale Green, Giovanni Zappa, Ivor Nissen, and Kim McCoy. « The JANUS underwater communications standard. » In: *2014 Underwater Communications and Networking (UComms)*. Sept. 2014, pp. 1–4. DOI: [10.1109/UComms.2014.7017134](https://doi.org/10.1109/UComms.2014.7017134).
- [86] Boselin Prabhu, Sophia Sudhir, S.Maheswaran, and M.Navaneethakrishnan. « Real-World Applications of Distributed Clustering Mechanism in Dense Wireless Sensor Networks. » In: *International Journal of Computing, Communications and Networking* 2 (Oct. 2013), pp. 99–105.
- [87] Ryan W Proud, Jeremy J Hart, and Richard B Mrozinski. « Methods for Determining the Level of Autonomy to Design into a Human Spaceflight Vehicle: A Function Specific Approach. » en. In: (Sept. 2003).
- [88] Open Ocean Robotics. *DataXplorer*. en. URL: <https://www.openoceanrobotics.com/surface-vehicles> (visited on 11/03/2023).

- [89] William Ryan and Shu Lin. *Channel Codes: Classical and Modern*. en. Cambridge University Press, Sept. 2009. ISBN: 978-1-139-48301-8.
- [90] M. Schulkin and H. W. Marsh. « Sound Absorption in Sea Water. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 34.6 (June 1962), pp. 864–865. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.1918213](https://pubs.aip.org/jasa/article/34/6/864/600910/Sound-Absorption-in-Sea-Water). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/34/6/864/600910/Sound-Absorption-in-Sea-Water> (visited on 12/07/2023).
- [91] SEDI-ATI. *SPOOLS Disposable Fiber Spool for Remotely Operated Underwater Vehicle DTSRBOBROV*. URL: https://www.sedi-ati.com/wp-content/uploads/2023/05/SP00LS_Disposable-Fiber-Spool-for-Remotely-Operated-Underwater-Vehicle_DTSRBOBROV.pdf (visited on 12/08/2023).
- [92] R.C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette. « Data mules: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. » en. In: *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, 2003*. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2003, pp. 30–41. ISBN: 978-0-7803-7879-7. DOI: [10.1109/SNPA.2003.1203354](https://doi.org/10.1109/SNPA.2003.1203354). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1203354/> (visited on 06/11/2021).
- [93] C. E. Shannon. « A mathematical theory of communication. » In: *The Bell System Technical Journal* 27.3 (July 1948). Conference Name: The Bell System Technical Journal, pp. 379–423. ISSN: 0005-8580. DOI: [10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x).
- [94] B Sheridan and L. Verplank. *Human and Computer Control Of Undersea Teleoperator*. en. Technical Report N00014-77-C-0256. Massachusetts Institute of Technology, 1978.
- [95] Thomas B. Sheridan. *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. en. Google-Books-ID: eu41_M2Do9oC. MIT Press, 1992. ISBN: 978-0-262-19316-0.
- [96] C. S. Savidhan Shetty, Ramavath Prasad Naik, U. Shripathi Acharya, and Wan-Young Chung. « Performance analysis of underwater vertical wireless optical communication system in the presence of weak turbulence, pointing errors and attenuation losses. » en. In: *Optical and Quantum Electronics* 55.1 (Nov. 2022), p. 1. ISSN: 1572-817X. DOI: [10.1007/s11082-022-04283-6](https://doi.org/10.1007/s11082-022-04283-6). URL: <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04283-6> (visited on 09/08/2023).
- [97] Alberto Signori, Filippo Campagnaro, Davide Zordan, Federico Favaro, and Michele Zorzi. « Underwater Acoustic Sensors Data Collection in the Robotic Vessels as-a-Service Project. » In: *OCEANS 2019 - Marseille*. June 2019, pp. 1–9. DOI: [10.1109/OCEANSE.2019.8867100](https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2019.8867100).

- [98] Joan Solà. « Quaternion kinematics for the error-state KF. » Mar. 2015. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01122406> (visited on 09/30/2022).
- [99] Milica Stojanovic. « On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. » en. In: *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 11.4 (Oct. 2007), pp. 34–43. ISSN: 1559-1662, 1931-1222. DOI: [10.1145/1347364.1347373](https://doi.org/10.1145/1347364.1347373). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1347364.1347373> (visited on 01/05/2024).
- [100] Kay Strama, Daniel Weber, and Helge Renkewitz. « Evaluation of Wifi data transmission algorithms for short distance underwater communication. » In: *OCEANS 2021: San Diego – Porto*. ISSN: 0197-7385. Sept. 2021, pp. 1–6. DOI: [10.23919/OCEANS44145.2021.9705847](https://doi.org/10.23919/OCEANS44145.2021.9705847).
- [101] *STRATEGIEFONDSMARINS.pdf*. URL: https://marine-oceans.com/wp-content/plugins/pdfjs-viewer-shortcode/pdfjs/web/viewer.php?file=https://marine-oceans.com/wp-content/uploads/2022/02/STRATEGIEFONDSMARINS.pdf&attachment_id=35950&dButton=true&pButton=true&oButton=false&sButton=true#zoom=auto&pagemode=none&wponce=fcb4f2a227 (visited on 12/12/2023).
- [102] Fatma Abdalkarim Tahir, Bhagwan Das, Mohammad Faiz Liew Abdullah, and Mohammed Salih Mohammed Gismalla. « Design and Analysis of Variation in Chlorophyll and Depth for Open Ocean Underwater Optical Communication. » en. In: *Wireless Personal Communications* 116.2 (Jan. 2021), pp. 1273–1291. ISSN: 1572-834X. DOI: [10.1007/s11277-020-07275-5](https://doi.org/10.1007/s11277-020-07275-5). URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07275-5> (visited on 03/24/2023).
- [103] Filipe B. Teixeira, Bruno M. Ferreira, Nuno Moreira, Nuno Abreu, Murillo Villa, João P. Loureiro, Nuno A. Cruz, José C. Alves, Manuel Ricardo, and Rui Campos. « A Novel Simulation Platform for Underwater Data Muling Communications Using Autonomous Underwater Vehicles. » en. In: *Computers* 10.10 (Oct. 2021). Number: 10 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 119. ISSN: 2073-431X. DOI: [10.3390/computers10100119](https://doi.org/10.3390/computers10100119). URL: <https://www.mdpi.com/2073-431X/10/10/119> (visited on 03/22/2022).
- [104] Filipe B. Teixeira, Nuno Moreira, Nuno Abreu, Bruno Ferreira, Manuel Ricardo, and Rui Campos. « UDMSim: A Simulation Platform for Underwater Data Muling Communications. » In: *2020 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. ISSN: 2160-4894. Oct. 2020, pp. 1–6. DOI: [10.1109/WiMob50308.2020.9253412](https://doi.org/10.1109/WiMob50308.2020.9253412).

- [105] Filipe B. Teixeira, Nuno Moreira, Rui Campos, and Manuel Ricardo. « Data Muling Approach for Long-Range Broadband Underwater Communications. » en. In: *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. Barcelona, Spain: IEEE, Oct. 2019, pp. 1–4. ISBN: 978-1-72813-316-4. DOI: [10.1109/WiMOB.2019.8923472](https://doi.org/10.1109/WiMOB.2019.8923472). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8923472/> (visited on 06/08/2021).
- [106] William H. Thorp. « Analytic Description of the Low-Frequency Attenuation Coefficient. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 42.1 (July 1967), pp. 270–270. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.1910566](https://doi.org/10.1121/1.1910566). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/42/1/270/753902/Analytic-Description-of-the-Low-Frequency> (visited on 12/07/2023).
- [107] David Tse and Pramod Viswanath. *Fundamentals of Wireless Communication*. en. 1st ed. Cambridge University Press, May 2005. ISBN: 978-0-521-84527-4 978-0-511-80721-3. DOI: [10.1017/CB09780511807213](https://doi.org/10.1017/CB09780511807213). URL: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511807213/type/book> (visited on 01/05/2024).
- [108] George V. Tsoulos, ed. *MIMO system technology for wireless communications*. en. The electrical engineering and applied signal processing series. OCLC: ocm62493360. Boca Raton [Fla.]: CRC/Taylor & Francis, 2006. ISBN: 978-0-8493-4190-8.
- [109] H Valderhaug. « Pioneering vessel optimized for the clients' new needs. » en. In: ().
- [110] Antonio Vasilijevic, Nikola Stilinovic, D. Nad, Filip Mandić, Nikola Miskovic, and Zoran Vukić. *AUV based mobile fluorometers: System for underwater oil-spill detection and quantification*. Journal Abbreviation: SAS 2015 - 2015 IEEE Sensors Applications Symposium, Proceedings Publication Title: SAS 2015 - 2015 IEEE Sensors Applications Symposium, Proceedings. June 2015. DOI: [10.1109/SAS.2015.7133650](https://doi.org/10.1109/SAS.2015.7133650).
- [111] Christophe Viel, Juliette Drupt, Claire Dune, and Vincent Hugel. « ROV localization based on umbilical angle measurement. » In: *Ocean Engineering* 269 (Feb. 2023), p. 113570. ISSN: 0029-8018. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2022.113570](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113570). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822028530> (visited on 09/06/2023).
- [112] Gordon M. Wenz. « Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 34.12 (Dec. 1962), pp. 1936–1956. ISSN: 0001-4966. DOI: [10.1121/1.1909155](https://doi.org/10.1121/1.1909155). URL: <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1909155> (visited on 06/08/2021).

- [113] Gordon M. Wenz. « Review of Underwater Acoustics Research: Noise. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 51.3B (Mar. 1972), pp. 1010–1024. ISSN: 0001-4966. DOI: [10.1121/1.1912921](https://doi.org/10.1121/1.1912921). URL: <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1912921> (visited on 06/08/2021).
- [114] *Why YUCO is unique*. fr-FR. URL: <https://seaber.fr/why-yuco-is-unique> (visited on 03/18/2024).
- [115] Wayne D. Wilson. « Equation for the Speed of Sound in Sea Water. » en. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 32.10 (Oct. 1960), pp. 1357–1357. ISSN: 0001-4966, 1520-8524. DOI: [10.1121/1.1907913](https://doi.org/10.1121/1.1907913). URL: <https://pubs.aip.org/jasa/article/32/10/1357/629239/Equation-for-the-Speed-of-Sound-in-Sea-Water> (visited on 12/07/2023).
- [116] Tsai-Chen Wu, Yu-Chieh Chi, Huai-Yung Wang, Cheng-Ting Tsai, and Gong-Ru Lin. « Blue Laser Diode Enables Underwater Communication at 12.4 Gbps. » eng. In: *Scientific Reports* 7 (Jan. 2017), p. 40480. ISSN: 2045-2322. DOI: [10.1038/srep40480](https://doi.org/10.1038/srep40480).
- [117] Peng Xie, Jun-Hong Cui, and Li Lao. « VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks. » en. In: *NETWORKING 2006. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems*. Ed. by Fernando Boavida, Thomas Plagemann, Burkhard Stiller, Cedric Westphal, and Edmundo Monteiro. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, pp. 1216–1221. ISBN: 978-3-540-34193-2. DOI: [10.1007/11753810_111](https://doi.org/10.1007/11753810_111).
- [118] Pei Zhang, Christopher M. Sadler, Stephen A. Lyon, and Margaret Martonosi. « Hardware design experiences in ZebraNet. » en. In: *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*. Baltimore MD USA: ACM, Nov. 2004, pp. 227–238. ISBN: 978-1-58113-879-5. DOI: [10.1145/1031495.1031522](https://doi.org/10.1145/1031495.1031522). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1031495.1031522> (visited on 03/07/2023).

COLOPHON

This document was typeset using the typographical look-and-feel classicthesis developed by André Miede. The style was inspired by Robert Bringhurst's seminal book on typography "*The Elements of Typographic Style*". classicthesis is available for both L^AT_EX and L^yX:

<https://bitbucket.org/amiede/classicthesis/>

Happy users of classicthesis usually send a real postcard to the author, a collection of postcards received so far is featured here:

<http://postcards.miede.de/>

Final Version as of April 26, 2024 (classicthesis v4.6).