



ENSTA Bretagne
UE 5.4 Robotique et industrie

Troisième année (3A)
Filières Ingénieur sous Statut Élève (FISE 2022) et
Ingénieur des Études des Techniques de l'Armement (IETA 2022)
Spécialité Robotique Autonome

Rapport de projet

Architecture robotique
Data muling

Dépôt Gitlab accessible [ici](#)

Travail réalisé par
La promotion FISE/IETA ROB 2022

Sous la direction de
Luc JAULIN
Enseignant à l'ENSTA Bretagne
Chercheur au LabSTICC

À Brest (29)
Du 20 septembre 2021 au 17 février 2022

17 février 2022

Glossaire

AUV *Automated Underwater Vehicle* - Robot sous-marin autonome.

DVL *Doppler Velocity Log* - Système d'évaluation de la vitesse relative d'un AUV par rapport à l'eau par effet Doppler.

GNSS *Global Navigation Satellite System* - Système de positionnement satellite global.

IMU *Inertial Motion Unit* - Centrale inertielle (accéléromètre, gyroscope, compas).

EKF *Extended Kalman Filter* - Filtre de Kalman étendu permettant de déterminer la prédire et corriger la position du robot dans son environnement à chaque itération.

Li-Fi *Light Fidelity* - Technologie sans fil utilisant un faisceau lumineux diffusé par LED pour communiquer des données sur un réseau.

Table des matières

Glossaire	ii
1. Introduction	1
2. État de l'art	2
3. Cahier des charges	3
3.1. Objectifs	3
3.2. Exigences fonctionnelles	3
3.3. Spécifications contextuelles	3
4. Réalisation	5
4.1. Conception du système	5
4.1.1. Choix techniques globaux	5
4.1.2. Fonctionnement général du système	6
4.1.3. Problème du rendez-vous	7
4.1.4. Transmission des données	8
4.1.4.1. Intégration du système de communication	8
4.1.5. Architecture fonctionnelle du système	11
4.1.5.1. Caractéristiques de transmission des données	12
4.1.5.2. Distance	12
4.1.5.3. Encodage des données	13
4.1.5.4. Temps d'émission	14
4.1.5.5. Consommation d'énergie lors de la transmission	14
4.1.6. Recharge des batteries	15
4.1.7. Conception mécanique de l'AUV	16
4.2. Implémentation logicielle : simulation du système	20
4.2.1. Moteur physique	21
4.2.2. AUV	23
4.2.2.1. Filtre de Kalman	23
4.2.2.2. Commande de l'AUV	24
4.2.2.3. Trajectoire verticale "yoyo"	27
4.2.3. Drone aérien	29
4.2.3.1. Modélisation dynamique du drone	29
4.2.3.2. Commande par baskstepping	32
4.2.4. Transmission des données AUV vers drone	33
4.2.5. Dimensionnement du système	34
4.2.6. Affichage	35
5. Gestion de projet	36

6. Conclusion	39
Bibliographie	39
Appendices	43
Annexe A. État de l'art	45
A.1. Présentation du data muling	45
A.2. Simulation	45
A.3. Navigation autonome	46
A.3.1. Trajectoire "yoyo"	46
A.3.1.1. Présentation de la problématique	46
A.3.1.2. Approches de résolution	47
A.3.2. Recharge des batteries des AUV en mer	52
A.3.3. Techniques de localisation en intérieur	58
A.4. Transport des données	60
A.4.1. Rendez-vous entre deux AUV	60
A.4.1.1. Introduction	60
A.4.1.2. Taxonomy	60
A.4.1.3. The rendezvous problem	62
A.4.1.4. Conclusion	64
A.4.2. Authentification et communication entre deux robots	65
A.4.3. Transfert des données entre AUVs	66
A.4.3.1. Le Li-Fi	66
A.4.3.2. Encodage des données : Manchester	68
A.4.3.3. Les types de communications visuelles	68
A.4.4. Transfert des données de l'AUV vers le drone	69
A.5. Interception des données	70
A.5.1. Discrétion et brouillage	70
A.5.1.1. Contexte d'application du brouillage	70
A.5.1.2. Présentation des solutions alternatives	71
A.5.1.3. Brouillage électronique	72
A.5.1.4. Systèmes d'attaque et de protection	73
A.5.1.5. Conclusion sur l'utilisation du brouillage dans notre application du data-muling	74
A.5.2. Chiffrement des données	75
A.5.2.1. Introduction	75
A.5.2.2. Chiffrement symétrique	75
A.5.2.3. Chiffrement asymétrique	75
A.5.2.4. Scénario	76
A.5.2.5. Première étape :	76
A.5.2.6. Deuxième étape :	76
A.5.2.7. Troisième étape :	76
A.5.2.8. Justification du scénario :	76

A.5.3. Destruction des données	77
A.5.3.1. Fonctionnement d'un disque dur	77
A.5.3.2. La destruction des données par réécriture ou overwriting	77
A.5.3.3. Le degaussing	78
A.5.3.4. La destruction physique du disque	78
A.5.3.5. Peut-on récupérer des données effacées ?	78
Annexe B. Cahier des charges	79
B.1. Introduction	79
B.1.1. Contexte du projet	79
B.1.2. Pré-existant	79
B.2. Description technique des besoins client	79
B.2.1. Objectifs du projet	80
B.2.2. Description du/des produit(s) attendu(s)	80
B.2.3. Description du/des service(s) attendu(s)	81
B.2.4. Description liée aux métiers concernés	81
B.2.5. Contexte d'utilisation	81
B.2.6. Description des données (liées au projet)	82
B.2.7. Conditions de mises en œuvre et de déploiement	82
B.2.8. Exigences techniques et fonctionnelles	82
B.2.8.1. Contraintes	82
B.2.8.2. Exigences non fonctionnelles du/des produits	83
B.2.8.3. Exigences fonctionnelles du/des produits	83
B.3. Exigences portant sur la conduite du projet	83
B.3.1. Durée du projet	83
B.3.2. Critères d'acceptation finale du produit	83
B.3.3. Structuration du projet, reporting clients	83
B.3.4. Contraintes de coûts, délais, ressources	84
B.3.5. Gestion des configurations	84
B.4. Exécution du contrat	84
B.4.1. Prestations prévues	84
B.4.2. Livrables	84

Table des figures

4.1. Architecture du robot dans la configuration point-à-point	9
4.2. Première architecture, LED et récepteur sur la face avant	10
4.3. Seconde architecture, LED et récepteur sur les côtés du sonar	11
4.4. Schéma de l'architecture fonctionnelle du système	12
4.5. Schéma du système LED et photo-récepteur	13
4.6. Courant en sortie du photo-récepteur en fonction de la distance d'émission	13
4.7. Illustration du Manchester Encoding pour la transmission de données	14
4.8. Distribution de la température, de la salinité, et de la densité en fonction de la profondeur	15
4.9. Représentation globale de l'AUV	17
4.10. Coupe droite de l'AUV pour l'intérieur	18
4.11. Coque principale de l'AUV	19
4.12. Coupe longitudinale de l'AUV	19
4.13. Principe de fonctionnement de la simulation du système	20
4.14. <i>ROS node graph</i> actuel de la simulation globale	21
4.15. Modèle schématique de l'AUV avec le propulseur (vert) et les ailerons (rouge)	24
4.16. Ballast immergé	27
4.17. controle de la profondeur	28
4.18. Schéma d'un quadrirotor	29
4.19. Dynamique du quadrotor représentée par une chaîne causale qui relie 5 blocs (a), (b),(c), (d), (e)	32
5.1. Interdépendances entre les différentes tâches du projet	36
A.1. Drone sous-marin de Naval Group et Shark Robotics	45
A.2. Illustration yoyo	46
A.3. Exemple d'utilisation d'un ballaste	47
A.4. Exemple d'utilisation de propulseurs verticaux	47
A.5. Contrôle PD de la profondeur	48
A.6. Contrôle par logique floue de la profondeur	48
A.7. réponse du contrôleur PD et à logique floue	49
A.8. Modèle dynamique d'un AUV	50
A.9. Structure de l'observateur d'état étendu	50
A.10.réponse au contrôleur ADRC traditionnel, amélioré et PID	51
A.11.(a) variation du poids en fonction du temps dans les ballasts, (b) angle de tangage en fonction du temps, (c) vitesse de tangage en fonction du temps et (d) profondeur en fonction du temps dans une boucle fermée.	52
A.12.Principe de fonctionnement d'une batterie	53
A.13.Principe de l'effet seebeck	55

A.14.Principe de l'osmose	56
A.15.Exemple de turbine	57
A.16.Exemple de centrale osmotique	57
A.17.Effet photo-voltaïque	58
A.18.Comparaison des caractéristiques sonars	66
A.19.Comparaison des caractéristiques des technologiques sans fil dans l'air	66
A.20.Comparaison LED et laser	67
A.21.Les systèmes de communication par lumière existants	67
A.22.Architecture fonctionnelle Li-Fi	68
A.23.Asservissement visuelle en configuration point-à-point MIT	69
A.24.Moyen de transmission en milieu marin	70
A.25.Schéma d'un disque dur	77

1. Introduction

Le projet Muling 2021 s'inscrit dans une problématique de transmission de données de façon discrète. En effet, transmettre une grande quantité de données via les canaux classiques (internet, radio, etc.) encourt des risques d'interceptions. Pour pallier à ce risque, l'usage de drones intelligents autonomes a été envisagé. Ces "mules" ont pour mission de transmettre une certaine quantité de données d'un point A à un point B, tout en évitant d'être interceptés et en détruisant les données le cas échéant.

La transmission de données sensibles est une problématique à laquelle font régulièrement face les puissances géopolitiques ou militaires. Nous pouvons par exemple imaginer une transmission d'instructions de fabrication d'équipement militaire entre la France (Bordeaux) et les États-Unis (New York) qui ne voudrait pas être interceptée par des ennemis. Dans ce contexte, nous pouvons donc supposer que de telles puissances voudraient utiliser des solutions innovantes pour répondre à ces problèmes. Nous pouvons également supposer que les budgets disponibles pour le développement de ces solutions seraient conséquents. En 2019, le budget pour l'armement en France est de 50 milliards d'euros par exemple, celui des États-Unis est de 731 milliards de dollars.

L'idée d'utiliser des drones autonomes plutôt que des agents humains vient du fait que de tels agents peuvent être soumis à de la corruption ou des attaques physiques. À l'inverse des drones suivent un ordre de missions qui pourra être validé par plusieurs parties prenantes et ainsi garantir que la mission se passera de manière planifiée.

2. État de l'art

L'état de l'art (voir Annexe A) balaye l'ensemble des problématiques techniques soulevées par ce projet sur les aspects :

- **Matériel** : type de mule (AUV, drone aérien, drone terrestre), nombre de robots (unique ou flotte), infrastructures à disposition (stockage des robots, stations de recharge, etc.), capteurs et actionneurs utiles sur chaque mule, etc.
- **Sécurité et discrétion** : interception des données par l'ennemi, protection des données (cryptage, destruction), transport discret (sous l'eau sans remontée à la surface par exemple).
- **Navigation et communication** : lois de commandes (AUV, drone), trajectoire à réaliser, rendez-vous entre deux mules pour la transmission de données, moyens de communication (protocoles de communication sans fil dans les différents milieux traversés).

3. Cahier des charges

3.1. Objectifs

Pour répondre aux enjeux présentés précédemment, un système de drones pouvant transmettre une grande quantité d'information (plusieurs To), de façon discrète (quasi-indétectable par des équipements militaires) et de manière sécurisée (détection d'interception et destruction des données) est nécessaire.

Il s'agit d'ouvrir un canal de communication maritime permanent entre un point A et un point B le plus discret possible. S'il vient à être découvert par l'ennemi un jour, il sera démantelé.

Le projet Muling 2021 a pour objectif de développer un démonstrateur de faisabilité (preuve de concept), prouvant la pertinence de l'utilisation de drones pour la transmission de données sensibles. Pour cela, une estimation des ordres de grandeur pertinents sera réalisée (coût, débit, risques, etc.).

3.2. Exigences fonctionnelles

De ces objectifs découlent les exigences fonctionnelles suivantes :

- Le système doit permettre la transmission de données d'un point A à un point B séparés de plusieurs milliers de km et traversant différents milieux (terrestre, aérien, maritime).
- Le système doit permettre la transmission de données sans interception. En cas d'interception, les données ne doivent pas être lisibles par l'ennemi.
- Les données doivent être transportées par des mules intelligentes sans intervention humaine.
- Les mules doivent pouvoir se rejoindre pour échanger leurs données.
- Les mules doivent pouvoir transmettre leurs données sans être interceptées.
- Les mules doivent pouvoir naviguer dans l'environnement de façon autonome.
- Les mules doivent pouvoir gérer leur batterie de façon autonome.

3.3. Spécifications contextuelles

Suite à l'état de l'art (voir Annexe A) et au cahier des charges dressé de concert avec le client M. Luc JAULIN (voir Annexe B), les spécifications suivantes ont été fixées :

- La traversée se fait majoritairement en maritime. Les mules utilisées seront donc des AUV ;

- Une chaîne de transmission des données sera établie à l'aide de bases relais en mer. Chaque AUV utilisera la totalité de ses batteries pour rejoindre la prochaine base et transmettre les données. Il se rechargera ensuite sur place, au niveau de la base, pour être prêt à repartir ;
- Les AUV ressembleront à des torpilles de type Riptide ;
- Les AUV seront équipés de ballasts liées à un système d'échange thermique pour recharger leurs batteries en réalisant un mouvement de "yoyo", c'est-à-dire une succession de déplacements verticaux (montée/descente) dans une colonne d'eau (plus de détails en 4.1.6). Les AUVs sont également équipés de panneaux solaires pour une recharge beaucoup plus efficace mais moins discrète ;
- Les AUV seront équipés de projecteurs acoustiques et d'hydrophones omnidirectionnels pour se donner rendez-vous par communication acoustique ;
- Les AUV seront équipés de photoémetteurs et de photorécepteurs omnidirectionnels pour échanger les données entre eux par communication visuelle ;
- Un drone aérien sera utilisé en bout de chaîne pour récupérer les données et franchir des obstacles.

4. Réalisation

4.1. Conception du système

4.1.1. Choix techniques globaux

L'état de l'art sur les différentes problématiques soulevées par le projet *data muling* (voir Annexe A) a amené aux choix techniques suivants :

- Pour simplifier le problème, aucun sonar n'est utilisé sur les AUVs. Les problématiques de détection et d'évitement d'obstacles sont donc évincées, ainsi que le calcul de l'altitude de l'AUV. En effet, la traversée de l'Atlantique est considérée parfaitement connue et cartographiée. L'altitude est donc déduite à chaque instant grâce au capteur de pression donnant la profondeur d'immersion de l'AUV et l'altitude du fond marin à cet endroit donnée par la carte.
- Les AUV sont équipés de trois ailerons mobiles selon pour s'orienter (roulis, tangage, lacet) avec un propulseur arrière. Ils sont également équipés de ballasts et d'un système d'échange thermique convertissant l'énergie thermique en énergie électrique pour la recharge des batteries. Ce système est très peu efficace en termes de rendement mais il a le gros avantage d'être très discret. Au vu de sa pauvre efficacité, il a été couplé à un système de panneaux solaires, qui permettent une recharge beaucoup plus rapide mais une remontée à la surface obligatoire pour faire émerger les panneaux.
- Les AUV sont équipés des composants électroniques suivants :
 - Un DVL pour la vitesse de l'AUV ;
 - Une IMU pour les données proprioceptives ;
 - Des photo-émetteurs associés à des photo-récepteurs (tous omnidirectionnels) ;
 - Des projecteurs acoustiques associés à des hydrophones (tous omnidirectionnels) ;
 - Une antenne et un routeur Wi-Fi pour la transmission des données au drone aérien ;
 - Une antenne GNSS pour se repositionner lors de remontée à la surface ;
 - une carte de puissance pour gérer la tension appliquée au propulseur ;
 - Un microcontrôleur avec un espace mémoire pour les données ;
 - Deux batteries (une pour le propulseur, l'autre pour les composants électroniques cités ci-dessus).
- Les AUV se repèrent dans leur environnement grâce à un filtre de Kalman, ils se repèrent les uns par rapport aux autres grâce à des beeps sonores renseignant sur la distance les séparant, et ils se transmettent les données entre eux par communication lumineuse visible.

- Le drone aérien est pré-configuré pour se connecter automatiquement au réseau Wi-Fi créé par le dernier AUV de la chaîne en remontant à la surface. Dès que le dernier AUV fait surface et reste stationnaire, le drone aérien est asservi en position au-dessus de l'AUV lorsque ce dernier fait surface et reste stationnaire
- Les bases relais en mer sont des positions GNSS immergées à une profondeur constante autour desquelles les AUV en attente de réception de données montent et descendent verticalement pour se recharger thermiquement. On suppose que les AUVs remontent à la surface la nuit (pour des soucis de discrétion) pour se recalibrer sur ces positions GNSS à intervalles de temps réguliers (toutes les semaines par exemple) pour éviter les dérives de positionnement (dus aux courants marins et aux incertitudes). Ils peuvent également remonter à la surface pour se recharger par panneaux solaires si besoin est.

4.1.2. Fonctionnement général du système

Ce démonstrateur fonctionnera sur le principe suivant : une flotte de robots sous-marins (AUV ou Automated Underwater Vehicle) réalisera le transport de données du point A au point B en milieu maritime. Un ensemble de bases fixes ou points de relais seront disposés à intervalles réguliers en mer le long du parallèle reliant Bordeaux à New York où un AUV sera rechargé en permanence.

Une chaîne de transmission sera mise en place selon les règles suivantes :

- Chaque AUV est placé à son point de départ (un point de relais maritime pour chaque AUV). Le premier AUV reçoit les données à transmettre selon le moyen choisi (dépôt physique du disque dur, communication filaire ou sans fil).
- Lorsqu'un AUV réceptionne la totalité des données à transmettre, il se déplace en direction de la prochaine base. Il utilisera la totalité de sa batterie pour rejoindre cette base et envoyer les données au prochain AUV. Une communication acoustique (basée sur des beeps sonores) permettra à l'AUV émetteur d'ajuster sa trajectoire et d'estimer sa distance à l'AUV récepteur. Une communication visuelle (ondes électromagnétiques dans le domaine du visible) sera utilisée pour transférer la totalité des données de l'AUV émetteur à celui récepteur.
- L'AUV émetteur reste à la base ainsi atteinte pour recharger ses batteries. Pour cela, il utilisera les propriétés thermiques maritimes en réalisant des montées et descentes successives à l'aide de ses ballasts afin de convertir l'énergie thermique en énergie électrique. L'AUV émetteur devient récepteur à son tour et se prépare à partir en cas de transfert de nouvelles données dans le sens opposé.
- Un drone aérien s'occupera de réceptionner en bout de chaîne les données du dernier AUV pour les transporter au point d'arrivée terrestre. Il devra franchir au moins un obstacle tel qu'un mur. Le dernier AUV restera à la dernière base pour se recharger et attendre un nouveau transfert de données dans le sens opposé.

4.1.3. Problème du rendez-vous

Le problème du rendez-vous entre deux AUVs a été réduit à un problème 2D pour simplifier. L'AUV émetteur de données (AUV_1) et l'AUV receveur de données (AUV_2) sont considérés positionnés à la même altitude z . Pour se rejoindre, l' AUV_1 ne capte que les *beeps* sonores émis par l' AUV_2 afin d'évaluer la distance restante à parcourir pour se rejoindre.

Le noeud ROS associé au rendez-vous calcule la vitesse angulaire (lacet) w_i et la vitesse linéaire (avancement) v_i à appliquer à l' AUV_i pour qu'il rejoigne l' AUV_{i+1} . La méthode choisie garantit que la distance entre les deux AUVs peut être réduite à 0 pour un temps suffisamment long, mais ne garantit pas l'alignement des deux robots. Ce non-alignement n'est pas gênant car une émission lumineuse omnidirectionnelle est pratiquée pour transmettre les données.

En utilisant l'équation de l'intensité acoustique I

$$I = 191 - 20 * \log(D) * 0.001D$$

on peut calculer la distance pour une intensité donnée I , pour autant que l'on dispose de la valeur maximale d'intensité possible et du coefficient d'atténuation (ici fixé à 0,001).

L'équation suivante donne une approximation de la distance à considérer entre deux AUVs :

$$D = e^{W((191-I)/0.002)}$$

où W est la fonction de Lambert, utilisée pour calculer l'inverse d'un produit logarithmique, dont nous considérons la branche principale.

L'algorithme de rendez-vous utilisé [1] pour générer des points de cheminement considère un scénario de portée seulement, où rien d'autre que l'intensité des beeps entrants n'est disponible. Ceux-ci sont interprétés de manière analogue à la distance de l'AUV stationnaire, qui représente le lieu de rendez-vous.

Étant donné une distance p , extraite du signal sonore, et sa dérivée \dot{p} , possible à partir d'une unité de mémoire, nous pouvons calculer les vitesses linéaire et angulaire souhaitées suivantes

$$v_i = k_v \chi \{ \rho(t), \rho_v \},$$

$$\omega_i = \begin{cases} k_\omega \chi \{ \rho(t), \rho_\omega \} \omega_s / \rho(t), & \text{if } \dot{\rho}(t) < 0, \\ k_\omega \chi \{ \rho(t), \rho_\omega \} \omega_f / \rho(t), & \text{if } \dot{\rho}(t) \geq 0, \end{cases}$$

où k_s , k_f et k_w sont des coefficients de régulation et ρ_v , ρ_ω les vitesses souhaitées.

Les contraintes suivantes sont utilisées pour établir le contrôleur :

- $k_v \rho_v \leq v_{\max}$, $\rho_v = \rho_\omega$, and
- $k_\omega \omega_f \leq \omega_{\max}$, $\omega_f > \omega_s > 2k_v/k_\omega$

4.1.4. Transmission des données

4.1.4.1. Intégration du système de communication

La transmission de données est l'une des parties critiques dans le data muling. Cette étape est critique selon plusieurs aspects : tout d'abord, c'est à cet instant qu'il est le plus probable que nos systèmes se fassent détecter, que ce soit par le biais visuel (les deux AUVS sont proches et à l'arrêt) ou par interception de ces dites données. C'est pourquoi plusieurs critères doivent être pris en compte dans le choix de la technologie utilisée concernant l'aspect sécurité :

1. La vitesse de transfert des données doit être suffisamment importante pour que cette étape soit la plus rapide possible.
2. Le moyen de communication doit être suffisamment discret, de faible portée et difficile à détecter.
3. L'interception des données doit être impossible.

À ces caractéristiques, il faut ajouter les exigences techniques :

1. Le moyen de transmission doit pouvoir être embarqué dans un AUV.
2. La consommation d'énergie doit être raisonnable.
3. La portée de communication doit être suffisante pour faciliter le rendez-vous des AUV.

Afin de répondre à ces critères, **nous avons fait le choix de la communication par lumière visible immergé**. Cette communication répond à plusieurs critères :

1. La vitesse de transfert est importante, de l'ordre de 500 Mbits par secondes.
2. La portée est faible mais suffisante pour la communication entre deux robots, elle est inférieure à 2 mètres.
3. La communication est discrète et très difficile à intercepter.
4. Le système peut être embarqué et de consommation relativement faible de 10 mW à 10W.

La difficulté de cette technologie réside dans l'insertion de l'architecture de l'AUV. Cette architecture dépend notamment du type de communication lumineuse utilisé.

Une première architecture possible La première architecture de communication en lumière visible correspond à celle d'un faisceau laser pointant vers le photo-récepteur d'un autre AUV. Ce dernier, une fois le faisceau détecté après un balayage de la zone, serait asservi au faisceau. Ce modèle présente plusieurs avantages, comme une portée et une vitesse de transmission des données très importantes et surtout, une discrétion et une interception des données très compliquée. Le processus de communication sera le suivant :

1. Lorsque que les AUVs sont relativement proches et que l'AUV émetteur a été notifié du rendez-vous, celui-ci balaye la zone estimée de la position de l'AUV récepteur.
2. Une fois que l'AUV récepteur a détecté le faisceau sur son photo-récepteur, il s'asservit au faisceau.
3. (Phase optionnel) Dans le cas où l'asservissement sera compliqué, courant ou perturbations divers, des données inertielles pourraient être transmises au robot récepteur.
4. L'AUV émetteur signale à son binôme que la transmission est terminée.

Cette solution a déjà été mise en place plusieurs fois [2] néanmoins un certain nombre de problèmes en découlent. Le premier réside dans l'asservissement de l'AUV récepteur. Dans le cas d'AUVs en forme de missile, cette asservissement n'est pas aussi précis que dans le cas d'AUV avec plus de degrés de libertés.

Dans le cadre de cette architecture, nous avons placé le laser sur la face avant de l'AUV.

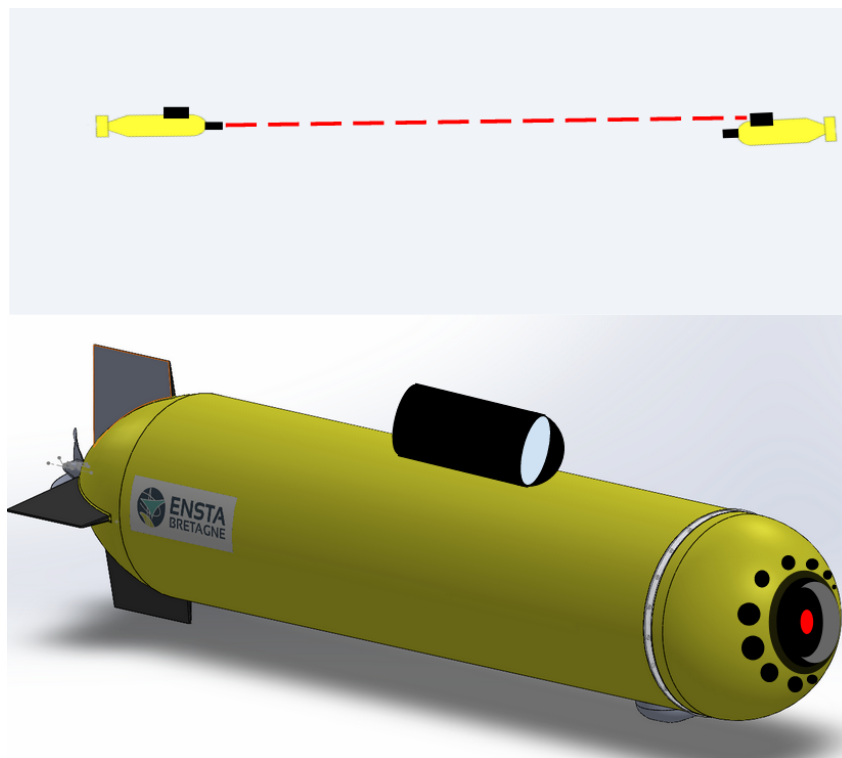


FIGURE 4.1. – Architecture du robot dans la configuration point-à-point

Les architectures retenues Nous avons retenu une seconde solution, ce qui semble être la solution la plus simple. Il s'agit d'utiliser une communication de type diffusion. Cette architecture utilise des LED hautes puissances afin d'obtenir un angle de diffusion important. De faible format, de faible consommation et de faible émission de chaleur, elles permettent d'éviter l'utilisation de faisceau mono-directionnel, très contraignant pour l'AUV. Afin d'utiliser cette architecture, cela nécessite un nombre important de LED afin que l'angle soit suffisamment grand et soit le moins possible absorbé par l'eau. La complexité de cette configuration réside dans l'architecture du véhicule. Pour cela, nous avons proposé plusieurs modèles d'architectures : Première architecture La première architecture correspond aux LEDs et photo-récepteur placé sur la face avant de l'AUV. Ce positionnement permet l'échange de donnée entre deux AUVS face à face. Du fait de l'angle d'émission important, les deux AUVs n'ont pas besoin d'un alignement précis Figure ??.

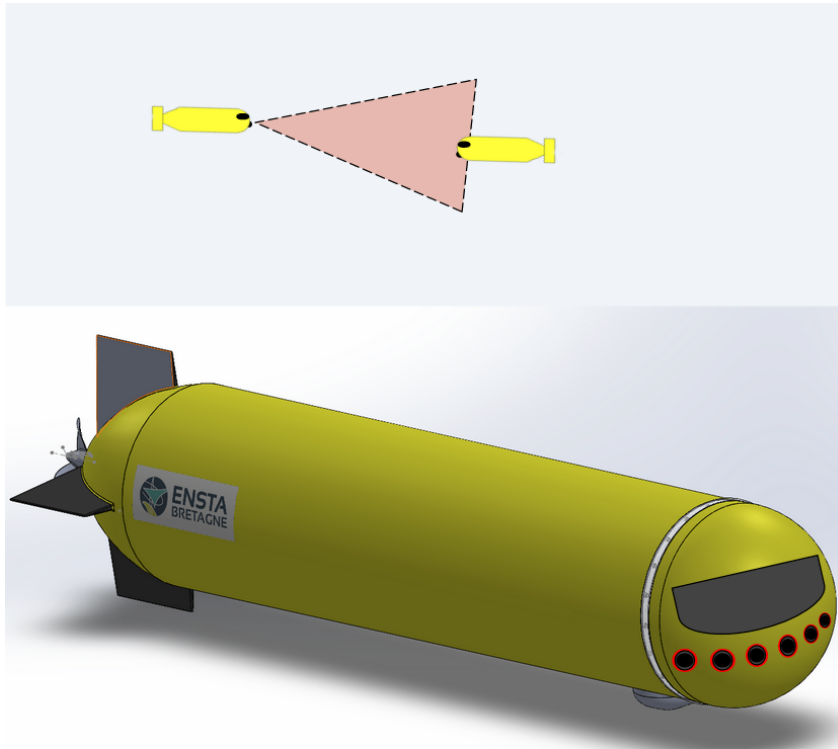


FIGURE 4.2. – Première architecture, LED et récepteur sur la face avant

La seconde architecture possible consiste à placer les LEDs et photo-récepteur sur les côtés de l'AUV. Cela permet d'obtenir une région d'émission plus importante. Les sonars peuvent également échanger des informations en mouvement. Cet aspect peut être intéressant pour limiter les risques d'interception Figure ??.

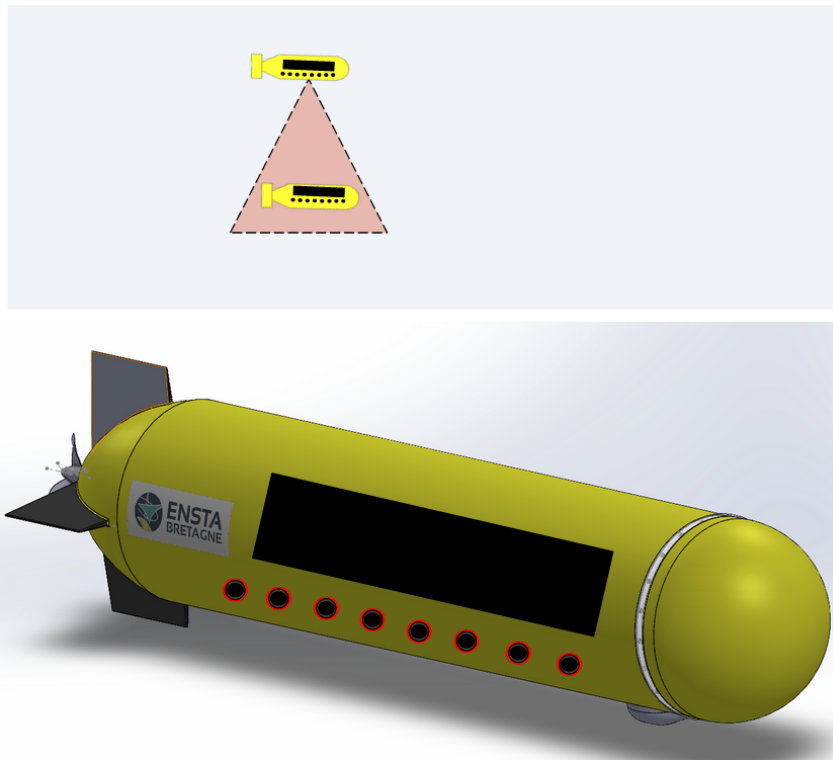


FIGURE 4.3. – Seconde architecture, LED et récepteur sur les côtés du sonar

Sur ces deux architectures, nous avons fait le choix de mettre plusieurs LEDs. Mais en pratique, seulement une ou deux LEDs suffisent. De plus, un espacement trop faible entre les LEDs peut entraîner une superposition des faisceaux et donc une erreur dans la transmission de données. Nous avons choisi dans le cadre de la simulation, la seconde architecture. Le fait de placer côte à côte les deux AUVs simplifie la commande.

4.1.5. Architecture fonctionnelle du système

L'architecture du système de communication visuel se présente comme ceci :

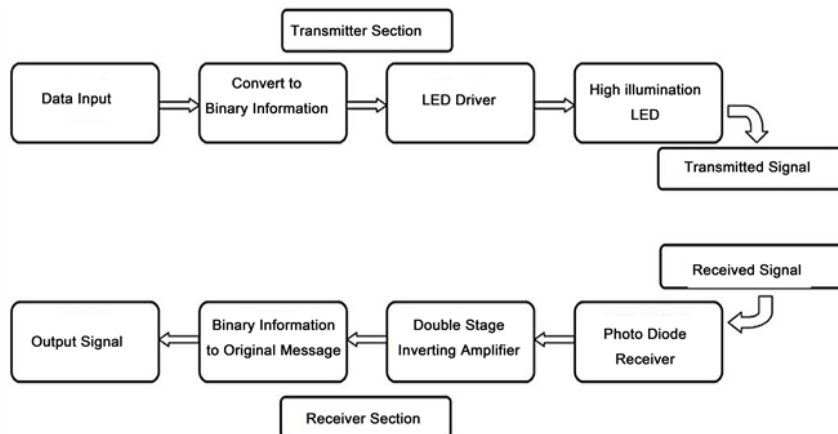


FIGURE 4.4. – Schéma de l'architecture fonctionnelle du système

Il s'agit alors de déterminer le matériel à utiliser pour chacun des blocs. Les blocs de conversion des données binaires en signal électrique (et inversement) seront mis en place sur une carte FPGA, très peu consommatrice d'énergie, très rapide et pouvant traiter une masse importante de données. Les data input/output correspondent à la communication entre l'ordinateur centrale et la carte FPGA, tandis que le LED driver est un simple envoi d'impulsions électriques de la FPGA vers la LED. Enfin, nous aurons besoin de mettre en place un système de traitement du signal robuste pour reconstituer le message binaire à partir des impulsions électriques du photo-récepteur. Il sera constitué d'un amplificateur opérationnel et d'un filtre bien choisi.

4.1.5.1. Caractéristiques de transmission des données

Dans ce projet, nous avons pris l'hypothèse de transmettre un gigabits d'un AUV à l'autre. Nous avons caractérisé cette échange afin d'estimer la distance minimal entre les AUV, le temps de transmission et la consommation d'énergie nécessaire.

4.1.5.2. Distance

Afin de déterminer une distance minimal entre les deux AUVs lors du transfert, nous avons pris l'exemple d'une LED haute puissance utilisée notamment dans cet article [3] avec les caractéristiques suivantes Figure ?? : $div = 60deg$, $PTX = 2W$, $c = 0.056m1$, $Rlens = 2.5cm$ et $S = 0.21A/W$. En traçant le lien entre la distance et la quantité d'ampère en sortie du photo-récepteur Figure ??, nous pouvons estimer la distance maximal entre les AUVs pour une bonne transmission de données inférieur à 2 mètres.

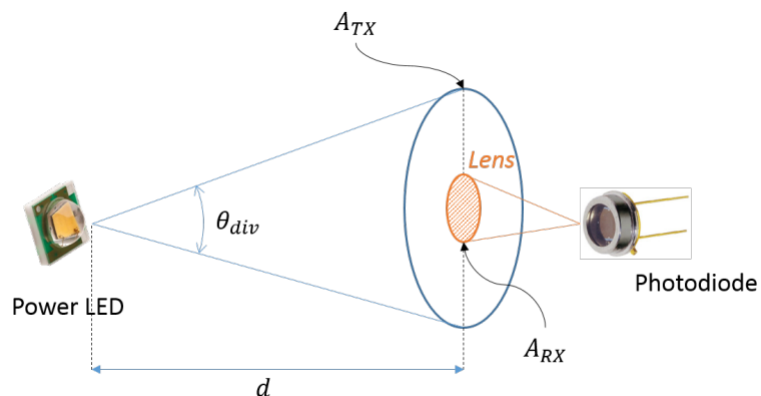


FIGURE 4.5. – Schéma du système LED et photo-récepteur

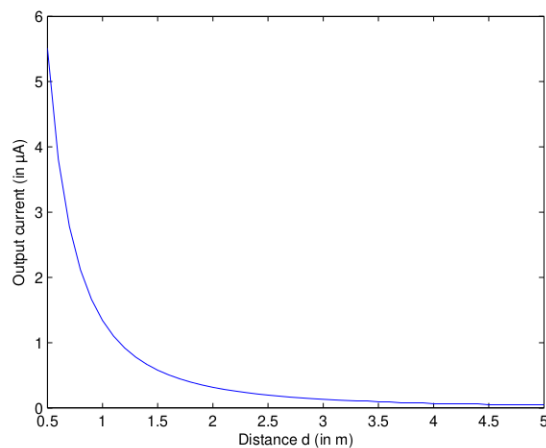


FIGURE 4.6. – Courant en sortie du photo-récepteur en fonction de la distance d'émission

4.1.5.3. Encodage des données

Nous partirons du principe que les données stockées sur l'AUV sont déjà cryptées et sauvegardées dans un fichier binaire. Pour transmettre des données d'un AUV vers un autre il faut pouvoir décrire un signal lumineux que le réceptionniste pourra interpréter. Ainsi les données binaires seront transmises au format Manchester Encoding.

Caractéristiques	Ordre de grandeur
Distance maximale (m)	2
Temps (seconde)	60
Consommation électrique (Wh)	120

TABLE 4.1. – Résumé des caractéristiques de la transmission de données optique pour un giga-octet de données.

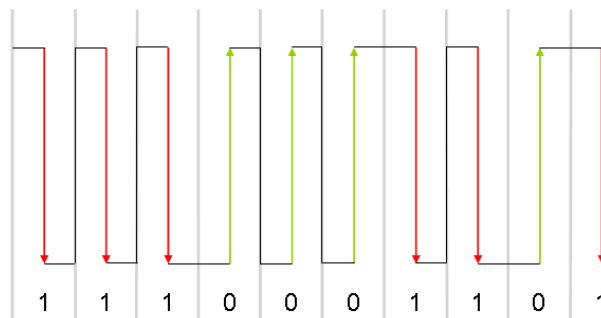


FIGURE 4.7. – Illustration du Manchester Encoding pour la transmission de données

C'est un mode de transmission synchrone, c'est à dire que les AUV auront besoin d'avoir la même horloge de synchronisation pour le décodage. On suppose que c'est le cas, quitte à transmettre l'horloge via les ondes acoustiques en début de transmission, avant de passer sur la transmission lumineuse. Chaque 0 est codé par un front montant (0->1) et chaque 1 est codé par un front descendant (1->0) donc chaque bit est en fait codé sur deux bits en Manchester Encoding. Ainsi, si notre système a un temps de réponse de 250Mbits/s, il pourra en réalité transmettre 125Mbits/s de données.

4.1.5.4. Temps d'émission

L'ordre de grandeur d'émission d'un système de communication optique LED à moins de 2m est de l'ordre de 250 Mbits/s pour pour un photo-récepteur suffisamment important, voir Figure ??.

Donc pour un giga-octet, le temps de transmission est de 16s. Il faut doubler ce temps car l'encodage Manchester double la quantité de données à transmettre. Auquel on ajoute un système de sécurité et de vérification de l'intégrité des données. Pour avoir un ordre de grandeur cohérent, nous pouvons fixer à 1 minute la transmission de données.

4.1.5.5. Consommation d'énergie lors de la transmission

La consommation moyenne des LEDs haute puissance étant inférieur au 20Wh, et celle d'un micro-processeur haute performance de 100Wh nous pouvons faire une estimation à 120 Wh lors de transmission de donnée. Au total la consommation est de l'ordre de deux Watt par minute.

4.1.6. Recharge des batteries

Dans cette section, il est question pour nous dimensionner les différents concept de recharge présenter à la section A.3.2 tout à tour nous allons étudier la possibilité de recharge par osmose, par effet Seebeck et enfin par Energie solaire.

— Recharge par Osmose :

En se basant sur l'expérience réalisée en Norvège [4] nous pouvons produire dans les meilleure des cas $2W/m^2$ de membrane semi perméable.

Or nous ne disposons que d'une surface $S = \pi r^2 = 0.212m^2$ dans le plan transversale pour un rayon de $D = 0.260$ m.

On pourrait penser à mettre la membrane séparatrice de façon horizontale : ceci nous permettra d'avoir une surface $S = l * L = 0.25m^2$ sur une longueur de 0.5 m.

soit une production de **0.5 J la seconde** dans le meilleur des cas.

Cette faible capacité de production n'est pas le seul problème. En effet le processus d'osmose demande la présence de deux réservoirs d'eau de salinité différente. Étant immergé dans l'eau il nous est difficile d'avoir des salinités différentes dans nos réservoir. La répartition de la salinité dans l'océan ou la mer n'est pas zonale comme c'est le cas de la température (figure 4.8) [5].

Si on avait une répartition de salinité très différente en fonction de la profondeur, on aurait pu remplir nos deux réservoirs d'eau à différente profondeur pour obtenir des salinités différentes. Malheureusement la répartition de la salinité n'est pas zonale.

Fort de tout ceci, nous n'allons pas utiliser ce mode de recharge.

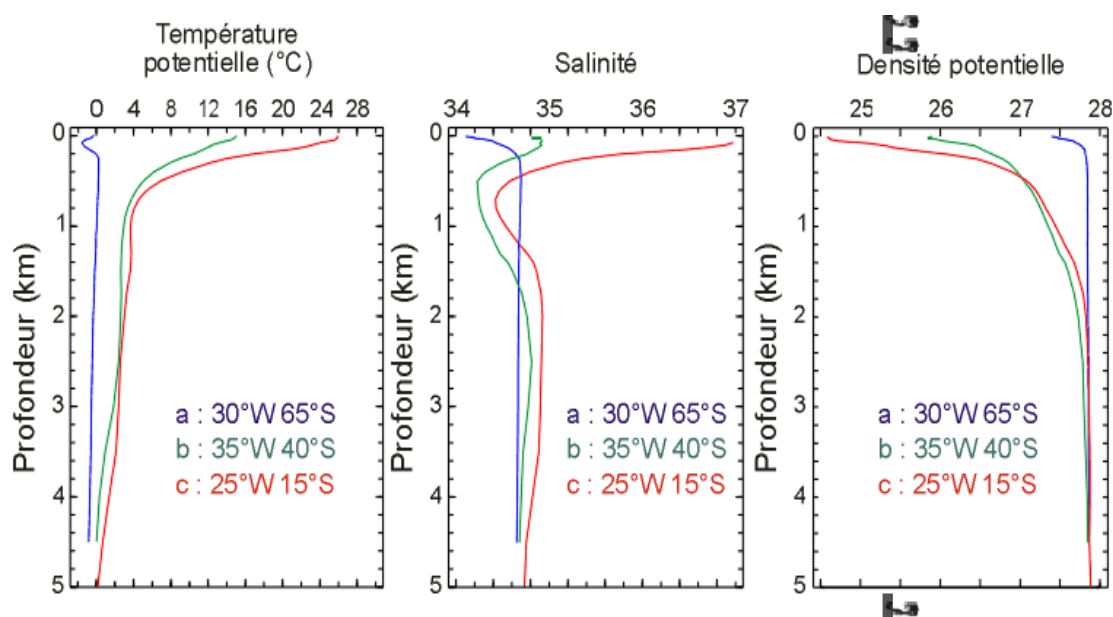


FIGURE 4.8. – Distribution de la température, de la salinité, et de la densité en fonction de la profondeur

— Recharge par effet Seebeck :

L'essentiel de la mission se passera en profondeur. L'effet Seebeck se produisant lorsqu'un

métal est soumis à deux sources de température différente, nous pouvons profiter de la thermocline où la température fortement pour reproduire l'effet Seebeck charger nos batterie.

Au vu de la figure 4.8 nous pouvons, par le phénomène de yoyo (annexe A.3.1) avoir une variation de température d'environ 5°C sur l'AUV. Par ailleurs pour des matériaux léger comme l'aluminium, nous avons un coefficient de Seebeck de 3.5 (tableau A.2). Ainsi de l'équation ((A.1)) de la partie A.3.2 nous donne une tension générer de $U = 17.5$ V. Soit une production d'environ **17.5 J par seconde** pour un courant maximale de charge de 1A.

Nous notons néanmoins des difficultés de réalisons de cette solution. En effet, bien que l'effet Seebeck génère plus d'énergie que l'osmose, nous devons garder tout au long de la charge des batteries les deux sources à leur même température (d'où le "yoyo"). Pour cette opération de l'énergie serra consommée. Ainsi l'énergie nette obtenue sera inférieure à 17.5 J par seconde.

— **Recharge par énergie solaire :**

La recharge par énergie solaire nécessite que l'AUV soit en surface. Sa mission se déroulant en profondeur, il lui faut une certaines énergie pour remonter. Cette énergie est celle nécessaire pour vider ses ballasts. Nous avons 50 litre de ballasts, donc il nous faut une énergie de :

$$W = V \times P \quad (4.1)$$

où V est le volume d'eau à extraire des ballasts ; P la pression moyenne à la profondeur à laquelle il se trouve.

Dans le cas le plus défavorable (ballasts pleins (50 L) et pression 3 bars (20m de profondeur)). il nous faut : $W = 50 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^5$. Soit 15 KJ pour remonter à la surface.

D'après [6] on peut produire entre 70 à 200W par m^2 de panneau solaire, ceci en fonction de l'ensoleillement. Nous avons installé environ $1m^2$ sur la partie émergée de l'AUV, ce qui représente une production de **70 J par seconde**.

- Il nous faudra donc 250s (environ 5 min) pour récupérer l'énergie dépensée pour la montée de l'AUV
- Pour charger une batterie de 10000 Ah à 24V (soit 240kJ) par exemple, on mettra un temps de charge de 4000s(1h10min)
- De plus cette solution est facile à implémenter car il ne faut pas d'énergie pour maintenir l'AUV à la surface de l'eau car il est flottant de base.

On conclue cette partie en portant notre choix sur la recharge par énergie solaire.

4.1.7. Conception mécanique de l'AUV

La conception mécanique met en évidence réalisation pratique de l'ensemble des exigences fonctionnelles et des choix de conception faits précédemment. De plus, dans cette partie nous justifierons les choix liés à la géométrie de l'assemblage.

Nous sommes partis dans l'esprit d'une conception type torpille pour faire le plus simple possible et limiter le Cx . De même, nous avons rajouté des ailerons à l'arrière pour permettre une stabilisation de l'AUV et le contrôle en direction de celui-ci.

L'ensemble des pièces à réaliser était donc le suivant :

- Coque de l'AUV
- Ballasts
- Propulseur
- Panneau solaire
- Sonars omnidirectionnels
- Capteurs :
 - DVL
 - Photorécepteurs
 - Photoémetteurs
 - Sonars omnidirectionnels

La conception est volontairement plus simple qu'un montage réel : il s'agit de prototyper les fonctionnalités et leur fournir une représentation visuelle. Ainsi, la propulsion est symbolisée par une hélice unique.

Nous avons au global le système suivant :

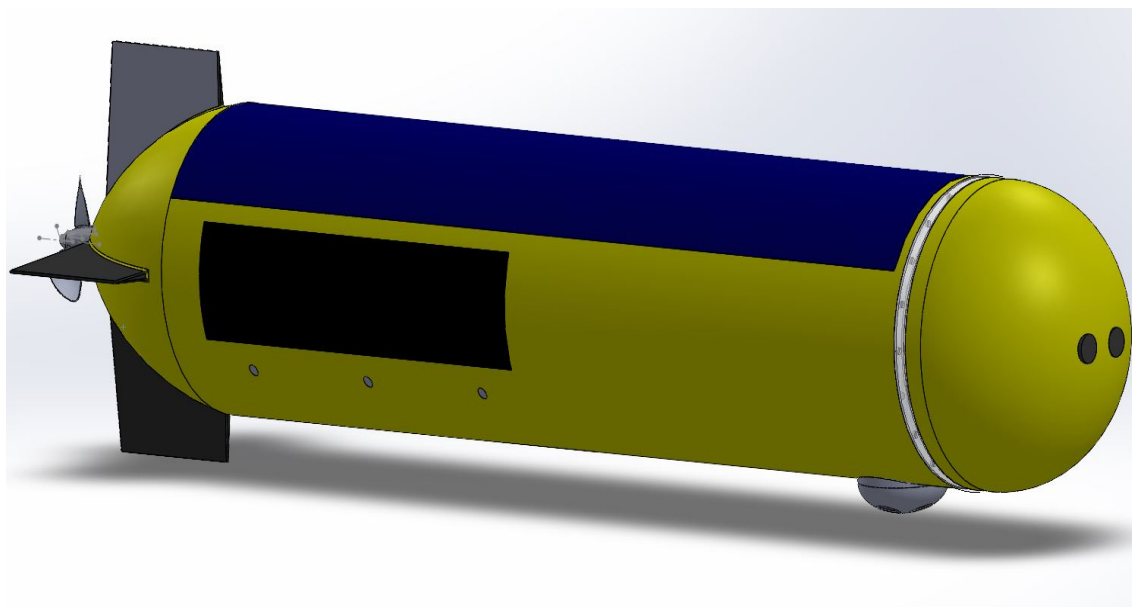


FIGURE 4.9. – Représentation globale de l'AUV

Sur les côtés nous pouvons voir en noir les photorécepteurs avec en dessous les photoémetteurs. Au dessus, le panneau solaire. A l'avant, sous l'AUV il y a le DVL. Il y a également un cerclage plastique pour mettre une bande lumineuse pour la récupération de l'AUV. Enfin, à l'avant, le bulbe en demi-sphère avec les deux transducteurs du sonar omnidirectionnel.

Il a également été fait le choix d'utiliser une épaisseur de coque de 5mm. Cette valeur reste critiquable mais nécessiterai une analyse plus poussée avec des outils que nous n'avons pas en robotique. On peut remarquer que l'ont pourrait augmenter cette valeur de manière à respecter le critère définit dans l'article "OCEANS 2006 - Effects of Hull Length on the Hydrodynamic

Loads on a Slender Underwater Vehicle during Manoeuvres", soit pour notre cas, environ 26mm d'épaisseur.

En termes de dimension, l'AUV fait 2735mm de long pour 530mm de diamètre extérieur au niveau de la coque. Le faible diamètre en comparaison de la longueur de l'AUV est justifiable comme étant un compromis entre C_x et volume total disponible, cependant une analyse plus fine du profil de l'AUV est nécessaire (par exemple par CFD - Computational Fluid Dynamics).

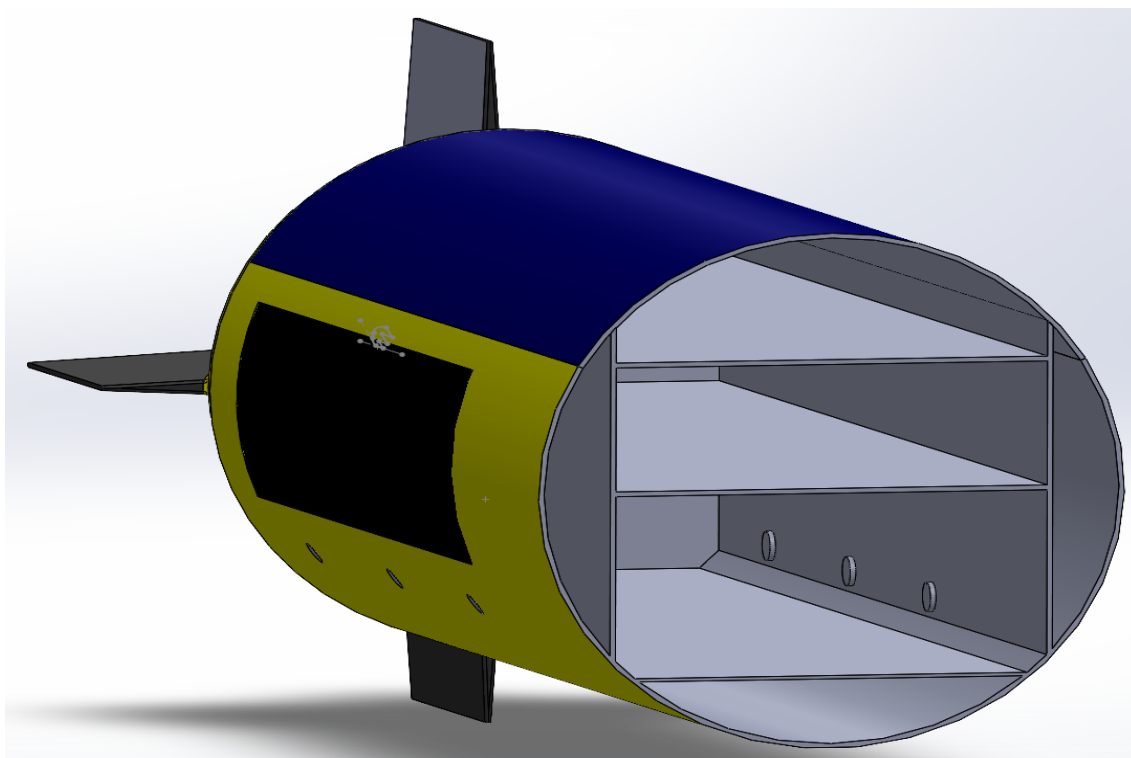


FIGURE 4.10. – Coupe droite de l'AUV pour l'intérieur

L'intérieur est composé de deux ballasts latéraux comprenant un volume total d'environ 53L et de trois étages servant à positionner l'électronique. Ils ont été conçus avec comme idée de positionner la batterie et le lest dans la partie inférieure, l'électronique de calcul et les chemins de câblage à l'étage milieu et l'électronique de communication à l'étage supérieur. Il y a donc une zone non-utilisée tout en bas de l'AUV, pouvant servir de cale contenant l'eau provenant des fuites.

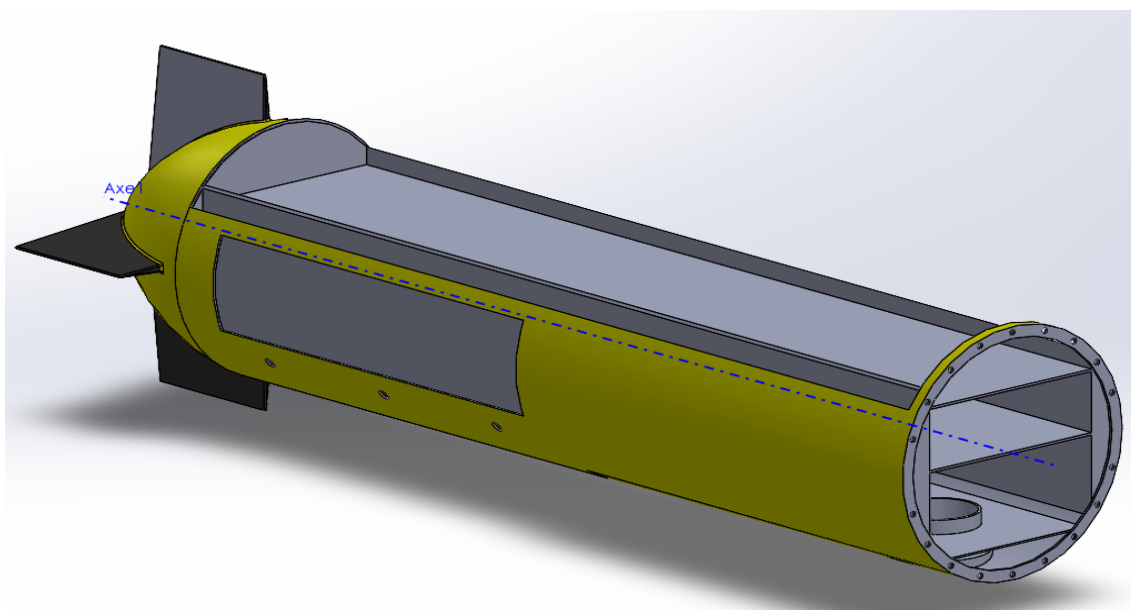


FIGURE 4.11. – Coque principale de l'AUV

La forme de la coque principale permet de monter et démonter l'intérieur de l'AUV par le dessus (en enlevant le panneau solaire). Un épaulement serait nécessaire à cette fonctionnalité et des languettes de tirage pour éviter d'abîmer le panneau également. Les étages ne sont actuellement pas amovibles, mais il est possible d'imaginer un système où ce soit le cas. Les photorécepteurs fonctionnent sur le même principe que le panneau solaire. En réalisation concrète, il faudra trouver un industriel capable de réaliser ces pièces critiques avec les contraintes d'étanchéité et d'exigence en milieu marin.

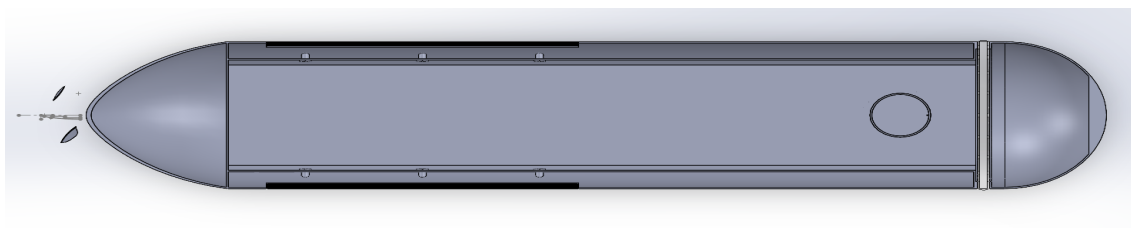


FIGURE 4.12. – Coupe longitudinale de l'AUV

Enfin, nous voici ici apparaître la coupe longitudinale de l'AUV. Dans une analyse plus poussée, il pourra être intéressant de changer la forme du bulbe pour réduire le C_x . Le compartiment moteur, à l'arrière n'est actuellement pas accessible mais il est possible dans une seconde phase de conception de le découpler du reste de l'AUV comme pour l'avant.

Ainsi, notre AUV possède l'avantage principal de n'avoir que peu d'éléments dépassants. De plus, la fermeture et l'ouverture de celui-ci est réalisée par le panneau solaire, ne faisant donc pas apparaître de visserie extérieure.

4.2. Implémentation logicielle : simulation du système

Le principe de fonctionnement de la simulation du système complet est le suivant :

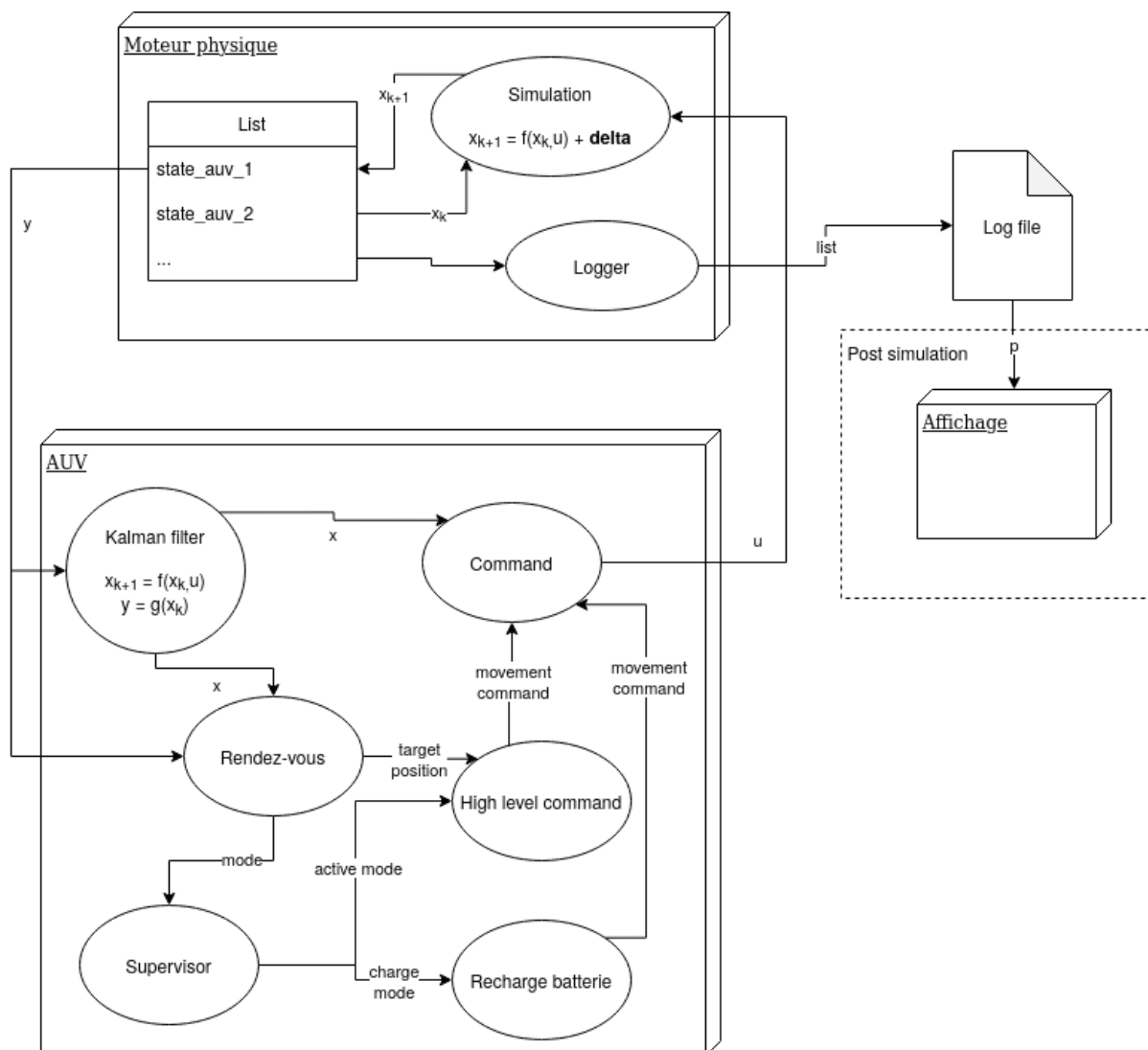


FIGURE 4.13. – Principe de fonctionnement de la simulation du système

Remarque Le fonctionnement de la simulation ainsi que les notations utilisées sont détaillés dans les parties qui suivent.

Le système est simulé sous ROS2. Plusieurs noeuds ont été créés pour les différentes tâches identifiées (voir 5). Le *ROS node graph* actuel prenant en compte 3 AUVs seulement et sans intégration du filtre de Kalman est le suivant :

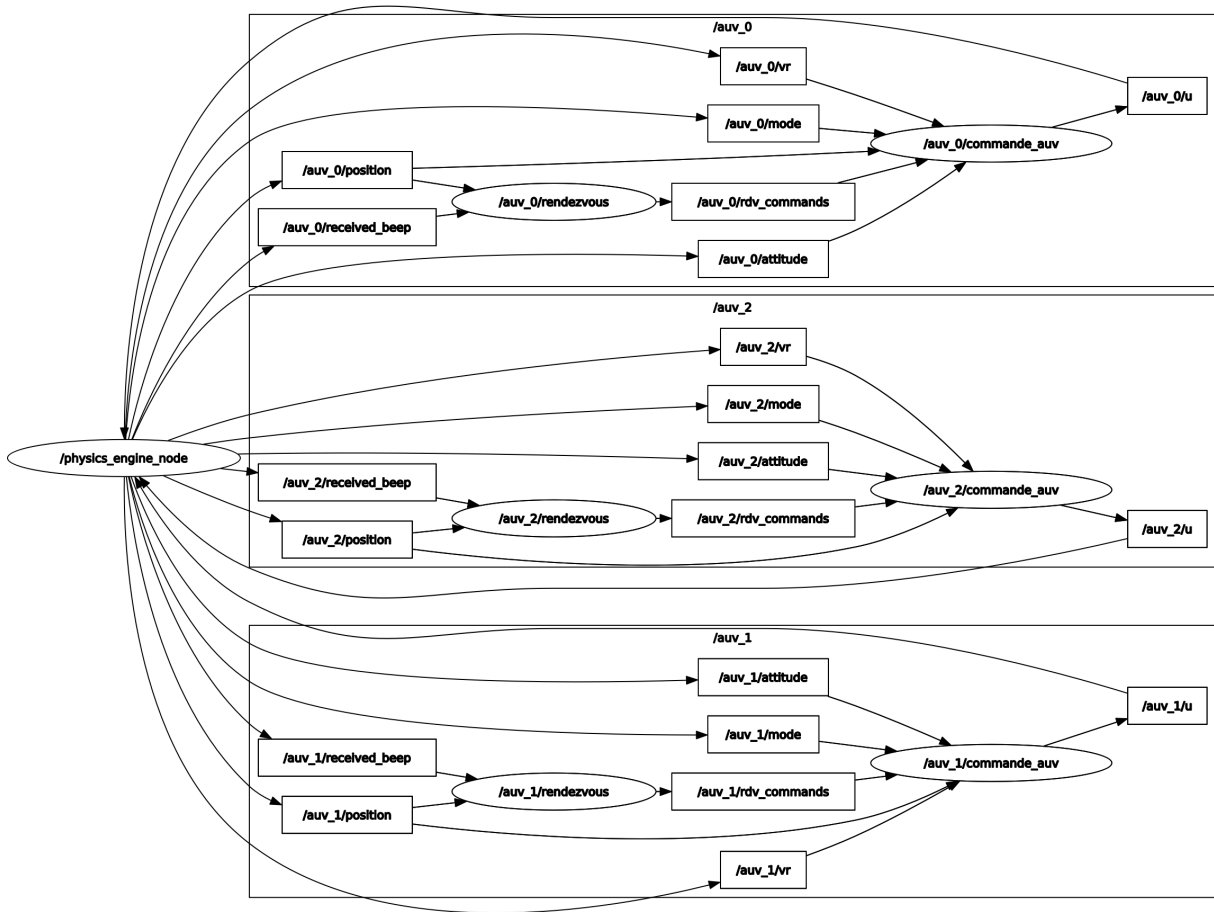


FIGURE 4.14. – ROS node graph actuel de la simulation globale

4.2.1. Moteur physique

Le moteur physique est la brique centrale de la simulation (voir Figure 4.19). Nous avons fait le choix de coder nous-mêmes notre moteur physique plutôt que d'utiliser un simulateur de type Gazebo, pour conserver la main sur un maximum de paramètres et s'affranchir de la complexité de ce genre d'outil.

Le moteur physique est donc en charge de simuler la position et l'état des robots tout au long de la mission. Pour cela, les équations d'évolutions des mules sont utilisées pour calculer à chaque pas de temps leur position future et y ajouter un bruit d'évolution. Ce bruit peut représenter par exemple les courants marins, un défaut d'alignement des actionneurs, des frottements fluides sur la coque des AUVs, etc.

On a :

- x le vecteur d'état de l'AUV ;
- f la fonction d'évolution de l'AUV ;

- u la commande à appliquer à l'AUV ;
- δ le bruit intrinsèque des actionneurs et de l'environnement.

De plus, on a $x \in \mathbb{R}^9$ tel que :

$$x = \begin{pmatrix} p \\ v_r \\ \varphi \\ \theta \\ \psi \end{pmatrix} \quad \text{où} \quad \begin{cases} p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \\ v_r = \begin{pmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{z}_r \end{pmatrix} \end{cases}$$

Où p est le vecteur position dans le repère monde, v_r est le vecteur vitesse dans le repère robot, et φ, θ, ψ sont les angles d'Euler exprimés dans le repère monde.

Le mouvement de chaque AUV est alors modélisé par l'équation d'évolution suivante :

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad x_{k+1} = f(x_k, u_k) + \delta_k$$

$$\text{où} \quad \begin{cases} u = \begin{pmatrix} u_a \\ u_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{ax} \\ u_{ay} \\ u_{az} \\ u_{wx} \\ u_{wy} \\ u_{wz} \end{pmatrix} \\ f(x, u) = \begin{pmatrix} R(\varphi, \theta, \psi) \cdot v_r \\ a_r - w_r \wedge v_r + u_a \\ \begin{pmatrix} 1 & \tan \theta \tan \varphi & \tan \theta \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} & \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} \end{pmatrix} \cdot w_r + u_w \end{pmatrix} \\ \delta = ? \end{cases}$$

Où a_r est le vecteur accélération dans le repère du robot, w_r est le vecteur vitesse angulaire dans le repère du robot, et R la matrice de passage du repère du robot vers le repère monde. u_a et u_w sont les vecteurs de commande en accélération et en vitesse angulaire dans le repère du robot.

De plus, le moteur physique simule les mesures les capteurs des mules, notamment, l'IMU, le capteur de pression, le DVL, les hydrophones, etc.

La variable y de chaque AUV contient donc :

- Le vecteur vitesse dans le repère du robot v_r donné par le DVL ;
- Le vecteur d'accélération dans le repère du robot a_r donné par l'IMU ;
- Le vecteur de vitesse angulaire dans le repère du robot w_r donné par l'IMU ;
- La profondeur d'immersion z dans le repère monde donnée par le capteur de pression ;
- La distance d entre l'AUV et une balise acoustique émettrice fixe placée sur le fond marin ;

- L'intensité lumineuse i_l reçue par les cellules photo-réceptrices ;
- L'intensité sonore i_s reçue par les hydrophones ;
- Une position GNSS lors de remontée de l'AUV à la surface ?

Toutes ces données sont intrinsèquement bruitées de part les défauts des capteurs, ce qui est simulé ici par un bruit Gaussien aléatoire dans le temps.

Les états des AUVs sont alors successivement mis à jour avec un pas de temps dt en fonction de la commande u reçue par le régulateur.

La position de chaque AUV est également écrite tous les dt dans un fichier de *log* pour obtenir un rendu visuel a posteriori.

4.2.2. AUV

Pour simuler l'AUV, ses capteurs, ses actionneurs et ses propriétés mécaniques, plusieurs briques communicantes sont nécessaires.

4.2.2.1. Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman permet de localiser l'AUV à l'estime (*dead reckoning*) en l'absence de GNSS. La correction de la position s'appuie sur des observations extéroceptives telles que la distance à des balises acoustiques fixes positionnées sur le fond marin, ou la vitesse d'avancement donnée par le DVL. Elle s'appuie aussi sur des observations proprioceptives telles que les données d'accélération et gyroscopiques de l'IMU pour se stabiliser en latitude par exemple.

Les entrées sont donc les données suivantes du vecteur d'observation y : v_r , a_r , w_r , d , ainsi que la commande u en accélération et en vitesse de rotation. Toutes ces données sont définies dans la partie 4.1.2.

La sortie est la position estimée \hat{x} dans le repère monde de l'AUV.

Pour estimer la position de l'AUV, l'équation d'évolution suivante est utilisée :

$$\dot{p}(t) = R(\varphi(t), \theta(t), \psi(t)) \cdot v_r(t)$$

$$\text{Où } R(\varphi, \theta, \psi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta) \cos(\psi) & -\cos(\varphi) \sin(\psi) + \sin(\varphi) \sin(\theta) \cos(\psi) & \sin(\varphi) \sin(\psi) + \cos(\varphi) \sin(\theta) \cos(\psi) \\ \cos(\theta) \sin(\psi) & \cos(\varphi) \cos(\psi) + \sin(\varphi) \sin(\theta) \sin(\psi) & -\sin(\varphi) \cos(\psi) + \cos(\varphi) \sin(\theta) \sin(\psi) \\ -\sin(\theta) & \sin(\varphi) \cos(\theta) & \cos(\varphi) \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

En la discrétisant, on obtient :

$$p_{k+1} = p_k + (dt \cdot R(k)) \cdot v_r(k) + \alpha_k$$

Où α_k est un bruit blanc de matrice de covariance :

$$\Gamma_\alpha = dt^2 \sigma_v^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

et $\sigma_v = 1ms^{-1}$. Les équations du filtre de Kalman sont les suivantes :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + u_k + \alpha_k \\ y_k = C_k x_k + \beta_k \end{cases}$$

- (i) $\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \cdot \tilde{y}_k$ (estimation corrigée)
- (ii) $\Gamma_{k|k} = \Gamma_{k|k-1} - K_k \cdot C_k \Gamma_{k|k-1}$ (covariance corrigée)
- (iii) $\tilde{y}_k = y_k - C_k \hat{x}_{k|k-1}$ (innovation)
- (iv) $S_k = C_k \Gamma_{k|k-1} C_k^T \Gamma_{\beta_k}$ (covariance de l'innovation)
- (v) $K_k = \Gamma_{k|k-1} C_k^T S_k^{-1}$ (gain de Kalman)

4.2.2.2. Commande de l'AUV

Équations cinématiques de mécanisation de l'AUV

Nous considérons que notre AUV est un robot de type torpille similaire au schéma présenté dans la figure ci-dessous.

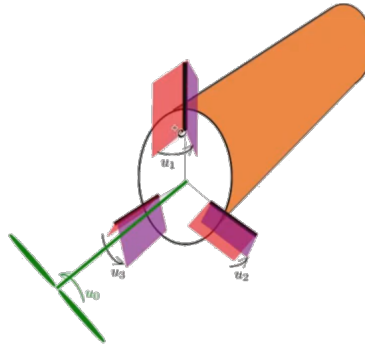


FIGURE 4.15. – Modèle schématique de l'AUV avec le propulseur (vert) et les ailerons (rouge)

Pour se déplacer, le robot utilise trois ailerons et un propulseur. En entrée du système nous considérons u_0 , la vitesse de rotation du propulseur, mais également u_1 , u_2 et u_3 , les angles des ailerons. Nous considérons que nous avons pas d'effet de glissement latéral. Cela signifie que le vecteur de vitesse v_r est toujours dans l'axe d'avancement du robot. Par conséquent, le robot n'a pas de vitesse latérale.

Nous avons considéré les équations cinématiques de mécanisation d'un corps solide, qui sont les équations d'état de notre AUV.

$$\begin{cases} \dot{p} &= R \cdot v_r \\ \dot{R} &= R \cdot (\omega_r \wedge) \\ \dot{v}_r &= a_r - \omega_r \wedge v_r \end{cases} \quad (4.2)$$

Nous avons R la matrice de rotation, ω_r le vecteur de rotation exprimé dans le repère du robot, a_r le vecteur d'accélération dans le repère du robot et p la position du robot dans le repère monde.

Modèle dynamique

Le premier objectif était de proposer un modèle dynamique du robot. Dans ce modèle, nous avons utilisé les hypothèses suivante :

- Pas d'effet de glissement latéral
- La forme du robot est cylindrique
- La flottabilité est neutre
- La masse ajoutée par l'eau est égale à la masse du robot

Notre problème était donc de trouver la relation entre a_r et ω_r avec les 4 entrées u_0, u_1, u_2 et u_3 .

Pour commencé nous avons exprimé les forces appliquées sur le robot.

Force de propulsion : $f_x = k_p \cdot u_0^2$

Force de traînée : $f_{drag} = -\frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S_x \cdot \rho_{water} \cdot v^2$

Ainsi que la masse : $m_{totale} = m_{robot} + k_a \cdot \rho_{water} \cdot V = 2 * m_{robot}$

Cela nous a permis d'appliquer le principe fondamental de la dynamique pour exprimer a_r .

$$\begin{aligned} a_r &= \frac{f_x}{2m} \\ &= \frac{k_p}{2m} \cdot u_0^2 - \frac{1}{4m} \cdot C_x \cdot S_x \cdot \rho_{water} \cdot v^2 \\ &= p_1 \cdot u_0^2 - p_2 \cdot v^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Pour estimer l'influence des ailerons, nous avons exprimé ω_r en fonction de l'orientation de ces derniers. La réflexion derrière cette expression est de prévoir comment le positionnement de ces ailerons agit sur l'attitude de l'AUV.

Nous avons alors déterminé l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \omega_r &= \begin{pmatrix} p_3 & 0 & 0 \\ 0 & p_4 & 0 \\ 0 & 0 & p_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & \sin(\frac{\pi}{3}) & -\sin(\frac{\pi}{3}) \\ 0 & \cos(\frac{2\pi}{3}) & -\cos(\frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \\ &= B(p_3, p_4) \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Étant donné que l'expression du vecteur de rotation dans le repère monde est le suivant :

$$w_{|R_0} = \begin{pmatrix} \cos(\theta)\cos(\phi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \cos(\theta)\sin(\phi) & \cos(\psi) & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \dot{\omega}_r \quad (4.5)$$

Et que nous avons la relation $w_{|R_0} = R \cdot w_r$

Au final, le modèle dynamique est le suivant :

$$\begin{cases} \dot{p} &= R \cdot (v \ 0 \ 0)^T \\ \dot{\omega}_r &= \begin{pmatrix} 1 & \tan(\theta)\sin(\phi) & \tan(\theta)\cos(\phi) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{pmatrix} \cdot v \cdot B(p_3, p_4) \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} \\ \dot{v} &= p_1 \cdot u_0^2 - p_2 \cdot v^2 \end{cases} \quad (4.6)$$

Contrôleur de base

Pour être en mesure de commander le modèle dynamique calculé nous avons réalisé une système en boucle fermée qui prend en entrée la consigne de rotation $\overline{\omega}_r$ et la consigne d'accélération \overline{a}_r .

Grâce au système d'équation précédent nous avons pu écrire :

$$u_0 = \sqrt{\frac{\overline{a}_r + p_2 \cdot v^2}{p_1}} \quad (4.7)$$

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{v} \cdot B^{-1}(p_3, p_4) \cdot \overline{\omega}_r \quad (4.8)$$

De cette façon nous avons pu mettre en évidence le lien entre les entrées du système et la consigne, ce qui nous a ensuite permis d'implémenter le contrôleur. Cependant nous avons ajouté deux contraintes supplémentaires : le roulis et le tangage doivent être nuls.

$$\text{De cette façon nous avons } \begin{pmatrix} 1 & \tan(\theta)\sin(\phi) & \tan(\theta)\cos(\phi) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{pmatrix} = I_3.$$

Contrôleur en charge du rendez-vous

Pour convenir d'un rendez-vous, il ne suffit pas de recevoir une consigne de rotation et d'accélération pour être en mesure de rejoindre un autre AUV. Étant donné que l'AUV récepteur des échos ne possède qu'une information sur la distance qui le sépare de celui qui les émet, il a fallu revoir le calcul de la commande.

En sortie de l'algorithme en charge du problème du rendez-vous, nous obtenons une consigne en vitesse \overline{v}_r et une consigne de vitesse de rotation du robot $\overline{\dot{\phi}}$. Par conséquent il a fallu ajouter une couche de calcul intermédiaire afin de déterminer $\overline{\omega}_r$ et \overline{a}_r .

Tout d'abord, nous avons fait en sorte de faire converger l'écart entre v et \bar{v}_r vers 1.

$$e_{\bar{v}_r} = 1.0 - \arctan(\bar{v}_r - v) * \frac{2}{\pi} \quad (4.9)$$

Puis nous avons conditionné \bar{a}_r pour qu'elle converge vers 0 et que la vitesse diminue progressivement au même rythme.

$$\bar{a}_r = k * (1 - e_{\bar{v}_r}) \quad (4.10)$$

Concernant, $\bar{\omega}_r$ nous avons récupéré la consigne de vitesse de rotation. Or d'après le modèle dynamique de l'AUV, la valeur de la vitesse de rotation du cap est égale au cap. Pour cette raison, nous avons multiplié $\bar{\omega}_r$ par un coefficient prenant en compte \bar{v}_r . Étant donné que cette valeur dépend de la distance à l'objectif, elle diminue quand le robot se rapproche de son objectif. Cela à pour effet de ralentir les manoeuvres du robot en fin de trajectoire.

Ainsi, nous n'avons qu'un seul calcul à prendre en compte pour déterminer $\bar{\omega}_r$:

$$\bar{\phi} = \arctan(\bar{v}_r) \cdot \bar{\phi} \cdot k_v \quad (4.11)$$

Remarque : Nous avons ajouté des coefficients k et k_v pour l'homogénéité.

4.2.2.3. Trajectoire verticale "yoyo"

Dans le cadre du projet muling au vu des différentes solutions existantes et de nos besoins dans le cadre de ce projet. Il serait mieux de faire recours à l'usage d'un ballast, car il est plus économique dans la mesure où on n'utilise pas beaucoup d'actionneurs et le contrôle peut se faire simplement par *sliding mode*.

En considérant que notre ballast a la forme d'un pavé, et en partant du de la représentation ci-dessous, on a :

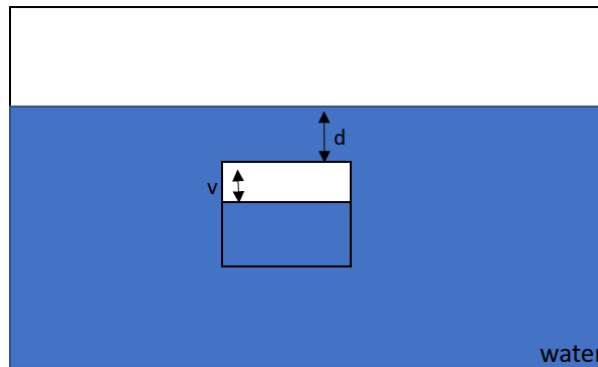


FIGURE 4.16. – Ballast immergé

avec d , la distance à la surface du ballast et v le volume d'air dans le ballast. De plus, on a aussi une variable b qui donne le sens de déplacement du ballast. en repartant de l'équation de flottabilité d'un corps décrit à travers l'équation(E1), on arrive à avoir l'expression de l'évolution du système ci-dessous.

$$\begin{cases} \dot{d} &= v \\ \dot{v} &= g - \frac{g \cdot \max(0, l + \min(d, 0)) + 0.5 \cdot v |v| C x}{(1 + \beta b)^l} \\ \dot{b} &= u \end{cases} \quad (4.12)$$

De cette expression on construit une surface dans le repère (d, v, b) qui va représenter notre erreur en profondeur, que l'on veut petit. Ainsi on a :

$$s(x, t) = (\ddot{y}_d - \ddot{y}) + 2(\dot{y}_d - \dot{y}) + (y_d - y) = 0$$

On observe que si $S > 0$, et qu'on veut l'abaisser il faut augmenter \ddot{y} , et pour cela on peut jouer sur la valeur de b que l'on retrouve au dénominateur de la deuxième équation du système (S) ci-dessus. Ce qui revient à avoir un $u = u_{max} = 1$ et avec un raisonnement analogue si $s < 0$, $u = -1$. On déduit donc la commande :

$$u = \text{sign}(s)$$

Dans le cadre du projet muling, le node `yoyo_control` a été implémenté afin de contrôler la profondeur et la figure ci-dessous illustre la convergence du système vers une consigne de profondeur à 5m.

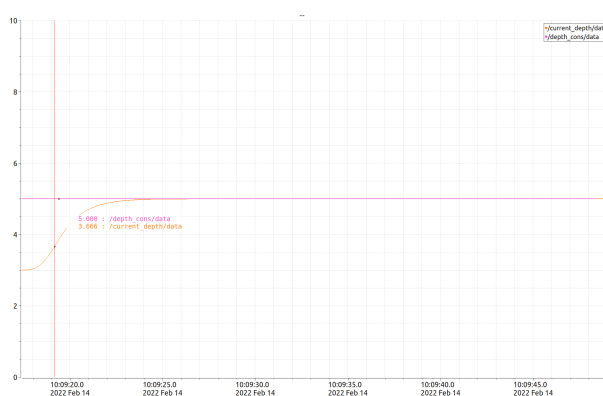


FIGURE 4.17. – contrôle de la profondeur

4.2.3. Drone aérien

4.2.3.1. Modélisation dynamique du drone



FIGURE 4.18. – Schéma d'un quadrirotor

Nous avons utilisé un quadrirotor qui est un drone aérien avec 4 rotors. Ce type de drone est particulièrement adapté aux vols stationnaires et à faibles vitesses (cf. ref. [7]). Le fonctionnement du quadrirotor est assez particulier. Tout d'abord, afin de compenser le couple de réaction, le sens de rotation des rotors est inversé deux à deux. De plus, les déplacements du véhicule ne se font qu'en manipulant minutieusement les vitesses de rotation des différents rotors. En effet, c'est la différence de portance qui détermine l'inclinaison de l'appareil autour des angles de roulis et de tangage, permettant alors le vol de translation. Le quadrirotor a 6 degrés de liberté, le vecteur d'état sera donc représenté par $X \in \mathbb{R}^{12}$ tel que :

$$X = \begin{pmatrix} p \\ \phi \\ \theta \\ \psi \\ v_r \\ w_r \end{pmatrix}$$

où p représente le vecteur position du quadrirotor, ϕ, θ, ψ représente les angles d'Euler, v_r , le vecteur vitesse linéaire du quadrirotor, et w_r , le vecteur vitesse de rotation du quadrirotor. Les référentiels introduits dans cette section sont les plus fréquemment utilisés en mécanique du vol, ils sont définis de la façon suivante (cf. ref. [7]) :

- \mathbf{I} : est un référentiel inertiel supposé galiléen. Il s'agit d'un repère orthonormé direct lié à un point O à la surface de la Terre. Au repère \mathbf{I} est associé la base $x^{\mathbf{I}}, y^{\mathbf{I}}, z^{\mathbf{I}}$ où, par convention, $x^{\mathbf{I}}$ pointe vers le Nord, $y^{\mathbf{I}}$ pointe vers l'Est et $z^{\mathbf{I}}$ pointe vers le centre de la Terre ;
- \mathbf{B} : est un référentiel mobile lié au corps du drone, dont l'origine G est le centre de gravité du véhicule. Au repère \mathbf{B} est associée la base orthonormée directe $x^{\mathbf{B}}, y^{\mathbf{B}}, z^{\mathbf{B}}$ où, par convention, $x^{\mathbf{B}}$ est l'axe de roulis et pointe vers l'avant du drone, $y^{\mathbf{B}}$ est l'axe de tangage et pointe vers la droite, et $z^{\mathbf{B}}$ est l'axe de lacet et pointe vers le bas.

La matrice de passage du référentiel \mathbf{B} vers le référentiel \mathbf{I} est R qui a été définie précédemment dans la section 4.2.2.1.

Les forces agissant sur le drone sont (cf. ref. [8]) :

- Le poids du quadrirotor : il est donné par $P = m \cdot g$, où : m est la masse totale et g la gravité.
- Les forces de poussée : qui sont des forces provoquées par la rotation des moteurs elles sont perpendiculaires sur le plan des hélices. Ces forces sont proportionnelles au carré de la vitesse de rotation des moteurs : $F_i = \beta \cdot \omega_i^2$, la force de poussée totale sera notée τ_0
- Les forces de traînée : la force de traînée est le couplage entre une force de pression et la force de frottement visqueux. Dans notre cas, on néglige les frottements. Ainsi la seule composante de la force de traînée est : $\tau_i = d \cdot \omega^2$ avec ($i = 1,2,3$)

En appliquant l'équation cinématique de la position, l'équation cinématique de l'orientation, le théorème fondamental de la mécanique et le théorème d'Euler, on obtient respectivement les équations du mouvement du drone :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{p} = R \cdot v_r \\ \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \tan\theta \sin\phi & \tan\theta \cos\phi \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \frac{\sin\phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{pmatrix} \cdot \omega_r \\ \dot{v}_r = R(\varphi, \theta, \psi)^T \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\tau_0 \end{pmatrix} - \omega_r \wedge v_r \\ \dot{\omega}_r = I^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} - \omega_r \wedge I \cdot \omega_r \end{array} \right. \quad (4.13)$$

Déterminons maintenant $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3$

La force de portance aussi appelée (*thrust* en anglais) appliquée au quadrirotor est la résultante des forces de poussée générée par les quatre rotors telle que : $\tau_0 = \sum_{i=0}^4 F_i$
Sachant que : $F_i (i=1, 2, 3, 4)$ est la force de sustentation de chaque rotor, tel que : $F_i = \beta \cdot \omega_i^2$

- β : la constante de portance dépendant des propriétés aérodynamiques des hélices, leur nombre et de la densité de l'air.
- ω_i : la vitesse de rotation du rotor (vitesse de l'hélice).

Ainsi la force de portance est donnée par l'expression suivante : $\tau_0 = \beta * (\omega_1 * |\omega_1| + \omega_2 * |\omega_2| + \omega_3 * |\omega_3| + \omega_4 * |\omega_4|)$
Il y a plusieurs moments agissants sur le quadrirotor, ces moments sont dus aux forces de poussée et de traînée et aux effets gyroscopiques.

Moments dus aux forces de poussée :

- La rotation autour de l'axe x : elle est due au moment créé par la différence entre les forces de portance des rotors 1 et 3, ce moment est donné par la relation suivante :

$$\tau_1 = -\beta \cdot l * \omega_1 * |\omega_1| + \beta \cdot l * \omega_3 * |\omega_3|$$

avec l est la longueur du bras entre le rotor et le centre de gravité du quadrirotor.

- La rotation autour de l'axe y : elle est due au moment créé par la différence entre les forces de portance des rotors 2 et 4, ce moment est donné par la relation suivante :

$$\tau_2 = -\beta \cdot l * \omega_2 * |\omega_2| + \beta \cdot l * \omega_4 * |\omega_4|$$

Moments dus aux forces de traînée :

La rotation autour de l'axe z : elle est due à un couple réactif provoqué par les couples de traînée dans chaque hélice, ce moment est donné par la relation suivante :

$$\tau_3 = -\delta * \omega_1 * |\omega_1| + \delta * \omega_2 * |\omega_2| - \delta * \omega_3 * |\omega_3| + \delta * \omega_4 * |\omega_4| , \text{ avec } \delta \text{ Coefficient de traînée.}$$

Dans notre hypothèse, nous négligeons, les frottements aérodynamiques.

Sous forme matricielle, on a :

$$\begin{pmatrix} \tau_0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta & \beta & \beta & \beta \\ \beta l & 0 & \beta l & 0 \\ 0 & -\beta l & 0 & \beta l \\ -\delta & \delta & \delta & -\delta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tau_0 \cdot |\tau_0| \\ \tau_1 \cdot |\tau_1| \\ \tau_2 \cdot |\tau_2| \\ \tau_3 \cdot |\tau_3| \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

4.2.3.2. Commande par backstepping

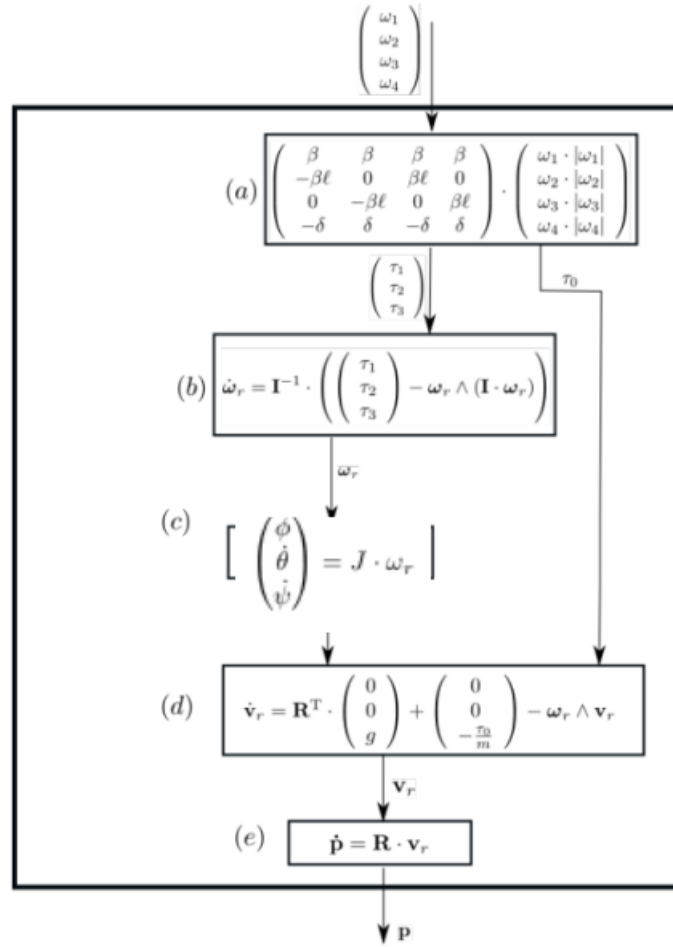


FIGURE 4.19. – Dynamique du quadrotor représentée par une chaîne causale qui relie 5 blocs (a), (b), (c), (d), (e)

La commande par Backstepping est une loi de commande pour les systèmes non linéaires basée sur le théorème de Lyapunov. Elle s'applique sur des systèmes de la forme cascade triangulaire. Chaque état du système commande l'état précédent et s'appelle « Commande Virtuelle », jusqu'au dernier état qui est commandé par la commande réelle. L'objectif de cette technique est de calculer en plusieurs étapes une loi de commande qui assure la stabilité globale du système (cf. ref. [9])

En inversant le bloc (a), on a :

$$\omega = \sqrt[a]{B^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \tau_0 \cdot |\tau_0| \\ \tau_1 \cdot |\tau_1| \\ \tau_2 \cdot |\tau_2| \\ \tau_3 \cdot |\tau_3| \end{pmatrix}} \quad \text{où } a \text{ fait référence à la racine algébrique}$$

De même en inversant les bloc (b) et (c) on obtient :

$$\begin{aligned}\tau_{123}^d &= \omega_r \wedge (I \cdot \omega_r) + K_w \cdot (\omega_r^d - \omega_r) \\ \omega_r &= K \cdot J^{-1} \left(\begin{pmatrix} \phi^d \\ \theta^d \\ \psi^d \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{pmatrix} \right)\end{aligned}$$

Afin de contrôler l'altitude du drone, nous utiliserons la loi de commande suivante :

$$\tau_0 = K * \tanh(z - z^d) + K_d \cdot Vr_z$$

Nous utiliserons θ^d afin de contrôler la vitesse du drone : on a : $\theta^d = K_v \cdot \tanh(vd - Vr_x)$

à partir d'un vecteur fd, ϕ^d nous permettra de contrôler le robot de telle manière qu'il suive ce vecteur.

$$\phi^d = K_p \cdot \tanh(\text{angle}(f^d) - \text{angle}(\dot{p}))$$

avec angle , la fonction $\arctan2$ et $\dot{p} = R \cdot v_r$

En résumé, avec ces lois, le drone est capable de suivre un champ vectoriel. Lorsque, la mission est enclenchée et que nous avons à notre disposition la position de rendez-vous avec l'AUV, on génère un champ vectoriel, adapté à l'environnement, permettant ainsi au drone d'éviter les obstacles et de se rendre au point de rendez-vous.

4.2.4. Transmission des données AUV vers drone

La problématique du rendez-vous se pose à nouveau pour la transmission des données du dernier AUV au drone aérien.

Afin d'assurer un bon transfert des données, l'AUV devrait remonter à la surface et le drone, asservi en position par rapport à l'AUV, se trouvera sur sa verticale à une altitude z de celui-ci. L'AUV devrait être équipé d'un système routeur wi-fi plus antenne directionnelle. Avec une telle antenne, on augmentera la sécurité car le signal ne sera propagé que dans une direction bien précise, en l'occurrence la verticale et le signal concentré sur une direction aura une bien meilleure portée.

On admet que le drone est pré-configuré pour se connecter directement au réseau wi-fi et l'AUV a partagé sa clé de connexion au drone pour l'utilisation du SSH. Pour effectuer le transfert, une suite de commande linux devront tourner en background :

- **watch** : La commande watch permet d'exécuter à intervalle régulière n'importe quelle commande passée en paramètre. Avec l'option -n nous indiquons une période de rafraîchissement en secondes.
- **scp** : Protocole de transfert de fichiers en réseau qui permet des transferts de fichiers faciles et sécurisés entre un hôte distant et un hôte local, ou deux sites distants. L'option -r permet de copier un répertoire.
- **rm** : Cette commande permet de supprimer un ou plusieurs fichiers d'un répertoire, ainsi que de supprimer des répertoires.

Appelons data.zip le fichier à transférer. On crée un exécutable send.sh contenant deux commandes, une de copie de du fichier data.zip vers le drone et l'autre pour la suppression de data.zip dans l'AUV après la copie.

- scp data.zip drone_username@drone_ip :XXX
Avec XXX le répertoire de copie du drone.
- rm -rf data.zip

Dans un terminal il suffit d'exécuter la commande : **watch -n time ./XXX1/send.sh** Avec **time** la période de rafraîchissement et **XXX1** le répertoire vers l'exécutable send.sh.

4.2.5. Dimensionnement du système

L'algorithme de dimensionnement du système prend en entrée les paramètres suivants :

- Distance de la mission en m.
- Nombre d'AUV.
- Vitesse des AUVs en $m.s^{-1}$.
- Longueur de l'AUV en m.
- Tension de la batterie en V.
- Encombrement de la batterie en dm^3 .
- Capacité des données en Go.
- Encombrement des données en dm^3 .
- Rendement du moteur entre 0 et 1.
- Encombrement du moteur en dm^3 .
- Débit recharge batterie en A.
- Débit transmission données en $Go.s^{-1}$.

Il renvoie :

- Durée de la mission en hh-mm-ss.
- Énergie consommée en MJ.
- Débit de données en $Go.s^{-1}$.
- Capacité des batteries en A.h.
- Coût de la mission en €.

Si dans l'AUV un tiers de l'espace est consacré à l'énergie et aux données (en m^3) :

$$volume_auv = \frac{3 * (encombrement_batterie + encombrement_donnee + encombrement_moteur)}{1000}$$

Aire du solide selon direction perpendiculaire à la vitesse en m^2 :

$$aire_projete_auv = \frac{volume_auv}{longueur_auv}$$

Grandeurs physiques utilisées :

- Masse volumique de l'eau en $kg.m^{-3}$: $\rho = 1000$
- Coefficient de traînée quadratique $C_x = 1$

Les équations utilisées sont :

- Force de frottement en N : $F_f = 0.5 \cdot \rho \cdot vitesse_auv^2 \cdot C_x \cdot aire_projetee_auv$
- Puissance de l'AUV en W : $P = F_f \cdot \frac{vitesse_auv}{rendement_moteur}$
- La distance à parcourir par un AUV en m : $distance_auv = \frac{distance_mission}{n_auv}$
- Le temps de trajet d'un AUV en s : $temps_auv = \frac{distance_auv}{vitesse_auv}$
- Le temps de la mission en s : $temps_mission = n_auv \cdot (temps_auv + \frac{capacite_donnee}{debit_transmission_donnee/60})$
- La capacité de la batterie en A.h : $capacite_batterie = \frac{temps_auv/3600 \cdot puissance_auv}{tension_batterie}$
- L'énergie consommée pour la mission en J : $energie_consommee_mission = temps_auv \cdot n_auv \cdot puissance_auv$
- Le débit de données de la mission en $Go.s^{-1}$: $debit_donnee_mission = \frac{capacite_donnee}{temps_mission}$

Les relations pour calculer les coût sont encore à définir :

- $cout_donnee = \frac{k_donnee \cdot capacite_donnee}{encombrement_donnee}$
- $cout_batterie = \frac{k_batterie \cdot capacite_batterie}{encombrement_batterie}$
- $cout_moteur = \frac{k_moteur \cdot rendement_moteur}{encombrement_moteur}$
- $cout_auv = cout_batterie + cout_donnee + cout_moteur$
- $cout_auv_mission = cout_auv \cdot n_auv$

Parmi les améliorations possibles, il conviendrait d'ajouter :

- La consommation de la transmission de données
- Les coûts

4.2.6. Affichage

L'affichage graphique des éléments en simulation consiste à lire le fichier de *log* généré par le moteur physique en post simulation. Il contient l'ensemble des positions temporelles successives des AUV et du drone aérien calculées en simulation.

Le but est alors d'afficher l'environnement quasiment statique (mer, terre, balises acoustiques fixes sur le fond marin, stations de recharge en mer, obstacles, etc.), et de rejouer la trajectoire des éléments dynamiques (AUVs et drone).

Ce rendu graphique sera effectué sous RViz ou Gazebo. Il permettra notamment d'enregistrer la sortie visuelle de la simulation sous forme d'une vidéo avec un point de vue immersif.

5. Gestion de projet

Ce projet implique une vingtaine d'acteurs : un client (M. Luc JAULIN) et une équipe constituée des 17 élèves de la filière robotique de la promotion 2022. La taille de l'équipe nécessite une répartition claire des tâches et des subdivisions en sous-équipes. Pour cela, après avoir rédigé le cahier des charges de concert avec le client, les tâches suivantes ont été identifiées (voir Figure A.24). Les doubles-flèches montrent les interdépendances entre elles.

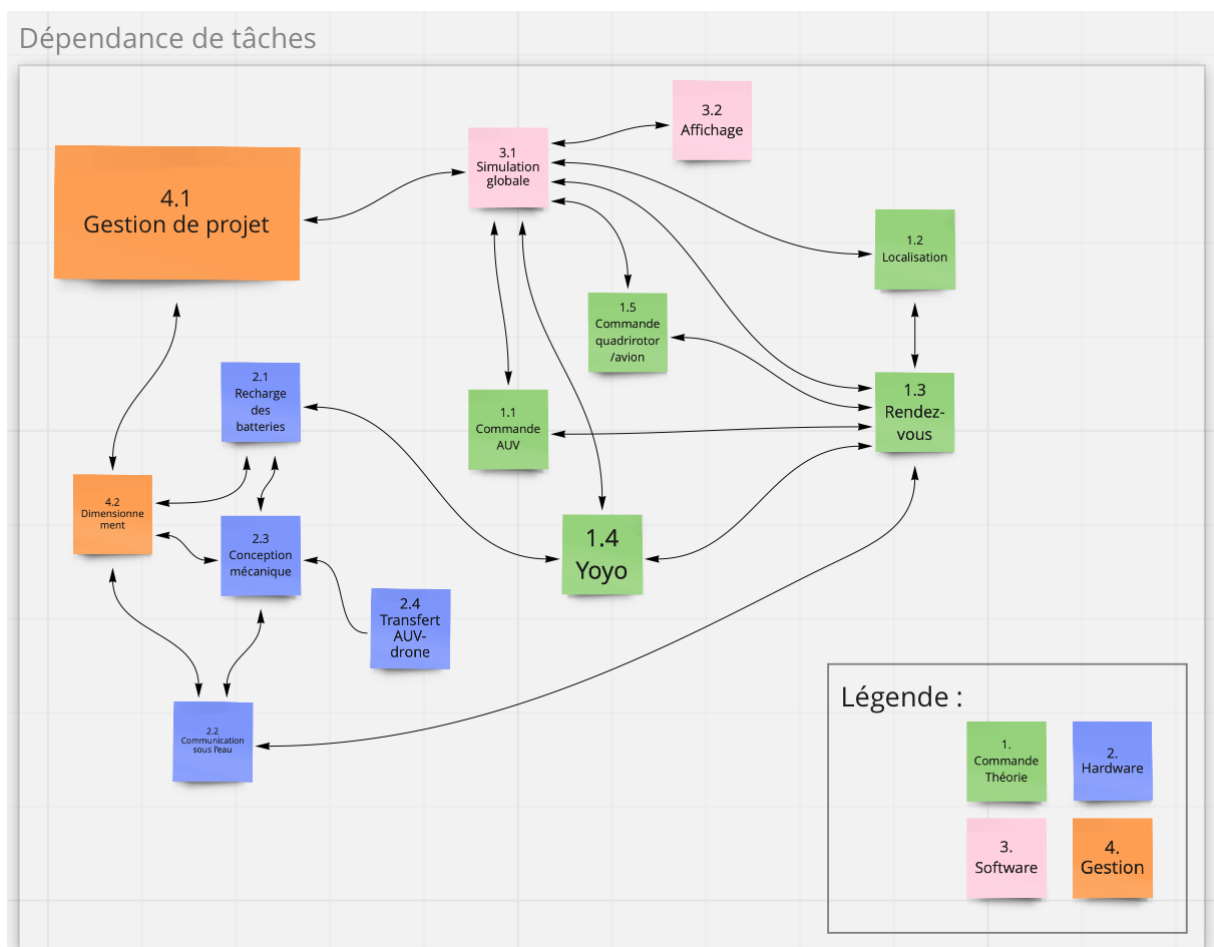


FIGURE 5.1. – Interdépendances entre les différentes tâches du projet

13 tâches ont été identifiées sur ce projet réparties en quatre catégories :

1. Commande des AUV

- 1.1. Établir et implémenter la loi de commande de l'AUV pour réguler en cap ou pour suivre une ligne ou un champ de vecteurs.

-
- 1.2. Localiser l'AUV à l'estime (*dead reckoning*) en l'absence de GNSS grâce à un EKF. La correction de la position s'appuie sur des observations extéroceptives telles que les beeps sonores émis par l'AUV récepteur, des images sonar, ou une position GNSS lors d'une remontée à la surface. Elle s'appuie aussi sur des observations proprioceptives telles que les données gyroscopiques de l'IMU pour se stabiliser en latitude par exemple.
 - 1.3. Se donner rendez-vous entre deux AUV pour échanger les données sensibles. L'un des AUV se rapproche de l'autre en suivant l'intensité sonore des beeps émis par l'autre.
 - 1.4. Réaliser le mouvement vertical sur place grâce aux ballasts de l'AUV.
 - 1.5. Établir et implémenter la loi de commande pour le drone aérien.
2. Matériel ou *Hardware*
 - 2.1. Étudier le principe de la recharge des batteries et le simuler (par exemple récupérer l'énergie des courants marins passant dans la turbine, utiliser des panneaux solaires lorsque l'AUV est en surface, utiliser un échange thermique intérieur/extérieur en s'appuyant sur le delta de température entre une partie calorifugée de l'AUV et une partie conductrice avec l'extérieur, etc.)
 - 2.2. Simuler la communication optique des données sous l'eau et la vérifier par une preuve de concept (par exemple utiliser la technologie Li-Fi avec une LED et une caméra ou un autre photorécepteur).
 - 2.3. Modéliser mécaniquement l'AUV (intérieur et extérieur) : la coque, les moteurs, les turbines, les ailerons, les ballasts, les capteurs (IMU, antenne GNSS, sonar, caméra), le microcontrôleur, etc.
 - 2.4. Étudier et simuler le transfert des données entre le dernier AUV de la chaîne et le drone aérien. Le drone peut par exemple attraper physiquement le colis à l'aide d'un scratch, ou récupérer les données via une communication sans fil directement ou par l'intermédiaire d'une balise stationnaire.
 3. Logiciel ou *Software*
 - 3.1. Simuler globalement le système et son environnement : gestion de la flotte d'AUV et du drone aérien (équations d'évolution réelles), modélisation du bruit sur la position réelle d'un AUV, modélisation des capteurs extéroceptifs, etc. Enregistrement de logs de données pour le débogage et l'affichage des éléments graphiques.
 - 3.2. Afficher les éléments graphiques en simulation sous RViz ou Gazebo à l'aide d'une liste de coordonnées pour les systèmes mobiles (AUV et drone), modéliser les milieux marin et terrestre, les bases de rechargement en mer et les obstacles. Ajout d'aides visuelles telles qu'une trackbar pour aller plus vite dans la simulation ou visionner un instant précis, ou des caméras pour observer des éléments voulus de plus près.
 4. Gestion humaine et technique
 - 4.1. Dimensionner le système : prendre en compte tous les paramètres du système (vitesse de l'AUV, coefficient de traînée, nombre d'AUV, etc.) pour estimer le coût financier de fonctionnement, le temps de transmission de données, l'énergie consommée, etc.

- 4.2. Gérer le projet : définir et répartir les tâches entre les membres de l'équipe, contrôler l'avancement des tâches, coordonner les membres impliqués sur des tâches interdépendantes, rédiger les documents nécessaires, etc.

Les tâches ont été réparties de cette façon entre les différents membres de l'équipe :

ID tâche	Nom tâche	Membre
1.1	Loi de commande d'AUV	Antonin Betaille
1.2	Localisation à l'estime de l'AUV	Katell Lagattu
1.3	Rendez-vous entre deux AUV	Bernardo Hummes
1.4	Yoyo : immersion et remontée à la surface de l'AUV	Yves Jordan Njamen Ngongang
1.5	Commande d'un drone aérien	Martin Gounabou
2.1	Recharge des batteries	Stéphane Ngnepiepaye Wembe
2.2	Communication optique sous l'eau	Maxime Legeay, Hugo Piquard
2.3	Conception mécanique de l'AUV	Florian Gaurier
2.4	Transfert des données AUV vers drone	Enzo-Loid Mohamed Essono Aubame
3.1	Simulation globale	Isaac-Andrei Witt, Thibault Jadoul
3.2	Affichage des éléments en simulation	Badr Moutalib, Baptiste Orhac
4.1	Gestion de projet (coordination technique et rédaction)	Samuel Prouten, Estelle Arricau
4.2	Dimensionnement du système	Hugo Sabatier

TABLE 5.1. – Répartition des tâches

Pour la gestion de ce projet, différents outils ont été utilisés :

- **Google Drive** pour le partage de documents ;
- **Trello** pour la répartition des tâches et le suivi de leur avancement ;
- **Miro** pour le brainstorming ;
- **Gitlab** pour le versionnage du code de simulation sous ROS ;
- **Overleaf** pour la rédaction de documents Latex partagés.

6. Conclusion

Même si la simulation globale n'est pas fonctionnelle car l'intégration des différentes parties n'est que partielle, chacune des parties l'est. Ces parties représentent une preuve d'un sous-concept de la simulation globale, elles démontrent une validation d'un choix technique réalisé suite à l'état de l'art et au cahier des charges.

Le système ainsi retenu est une chaîne de transmission discrète d'informations par voie maritime. Le transport de données est assuré par des AUVs régulièrement espacés avec un drone aérien en bout de chaîne.

Chaque AUV possède un double système de recharge (thermique et solaire), ce qui assure la fonctionnalité d'au moins l'un d'entre eux afin de ne pas briser la chaîne de transmission. L'un ou l'autre sera utilisé selon le besoin (efficacité donc rapidité de recharge avec le solaire, discrétion avec le thermique).

Le transfert de données entre les AUVs se fait par communication visuelle pour des questions de discrétion (faible portée du signal) et d'efficacité (meilleur débit que la communication acoustique).

Les AUVs sont également capables de se rejoindre grâce à une communication acoustique (bips sonores), ce qui assure leur autonomie de navigation ainsi que sa sûreté puisque l'algorithme utilisé garantit une convergence dans le temps.

La communication par Wi-Fi sera privilégiée en bout de chaîne pour rapatrier les données sur terre via un drone aérien pour des questions de rapidité de transfert. Le drone livrera ensuite les données en lieu sûr.

Le simulateur conçu prouve donc, tout de même dans sa globalité, la faisabilité d'une telle chaîne de transmission discrète d'informations sensibles à travers l'Atlantique. Le fonctionnement est simplifié et la mise en place des infrastructures n'est pas évaluée dans les coûts mais les plus gros défis techniques sont relevés.

Bibliographie

- [1] R. Zheng and D. Sun, “Multirobot rendezvous with bearing-only or range-only measurements,” vol. 1, no. 1, p. 4.
- [2] N. Parde, “Advancing undersea optical communications,” August 2018. <https://news.mit.edu> [Online; posted 17-August-2018].
- [3] C. H. Kang, A. Trichili, O. Alkhazragi, H. Zhang, R. C. Subedi, Y. Guo, S. Mitra, C. Shen, I. S. Roqan, T. K. Ng, M.-S. Alouini, and B. S. Ooi, “Ultraviolet-to-blue color-converting scintillating-fibers photoreceiver for 375-nm laser-based underwater wireless optical communication,” *Opt. Express*, vol. 27, pp. 30450–30461, Oct 2019.
- [4] “Énergie osmotique : définition, production d’électricité, chiffres,” 2012.
- [5] “Distribution des salinités.”
- [6] D. B. L. Sofia, “Cours Energie Solaire Photovoltaïque,” p. 62.
- [7] A. Drouot, “Stratégies de commande pour la navigation autonome d’un drone projectile miniature.”
- [8] M. K. Hicham, “Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires, application : Système uav de type quadrirotor.”
- [9] K. M. Samir, “Application des commandes non linéaires sur un drone à quatre hélices.”
- [10] M. J. A. Nizam, A. Shah, and A. A. K. Azha, “Vertical motion controller design of an underwater vehicle,” 2010.
- [11] T. Chen, W. Zhang, J. Zhou, H. Yu, X. Liu, and Y. Hao, “Depth control of auv using active disturbance rejection controller,” in *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, pp. 7948–7952, 2014.
- [12] Z. Zhang, B. Liu, and L. Wang, “Autonomous underwater vehicle depth control based on an improved active disturbance rejection controller,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 16, 2019.
- [13] B. K. Tiwari and R. Sharma, “Design and analysis of a variable buoyancy system for efficient hovering control of underwater vehicles with state feedback controller,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 4, 2020.
- [14] C. Lefrou, P. Fabry, and J.-C. Poignet, *Electrochimie : Concepts fondamentaux illustrés*. 2013. OCLC : 878135003.
- [15] “Les différents types de batteries.”
- [16] “Les différents types de batteries et leurs avantages – Urban Elec.”
- [17] “Effet Seebeck : Définition, Coefficient et Formule,” Aug. 2021.
- [18] O. M. Andrei Popleteev, Venet Osmani, “ Investigation of indoor localization with ambient FM radio stations,” 2012.

- [19] B. H. Flores, “Visual Robot Localization Using Floor Tiles,” 2021.
- [20] Y. L. Jingchao Yang, “A Survey of SLAM Research based on LiDAR Sensors,” 2019.
- [21] E. Kranakis, D. Krizanc, and S. Rajsbaum, “Mobile Agent Rendezvous : A Survey,” in *Structural Information and Communication Complexity* (P. Flocchini and L. Gąsieniec, eds.), vol. 4056 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 1–9, Springer Berlin Heidelberg.
- [22] A. Pelc, “Deterministic rendezvous in networks : A comprehensive survey,” vol. 59, no. 3, pp. 331–347.
- [23] P. Flocchini, G. Prencipe, and N. Santoro, eds., *Distributed Computing by Mobile Entities : Current Research in Moving and Computing*, vol. 11340 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer International Publishing.
- [24] S. Cicerone, G. Di Stefano, L. Gąsieniec, and A. Navarra, “Asynchronous Rendezvous with Different Maps,” in *Structural Information and Communication Complexity* (K. Censor-Hillel and M. Flammini, eds.), *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 154–169, Springer International Publishing.
- [25] J. Kshirsagar, S. Shue, and J. M. Conrad, “A Survey of Implementation of Multi-Robot Simultaneous Localization and Mapping,” in *SoutheastCon 2018*, pp. 1–7.
- [26] A. Farrugia, L. Gąsieniec, Kuszner, and E. Pacheco, “Deterministic rendezvous with different maps,” vol. 106, pp. 49–59.
- [27] A. M. A. Jeylani, B. Achuthan, B. Arunkumar, M. Boobalan, and R. L. Chiragsun, “Underwater visible light communication using lifi.” EasyChair Preprint no. 5080, EasyChair, 2021.
- [28] M. Jain, N. Sharma, A. Gupta, D. Rawal, and P. Garg, “Noma assisted underwater visible light communication system with full-duplex cooperative relaying,” *Vehicular Communications*, vol. 31, p. 100359, 2021.
- [29] H. M. Oubei, C. Li, K.-H. Park, T. K. Ng, M.-S. Alouini, and B. S. Ooi, “2.3 gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode,” *Opt. Express*, vol. 23, pp. 20743–20748, Aug 2015.
- [30] K. Shaaban, M. H. M. Shamim, and K. Abdur-Rouf, “Visible light communication for intelligent transportation systems : A review of the latest technologies,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 8, no. 4, pp. 483–492, 2021.
- [31] P. Tian, X. Liu, S. Yi, Y. Huang, S. Zhang, X. Zhou, L. Hu, L. Zheng, and R. Liu, “High-speed underwater optical wireless communication using a blue gan-based micro-led,” *Opt. Express*, vol. 25, pp. 1193–1201, Jan 2017.
- [32] G. Spagnolo, L. Cozzella, and F. Leccese, “Underwater optical wireless communications : Overview,” *Sensors*, vol. 20, p. 2261, 04 2020.
- [33] B. Price, “Can security cameras be jammed?,” Oct 2019.
- [34] Brandon, “Forcing a device to disconnect from wifi using a deauthentication attack,” Jun 2018.
- [35]
- [36] A. Mpitziopoulos, D. Gavalas, C. Konstantopoulos, and G. Pantziou, “A survey on jamming attacks and countermeasures in wsns,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 11, pp. 42–56, Fourth 2009.

- [37] S. Tripathy, R. K. Shyamasundar, and R. Ranjan, eds., *Information Systems Security - 17th International Conference, ICISS 2021, Patna, India, December 16-20, 2021, Proceedings*, vol. 13146 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 2021.
- [38] M. D. Bergren, E. A. Murphy, and M. D. Bergren, "Data destruction," *The Journal of School Nursing*, vol. 21, no. 4, pp. 243–246, 2005. PMID : 16048370.
- [39] G. Yan, M. Xue, and Z. Xu, "Disposal of waste computer hard disk drive : data destruction and resources recycling," *Waste Management & Research*, vol. 31, no. 6, pp. 559–567, 2013. PMID : 23524996.

Appendices

A. État de l'art

A.1. Présentation du data muling

Le *data muling* consiste à transporter de façon discrète une très grosse quantité d'informations (souvent sensibles) sur plusieurs centaines de kilomètres, voire milliers de kilomètres. Des mules sont alors utilisées pour transporter l'information d'un point A à un point B, et pour s'échanger les données à des points de rendez-vous.

Les drones militaires sont de telles mules et sont bien répandus dans l'armée de l'air. Certains drones sous-marins sont en développement (Naval Group) ou d'autres pour l'armée de terre (Shark Robotics). Les projets développés pour la défense et la sécurité, pour le data muling notamment, sont confidentiels, peu de données sont disponibles pour le large public.



FIGURE A.1. – Drone sous-marin de Naval Group et Shark Robotics

A.2. Simulation

Les besoins en AUV pour les missions sous-marines a massivement exploser avec l'apparition de systèmes intelligents avancés. Cependant, l'environnement sous-marin présente des défis quant au risque de perte de matériel, et nécessite des investissements énormes pour créer des environnements d'expérimentation réels. Cela a poussé l'industrie à développer des environnements de simulation virtuels d'haute-fidélité pour imiter les environnements sous-marins.

Ces environnements se caractérisent par des courants sous-marins qui varient en intensité et en direction, la poussée d'Archimède qui caractérise la flottabilité des objets ainsi qu'une visibilité restreinte. Quant aux AUV, ils utilisent une panoplie de capteurs et des mécanismes

de contrôle plus complexe que leurs semblables terrestres comme des propulseurs, des ailettes etc.

Pour simuler cet environnement, on aura besoin d'un moteur physique qui prendra en considération toutes ces caractéristiques et qui soit compatible avec les outils de *middleware* robotique comme ROS. Gazebo se présente comme un candidat idéal tant pour la simulation que pour l'affichage. Il utilise des moteurs physiques (ODE, Bullet, Simbody, DART) capable de simuler la dynamique d'objets rigides et souples et nous permet de créer des capteurs personnalisés. Un autre avantage est sa compatibilité avec ROS.

On peut prendre comme exemple UUV Simulator qui est un ensemble de paquets *open source* développés pour faciliter la simulation d'un environnement sous-marin en utilisant Gazebo. Il contient des modules pour les propulseurs, les ailettes ainsi que pour la simulation des courants marins.

A.3. Navigation autonome

A.3.1. Trajectoire "yoyo"

A.3.1.1. Présentation de la problématique

Dans cette section nous allons aborder le problème d'immersion et émergence en robotique sous-marine. Le terme yoyo est donc un terme qui a été choisi pour illustrer cette action.

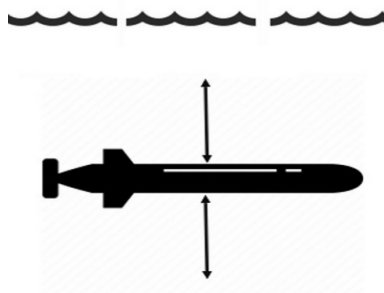


FIGURE A.2. – Illustration yoyo

Dans le cadre du projet data muling un scénario a été choisi, celui-ci met en jeu différents robots évoluant dans différents environnements. Alors une question se pose concernant la recharge des batteries dans les robots. Afin d'apporter une solution à ce problème sur les mules sous-marines (AUV), une solution envisageable consiste à exploiter la différence de température de l'eau à la surface et celle de l'eau à des profondeurs plus importantes.

On a donc un besoin de contrôler la profondeur à laquelle l'AUV se trouve. Ainsi, ce document va donc présenter différentes approches de résolution de cette problématique.

A.3.1.2. Approches de résolution

La question d'immersion et émergence d'un AUV se pose dès lors que l'on veut être précis dans les déplacements verticaux sous l'eau. Cette problématique peut se retrouver dans de nombreux domaines océanographiques, militaires et bien d'autres. Pour réaliser ce contrôle de profondeur, deux approches sont utilisées. La première illustrée par la figure A.3 consiste à modifier la densité volumique de l'AUV grâce à un ballast afin de jouer sur les forces qui lui sont appliquées pour monter ou descendre et l'autre illustrée par la figure A.4 consiste à utiliser les propulseurs présents sur l'AUV afin de créer une poussée pour monter ou descendre.

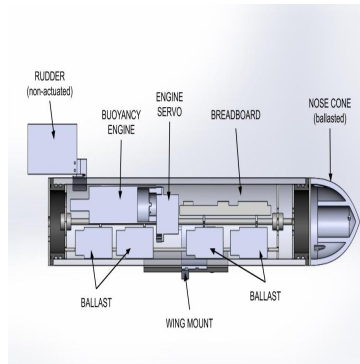


FIGURE A.3. – Exemple d'utilisation d'un ballaste

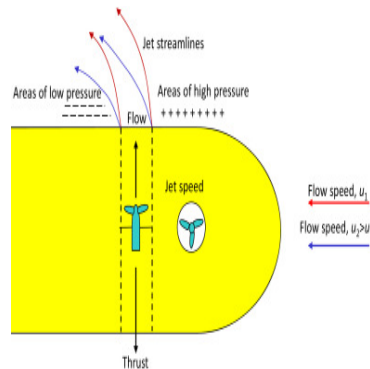


FIGURE A.4. – Exemple d'utilisation de propulseurs verticaux

Néanmoins, dans un cas où dans l'autre il est très important de pouvoir garantir une précision, une stabilité et un bon temps de réaction.

utilisation des actionneurs

Dans la pratique cette approche est la plus utilisée, en effet elle consiste à sur actionner un AUV en ajoutant des propulseurs afin de gagner en mobilité. Cependant, cette action complexifie le modèle d'état et rend difficile le contrôle de la profondeur. Afin de mieux comprendre les différentes solutions existantes, nous allons présenter des techniques de contrôle appliquer sur divers AUV. Ces diverses techniques ont pour principale objectif atteindre la profondeur de consigne avec le temps de réaction optimal.

Dans un premier temps le contrôleur utilisé est le contrôleur proportionnel dérivé PD, afin

de comprendre comment on peut l'implémenter l'article *vertical motion controller design of an underwater vehicle* [10] proposé par Ahmad Nizam, Khairul Azha et S.S. Abdullah confrontent les temps de réactivité entre un contrôleur PD et un contrôleur logique floue.

Modélisation de l'AUV Dans un premier temps les auteurs réalisent une modélisation de l'évolution dynamique de l'AUV sur lequel porte l'étude. Il s'agit d'un AUV de type torpille. Il arrive au modèle suivant :

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = B(v)u$$

Où, M est la matrice d'inertie qui contient
 C est la matrice des forces de coriolis et centripètes
 D est la matrice des amortissements hydrodynamiques
 g est le vecteur des forces de rappel
 B est la matrice de contrôle

contrôleur PD Le contrôleur de la profondeur de l'AUV peut être représenté en figure A.5. Après formalisation, la fonction de transfert du système est extraite en suite des coefficients Kp et Kd sont déterminés et en fin une simulation du système est faite sous Simulink.

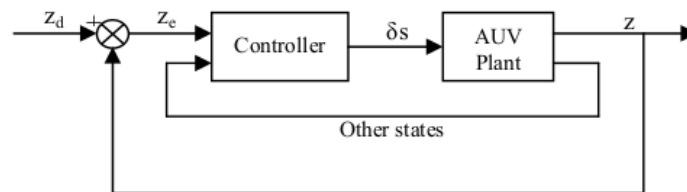


FIGURE A.5. – Contrôle PD de la profondeur

contrôleur logique floue La commande floue est le domaine dans lequel il existe le plus de réalisations effectives, en particulier dans l'industrie. Son but est de traiter des problèmes de commande de processus, le plus souvent à partir des connaissances des experts ou d'opérateurs qualifiés travaillant sur le processus. Dans le cadre du contrôle de la profondeur dans [10], les auteurs sont arrivés à la représentation suivante :

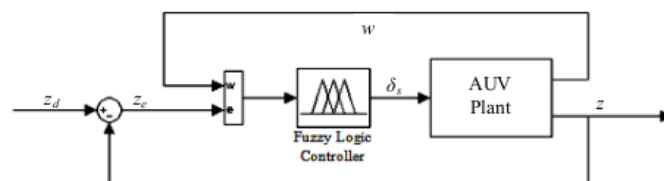


FIGURE A.6. – Contrôle par logique floue de la profondeur

Comparaison des contrôleurs Au terme de leur analyse après implémentation sous Simulink, ils arrivent à la conclusion que les deux contrôleurs produisent de bons résultats. Néanmoins le contrôleur à logique floue a un meilleur temps de réaction à raison d'un dixième de seconde comme l'illustre la figure ci-dessous.

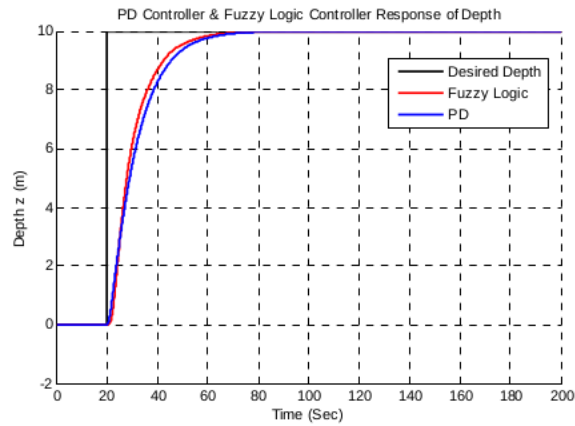


FIGURE A.7. – réponse du contrôleur PD et à logique floue

Contrôleur de rejet des perturbations actives Cette méthode est une évolution du contrôleur PID. En effet, il s'agit d'une méthode de contrôle robuste basée sur l'extension du modèle du système avec une variable d'état supplémentaire et fictive, représentant tout ce que l'utilisateur n'inclut pas dans la description mathématique du système. On retrouve de nombreuses applications de ce contrôleur avec pour principaux avantages : une forte capacité d'anti-interférence qui ne dépend pas complètement du modèle mathématique du système et une forte capacité d'adaptation. On retrouve plusieurs applications du contrôleur de rejet des perturbations actives dans le contrôle de la profondeur de l'AUV, notamment l'article [11] de CHEN Tao, zhang Wei, zhou Jiajia, yu Haomiao, liu xiaofu et hao yue ou l'article [12] de Zhengzheng Zhang, Bingyou Liu et Lichao Wang.

Une stratégie de contrôle optimale basée sur une stratégie de contrôle optimale basée sur une technologie de contrôle améliorée de rejet des perturbations actives est proposée pour améliorer la précision du suivi de la trajectoire des véhicules sous-marins autonomes dans des conditions bathymétriques réelles. des véhicules sous-marins autonomes dans des opérations bathymétriques réelles et de résister aux perturbations externes et internes. Premièrement, le mouvement en profondeur et les modèles mathématiques d'un véhicule sous-marin autonome et d'une hélice sont établis, respectivement. Si nous prenons l'exemple développé en [11], les auteurs arrivent à l'équation de la dynamique du robot est celui représentée de la figure A.10

$$\begin{cases} m \cdot [(\dot{u} - vr + wq) - x_G \cdot (q^2 + r^2) + y_G \cdot (pq - \dot{r}) + z_G \cdot (pr + \dot{q})] = X \\ m \cdot [(\dot{v} - wp + ur) - y_G \cdot (r^2 + p^2) + z_G \cdot (qr - \dot{p}) + x_G \cdot (qp + \dot{r})] = Y \\ m \cdot [(\dot{w} - uq + vp) - z_G \cdot (q^2 + p^2) + y_G \cdot (rp + \dot{p}) + x_G \cdot (rp - \dot{q})] = Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m \cdot [y_G \cdot (\dot{w} + pv - qu) - z_G \cdot (\dot{v} + ru - pw)] = K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m \cdot [z_G \cdot (\dot{u} + wp - vr) - x_G \cdot (\dot{w} + pv - uq)] = M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m \cdot [x_G \cdot (\dot{v} + ur - pw) - y_G \cdot (\dot{u} + qw - vr)] = N \end{cases}$$

FIGURE A.8. – Modèle dynamique d'un AUV

où, x_G , y_G et z_G sont les coordonnées du barycentre de l'AUV, I_x , I_y et I_z les moments d'inertie de la masse m ; u , v , w , p , q et r sont les vitesses angulaires des 6 degrés de liberté. X , Y , Z , K , M , et N sont les couples des six degrés de liberté, et sont liés à la gravité, à la flottabilité, à la poussée de l'hélice, à la force du gouvernail, à la puissance du fluide et aux perturbations de l'environnement, respectivement.

Ensuite, le taux de contrôle de l'observateur d'état étendu et le retour d'erreur non linéaire du contrôle actif traditionnel de rejet des perturbations sont établis. Ensuite, le taux de contrôle de l'observateur d'état étendu et le retour d'erreur non linéaire du contrôle traditionnel de rejet des perturbations actives sont améliorés en utilisant une nouvelle fonction non linéaire tel que illustré par la figure ci-dessous.

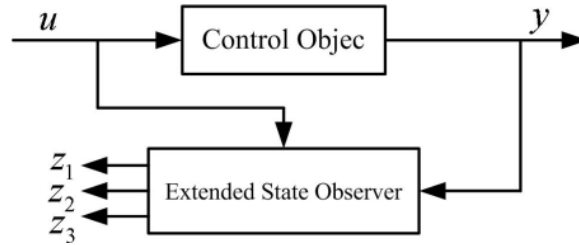


FIGURE A.9. – Structure de l'observateur d'état étendu

La non-linéarité, l'incertitude du modèle et les perturbations externes du système de contrôle de la profondeur du véhicule sous-marin autonome sont étendus à un nouvel état, qui est réalisé par un observateur d'état étendu.

Le nouvel état, qui est réalisé par un observateur d'état étendu amélioré. Troisièmement, la rétroaction non linéaire améliorée de l'erreur d'état est utilisée pour supprimer les erreurs résiduelles et fournir un contrôle de haute qualité pour le système.

Ainsi on dans [12] ils arrivent à aux résultats suivant.

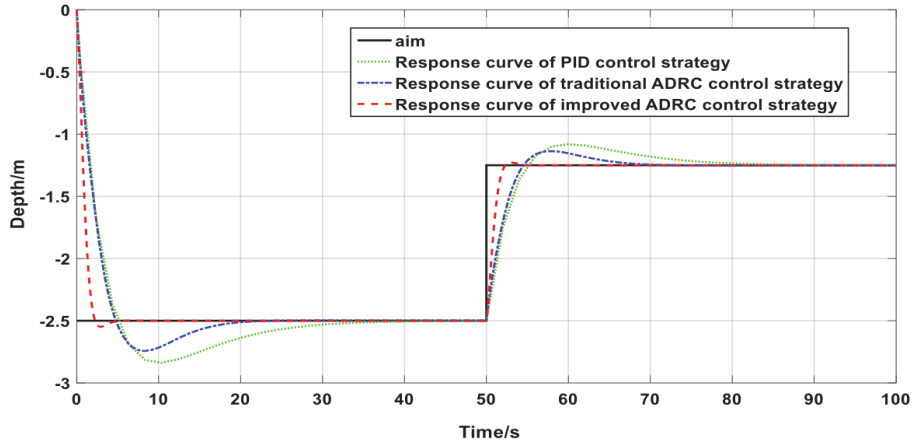


FIGURE A.10. – réponse au contrôleur ADRC traditionnel, amélioré et PID

utilisation d'un ballast

On retrouve de nombreux systèmes de contrôle de profondeur basés sur l'utilisation de ballast. Afin de comprendre comment est-ce que ce dernier fonctionne on s'est intéressé aux travaux de Brij Kishor Tiwari et Rajiv Sharma en [13].

méthodologie En partant du modèle d'un corps flottant,

On a : (E1) où ΔB est la flottaison en Kg, F_B est la force de la gravité, F_G la poussée d'Archimède,

$$\Delta B = (F_B - F_G) / g = M - \nabla \rho \quad (\text{E1})$$

M la masse et $\nabla \rho$ le volume de liquide déplacé par l'objet.

Contrôleur Pour contrôler un ballast de nombreuses solutions sont envisagées en fonction des besoins. En [13], l'auteur utilise une approche consistant à faire recours à un ballast pour le contrôle la vitesse de soulèvement et tangage de l'AUV. On a donc ici, un problème à plusieurs entrées et sorties. Et les auteurs optent pour un contrôleur linéaire quadratique.

Pour ce faire, on part de l'équation d'évolution du système

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

où A est la matrice d'état, B est la matrice d'entrée et u est le vecteur d'entrée. Ici, le but est de trouver la commande $u = -Kcx$ par retour d'état, avec Kc la matrice de gain optimal qui minimise la fonction de coût quadratique J . Cette fonction de coût est la suivante :

$$J(x, u) = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

où Q est la matrice de pondération d'état définie positive et R est la matrice de pondération d'énergie définie positive qui détermine l'importance relative de l'erreur d'état et de la dépense

d'énergie respectivement. Pour minimiser la fonction de coût J , la matrice de gain de commande optimale en boucle fermée K_c est définie comme suit :

$$K_c = -R^{-1}B^T S$$

où B et R sont les mêmes que ceux définis précédemment et S peut être calculé en résolvant la Riccati algébrique matricielle. L'équation (MARE) est donnée comme suit :

$$A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q = 0$$

De plus, il est noté que S doit être une matrice définie positive pour que le système soit stable et que la stabilité du système peut être vérifiée en calculant la valeur propre $(A-BK_c)$, et si la partie réelle de la valeur propre est négative, le système est stable. En utilisant ce contrôleur en [13] il arrive au résultat de la figure A.11.

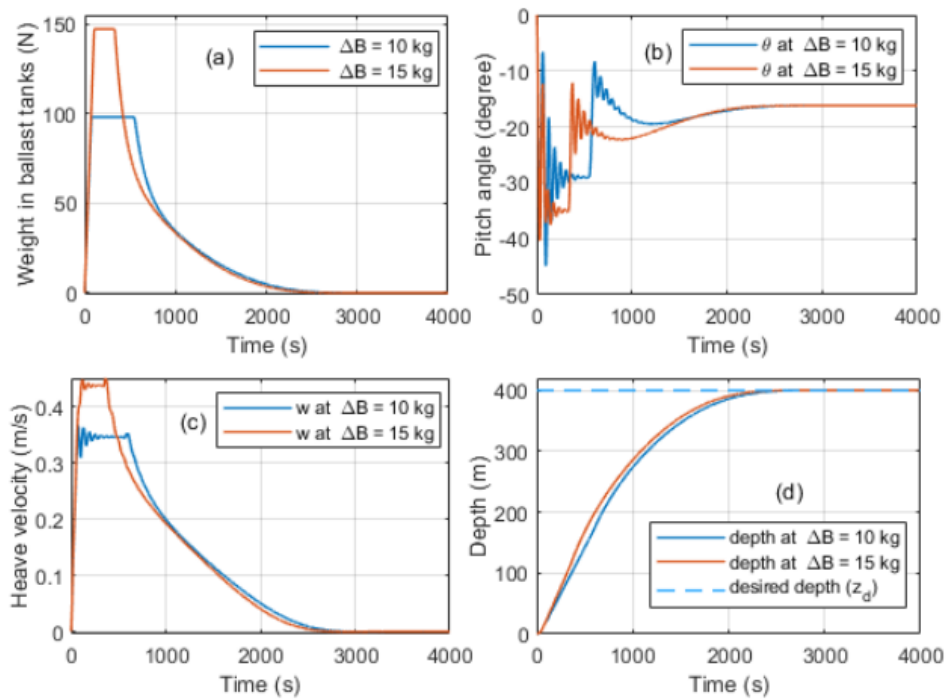


FIGURE A.11. – (a) variation du poids en fonction du temps dans les ballasts, (b) angle de tangage en fonction du temps, (c) vitesse de tangage en fonction du temps et (d) profondeur en fonction du temps dans une boucle fermée.

A.3.2. Recharge des batteries des AUV en mer

Présentation d'une batterie

Une batterie est un composant permettant de stocker de l'énergie électrique sous forme d'énergie chimique.

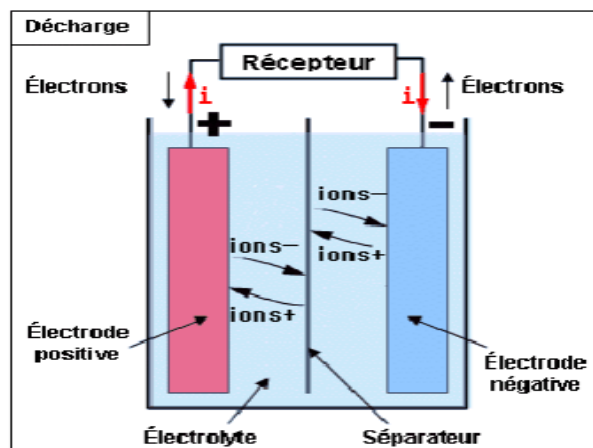
Les batteries (ou accumulateurs) et les piles sont des systèmes électrochimiques, qui stockent de l'énergie sous forme chimique et la restituent sous forme électrique. Les batteries sont basées sur un système électrochimique réversible, contrairement aux piles.

De manière générale, une batterie est constituée de :

- Une électrode positive capable de céder ou de capter des électrons.
- Une électrode négative capable de céder ou de capter des électrons.
- Les deux baignant dans une solution (sous forme de gel ou de liquide) appelée électrolyte.

Le courant est créé par un mouvement d'ensemble des électrons qui se déplacent de l'électrode positive à l'électrode négative en passant par un fil de métal (conducteur), pour alimenter un récepteur. Les ions issus de ce transfert d'électrons traversent l'électrolyte partant de la cathode pour rejoindre l'anode. La batterie se décharge [14]. Une batterie ou une pile se caractérise donc tout d'abord par deux couples « oxydant-réducteur » (par exemple Plomb/Oxyde de plomb, Carbone/Oxyde de cobalt lithium ou Carbone/Phosphate de fer lithié ...) échangeant des électrons. L'association de deux plaques (ou de deux matériaux d'insertion pour la batterie li-ion) constitue l'entité primaire d'une batterie.

L'électrolyte a pour fonction d'assurer la conduction ionique et, plus généralement, de participer à la réaction chimique.



- Électrode positive : oxyde de plomb,
- Électrode négative : plomb,
- Électrolyte : mélange d'eau + acide sulfurique.

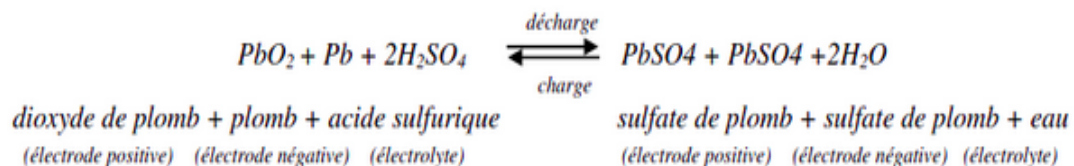


FIGURE A.12. – Principe de fonctionnement d'une batterie

Les grands types de batteries

Nous rencontrons plusieurs types de batteries, nous pouvons les classer suivant leur couple oxydo-réducteur. Les plus connus sont :

— **Batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cad) [15]**

Ces batteries ont une longue durée de vie, si l'entretien est correct. Elles ne doivent être rechargée qu'après une décharge complète sous peine de réduire leur capacité (effet mémoire). C'est le type de batterie le plus robuste et fiable, tout particulièrement par temps de chaud et froid. C'est aussi le type qui délivre le plus de puissance, chose bien utile par exemple au démarrage d'engins lourds ou pour un travail intensif. Les batteries NiCd ont un fort taux d'auto-décharge, ce qui veut dire qu'elles perdent leur charge en cas de stockage. Penser à les charger avant stockage. Le cadmium est un matériau très polluant, donc la mise au rebut doit être faite de manière responsable.

— **Batteries Nickel-métal-hydrure (NiMH)**

Par rapport à la batterie NiCd, ce type de batterie a une "densité énergétique" supérieure qui lui assure une plus grande autonomie. Comme les batteries NiCd, les batteries NiMH ne doivent être rechargées que qu'une fois déchargées. Toute fois l'effet mémoire y est réduit. Les batteries NiMH ont le plus haut taux d'auto-décharge : elle perde rapidement leur charge en cas de stockage. Matériaux moins polluants.

— **Batteries Lithium-Ion [16]**

Ces batteries ont une "densité énergétique" bien supérieure à celles des type NiCd et NiMH, ce qui permet une importante miniaturisation à autonomie égale. Leur taux d'autodécharge est très inférieur, de sorte qu'elles se décharge peu en cas de stockage. Pas d'effet mémoire, elles peuvent être rechargée à tout moment. Sans incidence sur leur capacité. Très onéreux.

— **Batteries Plomb**

Il s'agit de batteries bon marché et n'ayant pas d'effet mémoire. Cependant, leur "densité énergétique" est très faible. Par ailleurs, elles sont sensibles au froid.

Les critères de choix d'une batterie [15]

Le choix d'une batterie dépend de son utilisation future. Plusieurs paramètres sont à vérifier avant de choisir une batterie. Comme critère de sélection nous avons :

- La capacité de la batterie : c'est la quantité d'électricité qu'elle peut débiter pendant un temps donné. Elle nous sera donnée par le dimensionnement de l'AUV
- La tension aux bornes de la batterie : Nous allons caller cette tension à celle des moteurs de l'AUV et utiliser un transformateur si besoin.
- La technologie de la batterie. Un tableau récapitulatif des technologies avec leurs avantages et leurs inconvénients est données au tableau A.1.

Nous choisirons la technologie **NiMH**. Le choix doit se porter sur la technologie qui offre la meilleure densité d'énergie. C'est à dire les batteries au Lithium ; cependant celle ci sont sensible aux basses températures, raison pour laquelle nous choisissons la technologie NiMH.

Les méthodes possibles de charge d'une batterie

TABLE A.1. – Les types de batteries et leurs propriétés

Type	Densité d'énergie(Wh/Kg)	Densité d'énergie(Wh/L)	Auto-décharge (%/mois)	Voltage d'une Cellule (V)	Temps de recharge rapide
Plomb	35	111	5 à 10	2	8h à 10h
NiCd(Nickel Cadmium)	50	94	10 à 20	1.2	1h30min
NiMH(Nickel Metal Hydride)	80	135	20 à 30	1.3	2h à 4h
Lithium Ion	100	196	5 à 10	3.6	2h à 4h
Lithium polymer	150	200	5 à 10	3.6	2h à 4h
Alkaline Rechargeable	80			1.5	2h à 3h

— L'effet Seebeck

C'est l'effet par lequel de l'énergie électrique est créée par une variation de température. Lorsqu'un matériau est soumis à 2 sources d'énergie, une différence de potentiel proportionnelle à l'écart de température entre les 2 sources est créée [17]. Expression du coefficient de Seebeck :

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_{hot} - V_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad (A.1)$$

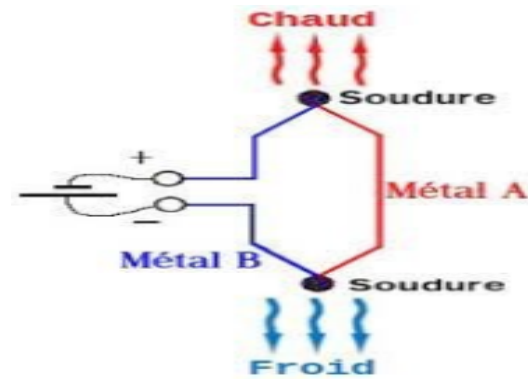


FIGURE A.13. – Principe de l'effet seebeck

Au tableau A.2 nous avons quelques coefficients de seebeck et à la figure A.13 nous avons un schéma simplifié du principe.

— L'osmose

L'énergie osmotique désigne l'énergie exploitable à partir de la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce, les deux natures d'eau étant séparées par une membrane semi-perméable.

Prenons deux réservoirs remplis pour l'un d'eau douce et pour l'autre d'une solution d'eau salée de même volume séparés par une membrane semi-perméable (également dite « sélective ») qui bloque les ions de grosse taille Na^+ et Cl^- et laisse passer les molécules d'eau

TABLE A.2. – Quelques coefficients de Seebeck

Matières	Coefficient de Seebeck
Tungstène	7.5
Or, Argent, Cuivre	6.5
Rhodium	6
Plomb	4
Aluminium	3.5
Mercure	0.6
Platine	0
Nickel	-15
Bismuth	-72

plus petites H₂O (on notera que l'eau douce contient également des sels mais en moindre quantité). Les deux réservoirs étant de concentration saline différente, le niveau égal de chaque réservoir n'est pas une position d'équilibre.

Pour équilibrer le système, il s'ensuit une migration des molécules d'eau du milieu le moins salé vers le plus salé. Ce mouvement engendre une augmentation du niveau d'eau du milieu le plus salé et une diminution du niveau d'eau du milieu le moins salé. figure A.14

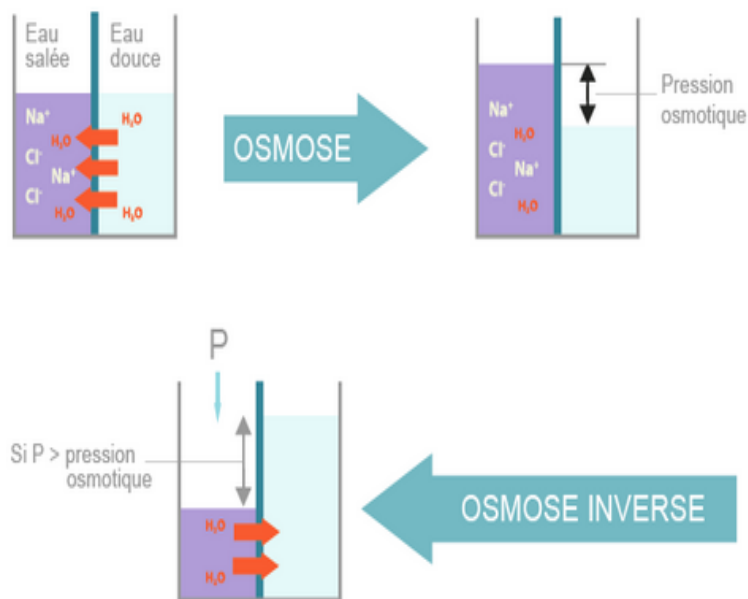


FIGURE A.14. – Principe de l'osmose

L'idée serait de récupérer cette pression osmotique pour faire tourner une mini turbine qui tournera alors un alternateur (figure A.15). Ce qui produira de l'énergie pour charger nos batteries.

Une pression de 2 bars dans le réservoir d'eau salée confère à l'eau acheminée vers la

turbine la même énergie qu'un volume d'eau chutant de 20 m dans un barrage hydroélectrique (figure A.16).

La difficulté serait l'encombrement du système. Pour produire une énergie considérable, il faudrait que la surface semi-perméable soit considérable.

Le premier prototype de centrale en Norvège comporte 2 000 m² de membrane (soit 2 W par m² de membrane) [4].

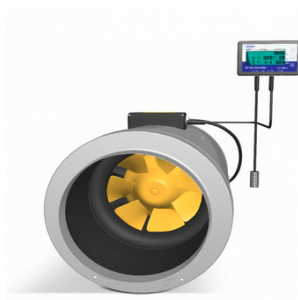


FIGURE A.15. – Exemple de turbine

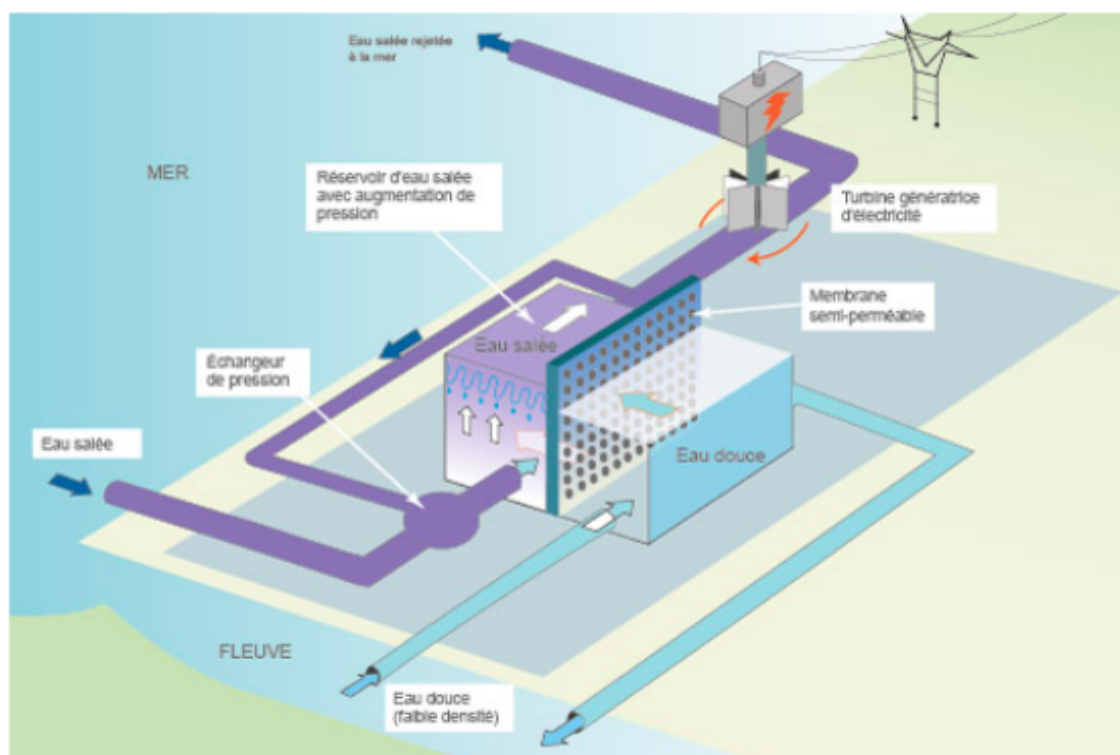


FIGURE A.16. – Exemple de centrale osmotique

— L'énergie solaire

Constitués d'un matériau semi-conducteur, les panneaux photo-voltaïques produisent de l'électricité à partir de la tension électrique créée par le choc entre les photons, les parti-

cules qui transportent l'énergie solaire, et les électrons des atomes constituant le matériel du panneau photo-voltaïque. Le fonctionnement de ces panneaux se base sur un phénomène physique connu sous le nom d'effet photoélectrique : lorsqu'un matériel est exposé à la lumière (visible ou pas visible), il y a émission d'électrons (appartenant à ce matériel) [6].

Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée (celle-ci dépend du matériau), alors que leur nombre, qui détermine l'intensité du courant, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse : plus il y a de lumière, plus les photons sont nombreux, plus la production d'électricité est importante. Un panneau solaire photo-voltaïque est constitué par l'assemblage de plusieurs cellules photo-voltaïques. Le courant est recueilli dans les cellules grâce à de fils métalliques très fins qui permettent de le transporter de cellules en cellules tout en l'additionnant.

NB : c'est l'intensité lumineuse qui importe ici et non la chaleur produite

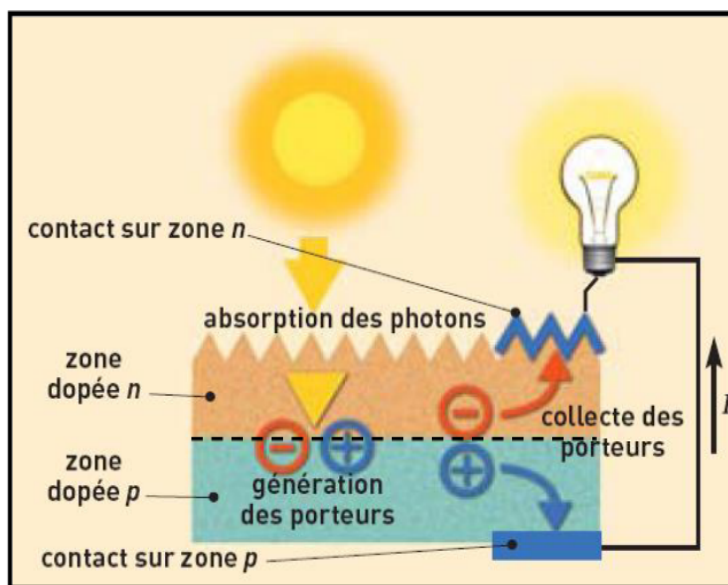


FIGURE A.17. – Effet photo-voltaïque

A.3.3. Techniques de localisation en intérieur

Notre projet de data muling implique la navigation d'un robot en milieu marin, ce qui implique que la connexion GPS ne passe pas. Ici, nous nous intéresserons à la localisation de l'AUV dans ce milieu, pour la navigation et pour la surveillance du robot qui contient des données sensibles. En effet, l'AUV doit pouvoir vérifier que la mission se passe bien. Si le robot se rend compte que sa localisation ne convient pas, par exemple à cause d'une interception, il pourra détruire ses données sensibles. Les enjeux de la localisation dans le data muling sont donc la discrétion et l'efficacité des systèmes employés. Nous avons pour hypothèses que l'environnement marin est déjà connu et qu'il a pu être décrit par les organisateurs de la mission. Nous verrons différentes techniques de localisation indoor puis déciderons laquelle est la plus adaptée à notre scénario de

data muling.

Concernant les techniques de localisation indoor existantes, la plus utilisée est la localisation par fingerprinting signal, qui est une technique utilisant des balises émettant des ondes radio et un récepteur placé sur le robot mobile [18]. Le robot acquiert une empreinte digitale des signaux émis par des balises, puis un algorithme détermine l'endroit le plus probable où se trouve l'objet. Cette technique nécessite un étalonnage pour réaliser l'empreinte digitale des signaux. L'inconvénient majeur est cette phase d'étalonnage qui peut être très longue. Cette technique est majoritairement utilisée pour des robots évoluant dans un bâtiment.

Une autre technique est la localisation basée sur l'image. Le principe de cette méthode est de se localiser en dead-reckoning avec une IMU et de se recalculer grâce à des zones d'intérêt [19]. Cette technique est discrète mais peu fiable : si le robot dévie trop et ne reconnaît pas un élément, l'incertitude peut rapidement devenir importante. De plus, elle peut difficilement être mise en place pour un robot sous-marin, surtout à des profondeurs importantes.

Par ailleurs, une autre technique est de se localiser en utilisant une méthode de SLAM (simultaneous localization and mapping), par exemple avec une caméra ou un LIDAR [20]. Il s'agit de mettre en correspondance des nuages de points détectés plusieurs fois par le robot pour recalculer sa position. Cependant cette technique ne fonctionne que si le robot passe plusieurs fois au même endroit, ce qui n'est généralement pas le cas pour des robots de data muling, qui doivent généralement rejoindre un point sans reboucler sa trajectoire.

En ce qui concerne spécifiquement les robots sous-marins, une technique couramment utilisée est le recalage par GPS lorsque le robot sort de l'eau. Ainsi, il estime sa position à partir de l'IMU et se corrige lors de ses remontées en surface, ce qui peut ne pas être assez discret pour un projet de data muling.

Finalement, la technique choisie pour notre projet est le recalage d'AUV par des balises et par un capteur de pression. Ainsi, des balises placées au fond de l'océan à intervalles réguliers envoient un signal capté par le robot. Ce signal est interprété en une distance entre la balise et l'AUV. Les positions des balises étant connues, cela permet d'avoir une information sur la position de l'AUV. La profondeur du robot est quant à elle corrigée par un capteur de pression. La position du robot est prédite à partir des données de l'IMU et de la vitesse de l'AUV, puis corrigée avec les balises et le capteur de pression, à l'aide d'un filtre de Kalman.

L'altitude du robot est également connue, car la profondeur est mesurée grâce au capteur de pression et nous avons fait l'hypothèse que nous connaissons le profil du niveau de l'océan grâce aux cartes marines.

L'inconvénient de cette méthode est qu'il est possible que quelqu'un intercepte les ondes acoustiques émises par les balises. De plus, si le robot s'éloigne trop des balises il se peut qu'il ne reçoive pas leur signal.

A.4. Transport des données

A.4.1. Rendez-vous entre deux AUV

A.4.1.1. Introduction

In our data muling context, the problem appears in the fact that we need multiple robots to meet in multiple locations so to continue the data travel.

A description of the problem can be seen as :

Two astronauts land on a spherical body that is much larger than the detection radius (within they can see each other). The body does not have fixed orientation in space, nor does it have an axis of rotation, so that no common notion of position or direction is available to the astronauts for orientation. Given unit walking speed for both astronaut, how should they move about so as to minimize the expected meeting time T (before they come within the detection radius)? [21]

In this description we see mostly the optimization side of the problem, but we also need to keep in mind that it is not always even possible for that meeting to happen, and we must ensure that some base level of information allows it.

Even though we lack specifications, there are some possible assumptions. I made a list of them and their importance will become clearer along the text :

1. The robots are heterogeneous ; (AUV and drone/plane)
2. The robots identifiable ;
3. Their behavior is deterministic ;
4. No long-range communication is possible ;

And here are some details that I feel we should decide sooner or later so that a strategy can be chosen for our case :

1. How will the environment be represented ?
2. What will they know of the map and each other's positions ?
3. How much information can they exchange beyond the data transfer ?

A.4.1.2. Taxonomy

Alright, now some general aspects of the taxonomy of the problem[21, 22, 23]. The following aspects of the scenario may change. Some of them are just facts of our context and others are nice to know so that we can make informed decisions.

The agents First, we have how are represented the agents that need to meet. They may be understood either as physical agents in an Euclidean environment or as agents in a graph network. In both cases there are some properties that we need to observe in order to classify the scenario :

- Movement : **random** or **deterministic** ?
 - Do they have a source of randomness in their input ?
- Identity/Symmetry : **labeled** or **anonymous** ? / **symmetric** or **asymmetric** ?
 - Are they distinguishable ?
- Knowledge : what do they know of the **map** and **other agents** ?
 - Have they access to the size or topology of the map ?
 - Are them aware of the existence or properties of other agents ?
- Communication : Are they able of sending **self-generated messages** ?
 - Is that exchange of information, when possible, direct or indirect ? And what is the range ?

The environment When talking about the environment, there are specifications that dictate what the agents can perceive and what should they expect during navigation.

- Identity/Symmetry : do the nodes have **distinct identities** ?
 - Can two nodes be differentiated by anything other than their degree ?
- Edge labeling : **locally** or **globally** consistent ?
 - Is it possible for the agents to have Sense of Direction ?
- Time : **synchronous** or **asynchronous** (or **semi-synchronous**)
 - Does the environment have a shared clock, action duration and delay between actions ?
- Storage : can **tokens** or **messages** be left by one agent for another ?
 - How much information can be stored for future visits ?

Others There are many other properties to both agents and networks that I'll leave aside as they are mostly used for theoretical reasoning that I didn't find pertinent to our case. For the sake of curiosity, here are some of them :

- Chirality : do the agents agree on sense of rotation ?
- Collisions : **immaterial**, **fail-stop** or **intolerable**
 - Are they perceivable ? If so, what are the consequences ?
- Movement : **rigid**, **fixed** or **non-rigid**
 - Do they always reach their destination after moving, there's a minimum distance that will be traversed or nothing is guaranteed.
- Agent generation : can agents be cloned into new ones or existing ones merge ?
- Space and visibility : do agents have **extent** or **opacity** ?
 - How much space do they occupy ? Does an agent's existence reduce the visibility of others ?
- Fault tolerance : are they subject to **crash faults** or **byzantine faults** ?
 - If existent, are they immediately perceivable or can they go undetected for a while ?
- You have no idea of how many ways to categorize agents and environments there is

A.4.1.3. The rendezvous problem

Now that we have a basic understanding of what concepts are important to know and how they connect, those are the minimal assumptions needed to make rendezvous possible[24] :

1. The input is an anonymous graph with no labels on nodes, but with labels on the incident edges of each node (the ports) ;
2. The degree of the node and the port labels are available and are fixed for every agent ;
3. When an agent leaves a node, it is aware of the port number by which it leaves ;
4. When an agent enters a node, it is aware of the port number by which it enters ;
5. An agent can verify whether a given number is a port number at the current node ;
6. Each agent has a unique ID, but no knowledge of the other agent ;
7. Agents can meet along edges.

And well, so that you don't feel I held the basic solution for last, there are some facts about the rendezvous from what to start :

- If we're dealing with a scenario where the map is not a simple plane (or equivalent), we'll most probably have to represent the environment in some sort of graph. For the rendezvous of two agents to be possible, one agent's map must be at least a subset of the other one's. In the case of different starting maps, then this means that the accessible zone of one must be a subset of the other.[24]
- If we have a shared map, there's no ambiguity in the paths and all agents know the label of each other, a strategy called Wait For Mommy solves it. One agent waits for the other one to reach it.[22]

Of course other difficulties in implementation will appear as localization might not be perfect and I feel like assuming drift (and a planet sized one) is almost a must for keeping expectations in check. Even if the WFM algorithm suffices, we'll need to deal with mommy going to a slightly wrong position and the child not being where it should. I'll talk about this alternative later on. I'll deal in the following slides on how the rendezvous problem may present itself and how it may have interesting solutions for different amounts of guarantees (such as both agents searching one another!).

I'll be talking only of the configurations that respect the assumptions at the beginning and their variations, which means :

- **deterministic** and **asymmetric** agents, with undetermined **communication** and **knowledge** ;
- **asynchronous** environment, with undetermined map construction or potential for stored information.

Interesting configurations Following the definitions and clarifications just made, I selected a few configurations that I deemed specially interesting, as they comprehend aspects of our problem that we have no yet decided or possibilities that might be (or not) outside our scope.

Rendezvous with spatially uncoupled communication In this situation, there is no requirement of agents to be spatially close for communication to happen. The temporal aspect is not focused and messages may either be received at any moment, independent of transmission, or necessarily arrive in function of its moment of creation. The second scenario is more pertinent for us and is divided in two cases : **explicit** and **implicit**.

In the first case, the **wireless** communication is directed to a specific agent, either one or two ways, and the reception must be guaranteed with some sort of temporal coupling. In practice, for this method to be applied, some sort of synchronization must be implemented, as well as a communication method and range have to be specified.

The alternative, where communication is done implicitly via identical **beeps**, it exists solely in one direction and there are no immediate guarantees of reception. When applied, the transmission/reception in one sense does not imply that it is possible if the roles are reversed. This case requires that agents are prepared to identify the message, regardless of their activities at the moment.[23, 25]

Rendezvous with temporally uncoupled communication Now, to be temporally uncoupled means that communications doesn't have to happen at the same time for all agents. This scenario is interesting as it considers the possibility of leaving tokens or other pieces of information in the world to be later found by other agents. Ignoring the case where it is spatially uncoupled as well, we are again left with **explicit** and **implicit** versions.

Whiteboards represent the first case, where a shared memory is made available for regions of the environment, where information may be written and erased by any agent accessing it, no matter when. Decisions are taken based on the agent's state and the contents of the accessed message space. As its application involves the deployment of explicit messages (either the contents or its existence as a message), it is not the best suited for data muling in terms of discretion, even though it reduces the complexity of the problem.

In the implicit version, communication is represented by **tokens**. As in the case of beeps, tokens are identical and unidirectional. They can be transported, left or taken from the environment and the messages come entirely from their existence, being their visibility limited in space. Variations exist where the pick-up is not possible or some minimal information may be stored in it. The implementation of **tokens** is much more convenient for our scenario as they may be hidden hints in the environment that direct the agents path planning.[23, 25, 21]

Rendezvous in dangerous networks Danger may be present in a rendezvous scenario in the form of dangerous agents and dangerous environments. It is one of the most difficult aspects to deal and is considerably fitting in our muling scenario, as both sources of harm and undesirable situations can be represented as dangers in the problem.

When considering dangerous agents, it is important to consider their threat and how they

affect the environment and our agents. When an intruder is capable of harming an agent or blocking its path, failing the mission, it is deemed malicious. In scenarios where this is a foreseeable possibility, the connectivity of the map in a graph is important to determine the vulnerability of having to avoid some regions. In applications, this translates to giving preference for environments with multiple path options, so that an obstacle doesn't invalidate the mission.

In the case of dangerous environments, they are similar to the malicious intruders in creating obstacles in the movement of the agent, but instead they represent regions that are harmful when transversed. They are usually known beforehand and inserted in the behavior of the agent so to be avoided, but for that their existence must be studied. In our case, those may be zones that are under surveillance or considered risky for their unknown contents, and must be evaluated when building the mission.

This is applicable even if the initial representation of the problem is not a network, as it can be reduced to an equivalent problem where dangerous actions or regions can be translated into vertices or nodes.[21, 23]

Rendezvous with different maps This situation is specially interesting for its likelihood, as knowledge of the entire network is not always possible and this scenario may be generated when localization is lost.

Robots don't have to respect any time related constraint, nor have a starting map that is shared by everyone. This problem has been studied to be solvable using only the base requirements, but some things were proven to help. Having a **coherent ordering of nodes** and **weighted robots/edges** lead to more efficient strategies, decreasing to a polynomial complexity algorithm.

This can be translated to taking the most advantage possible of characteristics of the environment. When there is no immediate translation of one robot's position to the other, giving preferences for path planning will help the robots converge. Such preferences could be choosing always the path with brighter colors, the most spacious zones or the biggest number of doors. As long as the meeting place is accessible for both robots, rendezvous is possible.[24, 26]

A.4.1.4. Conclusion

It is interesting to perform a feasibility analysis so to be avoid of well known problems, and take directed decisions on what is necessary to increase our chances of success. This formalization made explicit hard requirements and limitations for the possible scenarios, what may lead to further development of the project specifications, as the assumptions are made clear.

This base bibliography study will also be useful for finding existing solutions once the scenario is fixed, but so far we can extrapolate the following ideas :

- Using **beeps** or **tokens** for minimal communication ;
- Considering the **possible threats** in the environment representation ;

- Using as many factors for **disambiguation** as possible ;
- Taking advantage of **characteristics of the environment** for the path planning ;

A.4.2. Authentification et communication entre deux robots

Dans le cas du muling, l'authentification entre deux robots concerne la vérification mutuelle de l'identité des robots pour autoriser le transfert des données sensibles entre eux.

L'authentification nécessite l'établissement d'un canal de communication exclusif et bilatéral entre eux pour échanger leurs identifiants respectifs par exemple.

Le transfert de données, lui, nécessite l'établissement d'un canal de communication exclusif et unilatéral entre eux (un robot émetteur et l'autre récepteur).

Dans les deux cas, un canal de communication est nécessaire.

Des AUV seront majoritairement utilisés. Les types de communication possibles sous l'eau sont les suivantes :

- Communication acoustique à l'aide de transducteurs (hydrophone¹ et/ou projecteur²).
 - Directionnelle
 - Émission : contrôle de la directivité de l'antenne par retard/déphasage des tensions d'alimentation des différents capteurs.
 - Réception : Formation de N voies sur une antenne de M transducteurs pour privilégier une direction d'observation.
 - Omnidirectionnelle (antenne émettant et recevant dans toutes les directions)
- Communication électromagnétique dans le visible à l'aide de cellules photo-réceptrices et photo-émettrices.
 - Directionnelle par émission laser mais il est très difficile de pointer précisément.
 - Omnidirectionnelle par émission avec des LEDs ; il faut donc répartir plusieurs cellules photoréceptrices sur l'ensemble de la coque de l'AUV.

Spécifications pour la communication visuelle La portée dépend de la turbidité de l'eau et ne dépasse pas la dizaine de mètres. La consommation d'énergie dépend surtout de la puissance de la LED d'émission. Le détail des caractéristiques est donné dans la partie A.4.3.3.

Spécifications pour la communication acoustique La communication acoustique a pour gros désavantage d'être coûteuse et à faible débit. En revanche, elle est longue portée. Le détail des spécification est donné Tableau A.18.

1. L'hydrophone est l'équivalent sous-marin du microphone aérien.

2. Le projecteur est l'équivalent sous-marin du haut-parleur aérien.

Technologie	Portée	Fréquence	Consommation	Débit
RFID	0.5-6m	125kHz-2.4GHz	/	/
Bluetooth	8-10m	2.4GHZ	2mW(par message)	1-24Mbits/s
Wi-Fi (clés 4G)	20-100m	5-60GHz	80mW(par message)	1 Mbps-6.75 Gbps

FIGURE A.18. – Comparaison des caractéristiques sonars

Spécifications pour la communication aérienne sans fil Concernant le drone aérien, les types de communication sans fil dans l'air possibles et leurs caractéristiques sont données dans le Tableau A.19.

Appareil	Portée	Fréquence	Débit	Consommation
Modem	4 à 10 km	10 à 38 kHz	20 à 300 bits/s	1.1 W
Sondeur monofaisceau	1500 m	50 à 200 kHz	/	25-30 W
Sondeur multifaisceaux	200 à 500 m	200 à 400 kHz	/	115 W
Sonar frontal	130 à 200 m	250 à 450 kHz	/	15 W
Sonar latéral	150 m	455 kHz	/	120 W

FIGURE A.19. – Comparaison des caractéristiques des technologies sans fil dans l'air

A.4.3. Transfert des données entre AUVs

A.4.3.1. Le Li-Fi

La Li-Fi est une technologie de communication sans fil par le biais de la lumière visible. Cette dernière présente un grand nombre d'avantages comme sa discrétion, sa consommation d'énergie faible ou la vitesse de transmission de données, importante par rapport à une communication plus classique en immergé comme le sonar [27]. Plusieurs types de communications en lumières visibles immergées existe. Parmi ces types, les différences les plus importantes résides dans l'utilisation de LED ou de laser. La Figure ?? montre une comparaison de ces deux types de technologie [28] [3] [29].

	LED	Laser Diode
Optical Spectral Width	25-100 nm	0.01 to 5 nm
Modulation Bandwidth	< 200 MHz	> 1 GHz
Minimum Output Beam Divergence	Wide (about 0.5deg)	Narrow (about 0.01deg)
Temperature Dependency	Little	Very temperature dependent
Special Circuit required	None	Threshold and temperature compensation circuit
Cost	Low	High
Lifetime	Long	Medium
Reliability	High 10^8 hours	Moderate 10^5 hours
Coherence	Incoherent	Coherent
Eye Safety	Eye safe	Must take precautions

FIGURE A.20. – Comparaison LED et laser

Une majorité des systèmes utilise aujourd'hui des LEDs, nous détaillerons par la suite pourquoi. Les récentes recherches dans le domaine permette aujourd'hui d'avoir des systèmes fiables et avec de bonnes caractéristiques [30] [31]. Voici quelques exemples sur la Figure ??.

Système	Lamparo	Demonstrator	1013C1	Aqua Optical	Aqua-FIT	
Laboratoire/ Entreprise	Subsea Tech	QinetiQ	Ambalux	MIT	KAUST	Institute for Electric Light Sources
Portée	35 m		10 m		1.5m	0.6 m/5.4m
Transmission de données	50 Mbit/s	900 kbit/s	10 Mbit/s	1 Mbit/s	250 Mbit/s	800 Mbit/s/ 200 Mbit/s
Type	Bidirectionnel	Bidirectionnel	Multidirectionnel	Bidirectionnel	Multidirectionnel	Multidirectionnel

FIGURE A.21. – Les systèmes de communication par lumière existants

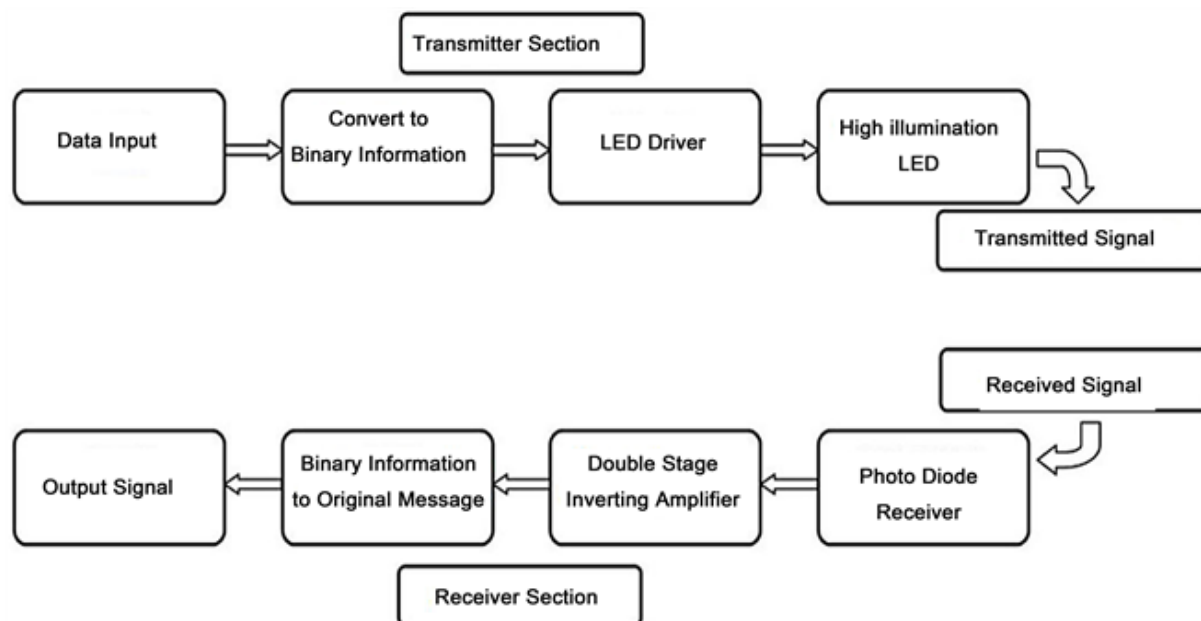


FIGURE A.22. – Architecture fonctionnelle Li-Fi

A.4.3.2. Encodage des données : Manchester

La transmission de données, une fois binarisée selon une méthode appelée Manchester, se fait par l'intermédiaire de LED ou de laser. La fréquence de clignotement est ainsi captée par des cellules photo-réceptrices (des diodes). Ces dernières permettent d'obtenir le message binaire initial qui sera décodé par pour obtenir le message sous forme intelligible. Le processus complet est résumé sur la Figure ??.

A.4.3.3. Les types de communications visuelles

Il existe deux types principales de communication visuelle : la configuration de diffusion et la configuration point-à-point [32].

Configuration de diffusion La configuration de diffusion utilise principalement des LED hautes puissances afin d'obtenir un angle de diffusion important. Mais cette configuration est limitée en portée du fait qu'elle soit sensible à l'atténuation causé par l'eau. De plus, le taux de transmission de données est plus faible. Néanmoins il s'agit du système le plus facile à mettre en oeuvre.

Configuration point-à-point La configuration point-à-point semble être la plus prometteuse mais la moins facile à mettre en place. Dans cette configuration le laser est placé de telle sorte à être en face du photo-récepteur de l'autre AUV. Mais cette configuration nécessite une précision sur le placement relatif des AUVs. De plus, les perturbations dues à des courants et à l'instabilité du robot peuvent apporter causes des problèmes importants dans la transmission. Néanmoins la portée de transmission est plus importante que dans la première configuration. Un moyen d'éliminer les perturbations dû aux mouvements relatifs des AUVs, est d'asservir visuellement

le faisceau sur le photo-récepteur de l'autre AUV. C'est notamment cette technologie qui a été utilisé par le MIT [2]. Lors d'un rendez-vous entre deux AUVs, l'AUV transmetteur fait un balayage de la zone dont il présume la position de l'AUV receveur. Celui-ci, lorsqu'il reçoit une donnée lumineuse correspondante au faisceau, s'asservit à ce dernier. Le premier AUV peut par la suite, pour rendre encore plus efficace le lien entre les robots, envoyer des informations de positions ??.

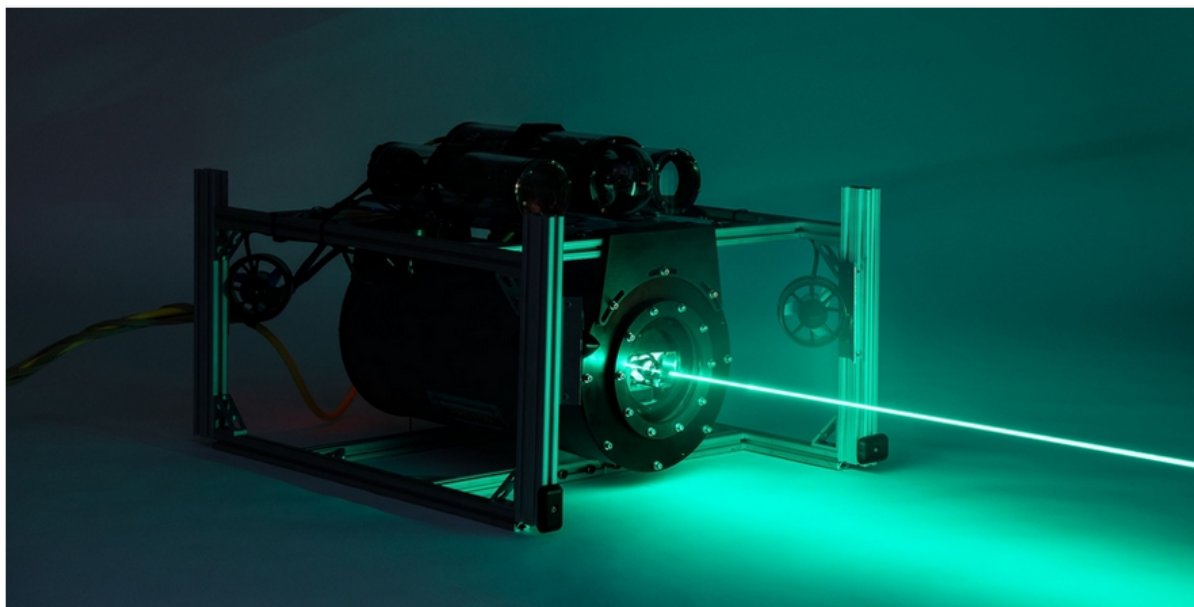


FIGURE A.23. – Asservissement visuelle en configuration point-à-point MIT

A.4.4. Transfert des données de l'AUV vers le drone

Le transfert des données entre l'AUV et le drone ne peut se faire que suivant deux cas de figure. Soit l'AUV remonte à la surface pour effectuer un connexion avec le drone ou il reste immergé et il devra utiliser les différents moyens de communication en milieu aqueux vus dans la section A.4.3.

— En surface

Dans le cas d'un contrôle à distance en surface, sans possibilité de veille visuelle ou auditive directe par l'opérateur, l'AUV doit être équipé d'un système de communication montante (de l'AUV vers le drone) disposant d'une qualité (bande passante, temps de latence et taux d'erreur) suffisante pour permettre une connexion automatique du drone. Il faut également que la portée du dispositif soit suffisamment grande pour permettre au drone de rester à une certaine hauteur de l'AUV ou au contraire que le drone connaisse la portée maximale du signal lui permettant sa connexion à distance. Si ces conditions sont réunies, le transfert de la données pourra s'effectuer sans interruption.

En mode aérien par ondes électromagnétiques en utilisant des interfaces de commande adaptées, on peut donc envoyer de la données de l'AUV vers le drone par wi-fi, bluetooth,

radiofréquence, infrarouge...

— En immersion

En plongée, lorsqu'il n'existe pas de dispositif de veille en surface, l'AUV doit être équipé d'un moyen de communication descendante (acoustique, radio ou optique) et montante lui permettant de recevoir ou d'envoyer de la donnée. Ceci doit, par exemple, permettre à l'AUV d'éviter de faire surface à l'endroit prévu si celui-ci est devenu inapproprié.

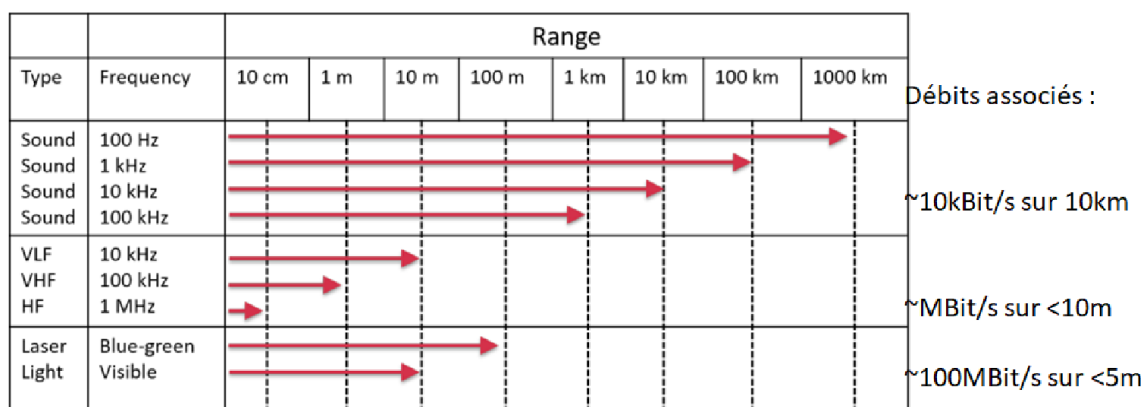


FIGURE A.24. – Moyen de transmission en milieu marin

Les ondes électromagnétiques ne peuvent pas se propager en milieu marin sauf à basse fréquence. Les HF et VHF nécessitent une antenne à la surface, ne passent pas au-delà de l'horizon, et sont sensibles aux perturbations atmosphériques. Outre le risque de détection en raison de la proximité de la surface, la bande HF permet une localisation directe par l'ennemi, elle n'est pratiquement jamais utilisée. Quant aux ondes optiques, leur portée n'atteint que quelques dizaines de mètres. Si le drone doit donc recevoir de la donnée, l'AVU devrait donc remonter près de la surface. Et le drone devrait être également équipé d'un dispositif pour pouvoir recevoir cette donnée via un flux optique. L'acoustique reste donc le moyen le plus fiable de transmettre fidèlement une information dans le milieu marin.

A.5. Interception des données

A.5.1. Discrétion et brouillage

A.5.1.1. Contexte d'application du brouillage

L'enjeu de la discrétion

Dans le contexte du data muling, la transmission de données se doit avant tout d'être discrète. Or puisque nous avons recours à des agents robotiques, la discrétion peut s'avérer être un obstacle non négligeable. En effet, le champ d'action des robots autonomes est toujours limité. Là où un agent secret peut facilement se fondre dans la masse et tromper la vigilance des gens, la présence d'un robot va toujours soulever l'interrogation. L'enjeu est donc de pouvoir envoyer

un robot en mission sans qu'il puisse être détecté.

Or, avant même de devoir envisager les protocoles à mettre en place si le robot est détecté, il est toujours intéressant de réduire les risques en amont. En effet, détecter un robot permet de prévoir des stratégies d'interception de données et de destruction du matériel, rendant très difficile l'application de nos protocoles de sécurité.

Contexte et problématique du traçage

Cependant, le danger de repérage n'est pas homogène dans tous les lieux de déploiement. Il convient donc de différencier les zones non peuplées et à l'écart des activités humaines et les zones peuplées et/ou surveillées. Dans le premier cas, un simple camouflage ou une navigation non terrestre suffit à diminuer significativement les chances d'être repéré et/ou suivi. En revanche, si la zone est urbanisée ou sécurisée, la complexité du problème s'accroît.

C'est pourquoi dans cette section, nous considérons certaines hypothèses contraignant le scénario de déploiement du robot :

- La navigation peut avoir lieu aussi bien en intérieur qu'en extérieur ;
- La mission a lieu pendant la nuit, quand aucun témoin n'est susceptible de croiser le robot ;
- L'environnement de déploiement est considéré comme non surveillé par des agents à pied mais par des caméras de surveillance uniquement ;
- Le robot est équipé d'un système de vision adapté et connaît a priori son parcours ;

La présence de caméra pose un problème rédhibitoire dans le contexte du muling : le traçage du trajet de l'agent. Les vidéos, permettent d'obtenir énormément d'information sur le matériel utilisé et même sur la nature de la mission. C'est pourquoi il peut devenir crucial de lutter contre l'acquisition de ces images sensibles.

Repérage de la caméra

Le repérage d'une caméra n'est pas le prérequis le plus complexe à mettre en place. En effet, il peut très bien avoir été réalisé par un agent en amont de la mission grâce à la récupération d'un plan ou simplement par observation du terrain. Et pour cause, beaucoup de caméras sont visibles à l'œil nu. De plus, le fonctionnement d'une caméra est souvent accompagné d'une LED allumée à côté de l'objectif, ce qui est bien pratique à observer, même avec une caméra embarquée.

Cependant, une autre méthode peut s'avérer très intéressante : le repérage par radio-fréquence. Sans même avoir de contact visuel avec la caméra il est possible de détecter le danger dans un périmètre suffisamment large pour l'éliminer. Cette méthode de détection repose sur le fait que le flux vidéo transite souvent via un réseau Wi-fi à une bande de fréquence spécifique.

A.5.1.2. Présentation des solutions alternatives

Avant de passer en revue les solutions envisageables pour lutter efficacement contre les caméras de surveillance, nous avons d'abord répertorié les solutions alternatives non retenues dans notre

scénario.[33]

- **Les impulsions électromagnétiques ou IEM**

Les IEM sont des émissions d'ondes électromagnétique de très haute amplitude. Elles peuvent brouiller toutes les télécommunications et même détruire des systèmes électroniques. Cependant, il n'existe pas de moyen embarqué ou de projectile pour générer de telles ondes depuis un robot. En effet, les explosions nucléaires et la foudre sont à l'heure actuelle les deux phénomènes permettant de les obtenir.

- **L'endommagement physique des composants de la caméra**

Une méthode très simple permettrait de mettre fin à l'acquisition vidéo : l'endommagement de la caméra. En coupant le câble d'alimentation ou le câble de transmission vidéo le problème serait vite réglé. Cependant, de telles méthodes ne peuvent être opérées par des robots autonomes.

- **Deauthentication attack[34]**

Cette méthode est la plus proche du hacking. Pour la mettre en place il faut avoir intégré un script shell dans le système du robot pour qu'il puisse s'immiscer dans une communication client/serveur. Le robot peut alors envoyer un paquet de données de désauthentification au serveur. En réponse, le serveur, suivant son protocole, avortera la communication avec la caméra. De cette façon la caméra resterait fonctionnelle mais les données seraient perdues.

Malheureusement, des complications sont à prévoir pour ce genre de procédure. Si le chiffrement du réseau est renforcé (WPA2,WPA3) ou si le repérage de ce réseau est trop complexe, l'attaque est difficile à réaliser. Enfin, cette méthode est inefficace avec les liaisons point à point.

- **L'aveuglement**

Le premier réflexe à la portée de n'importe qui serait d'occulter l'objectif de la caméra, avec une bombe de peinture par exemple. Or encore une fois, cela ne correspond pas à notre scénario où l'agent ne veut pas se contenter d'être non identifié, mais plutôt non détecté.

Cependant, les vagues de manifestation contre le régime chinois à Hong kong ont forcé les habitants à utiliser des méthodes de lutte contre les caméras de surveillance particulièrement inventives. Et l'aveuglement sans occultation est celle qui nous a semblé la plus pertinente à relever. À l'aide de lasers très puissants il est possible de surexposer l'image de la caméra pour dégrader l'image perçue et d'endommager la caméra définitivement. Bien que séduisante, cette idée reste assez difficile à mettre en place. Tout d'abord, il faut pouvoir viser une ou plusieurs caméras pendant la navigation, et sans trembler. Et ensuite, il faut garder en tête que pour être au maximum de son efficacité et pouvoir endommager réellement le capteur lumineux de la caméra, il faut être assez proche de l'objectif et le viser pendant plusieurs secondes. Et même dans ce cas de figure, il reste assez peu probable de détruire totalement le capteur, laissant toujours paraître l'agent à la source de l'attaque.

A.5.1.3. Brouillage électronique

Concept

Le brouillage est une mesure de guerre électronique. C'est une émission intentionnelle de signaux radioélectriques destinée à interférer dans le fonctionnement d'un radar en saturant son récepteur soit avec un bruit puissant, soit avec de fausses données. L'objectif est de minimiser l'indice signal-to-noise (SNR) du transmetteur. Cet indice est un rapport de la puissance moyenne du signal sur le bruit.

Dans le cas d'un réseau wifi, utilisé par une caméra, le problème reste le même. Grâce à un brouilleur embarqué, il est possible de détériorer le signal de la caméra permettant de transmettre la vidéo.

Dans le cas le plus simple, il s'agit d'avoir recours à un **brouillage spot** :

- Utilisation d'un détecteur radiofréquence ;
- Concentration de l'énergie du brouilleur sur une seule fréquence (cas particulier du DoS) ;
- Ciblage des fréquences usuellement employées pour les routeurs (1.2Ghz et 5.8 Ghz) ;

Application au contexte du data-muling

Pour mettre en place le brouillage de la caméra il faut prendre en compte les enjeux liés aux zones de déploiement et au matériel embarqué :

- Les fréquences d'émission dans la zone d'émission (en fonction des pays d'intervention)
- Le brouillage accidentel de ses propres fréquences de communication
- La consommation du brouilleur pendant la durée de la mission - Les interférences et les barrières naturelles

De plus, il faut également veiller à contourner les moyens de protection mis en place dans les zones sensibles. Il est par exemple possible d'être soi-même victime de brouillage (brouillage du GNSS par exemple [35]) ou alors d'être dans l'impossibilité de contourner les moyens de sécurité courants en guerre électronique.

A.5.1.4. Systèmes d'attaque et de protection

Le brouillage est avant tout une affaire de traitement du signal. Les paramètres à prendre en compte pour mettre en place des **moyens de protection électroniques** doivent donc avoir un lien avec la manipulation de la fréquence, le traitement de l'émission et de la réception du signal, autant sur l'aspect informatique que sur la nature du matériel employé.

Nous avons répertorié 5 méthodes qui sont couramment utilisées pour contrer le brouillage :

- **Regulated transmitted power**
 - Transmission du signal à faible puissance
 - Diminue la probabilité d'être repéré
- **Direct sequence Spread spectrum**
 - Ajout d'un pseudo-bruit pour cacher les porteuses qui ajoute un effet de bruit blanc
 - Chip rate plus élevé que le signal porteur
 - Le bruit est filtré par le récepteur selon un code particulier

- Incertitude sur le fait que la transmission vidéo puisse être supportée
- Surtout utilisé pour éviter l'interception des données
- **Polarisation de l'antenne**
 - Le récepteur et l'émetteur ont la même polarisation
 - Améliore la qualité du signal
 - Force le brouilleur à modifier sa polarisation
- **Antenne avec transmission directionnelle**
 - Réception et transmission selon un axe particulier
 - Difficile de détecter et de brouiller le signal
 - Plus compliqué à mettre en place, car il faut que l'infrastructure du lieu permette d'aligner le récepteur et l'émetteur polarisation

Et en opposition à ces méthodes nous avons mis en avant 3 méthodes de brouillage supplémentaires. Sans rentrer dans les détails, nous pouvons déjà supposer que ces méthodes peuvent être déclinées et adaptées en fonction du contexte et de l'évolution des moyens de protection.[36]

- **Brouillage à balayage**
 - Variation de la de la fréquence de brouillage
 - Changements rapides
 - Toutes les bandes de fréquences ne sont pas couvertes
- **Brouillage en barrage**
 - Brouillage de plusieurs fréquences simultanément
 - La dispersion des fréquences réduit l'intensité totale
 - Consommation en énergie plus importante
- **Deceptive jamming**
 - Brouillage et interception de une ou plusieurs fréquences simultanément
 - Envoi de fausses données en toute discrétion. En supposant qu'il est possible d'intercepter le flux vidéo, il serait envisageable de renvoyer une boucle vidéo du plan de la caméra prise avant le passage du robot.
 - Consommation en énergie plus importante

A.5.1.5. Conclusion sur l'utilisation du brouillage dans notre application du data-muling

Le brouillage est le moyen le plus discret pour éviter de se faire repérer et de laisser une trace de notre mission dans le cadre d'un déploiement dans une zone surveillée. Néanmoins c'est une méthode sans preuve de résultat, car il n'est pas possible de vérifier si le flux vidéo a bel et bien été brouillé.

Néanmoins il semblerait que le brouillage ait une résilience assez forte face aux moyens de protection. Il existe plusieurs méthodes de brouillage dont certaines sont assez difficiles à contourner.

Concernant le projet de data-muling, l'appréhension du brouillage ne représente cependant pas un moyen de protection optimal. C'est avant tout une méthode préventive supplémentaire dans un type de scénario particulier. En effet, pour la navigation sous-marine, le brouillage des caméras n'a pas grand intérêt. Et puisque ce type de navigation représente la majeure partie du scénario retenu en fin de projet, cette introduction au brouillage reste un moyen de sensibilisation aux méthodes de brouillage. Et pour cause, nous pourrions nous-mêmes en être victime si par malchance, le GNSS de nos AUVs venait à être perturbé lors des remontées en surface opérées pour effectuer un recalage de position.

A.5.2. Chiffrement des données

A.5.2.1. Introduction

Pour protéger les informations transmises par les robots en cas d'interception, il est nécessaire de chiffrer les données. Dans un premier temps nous allons parler des principes du chiffrement avant d'établir un scénario d'utilisation du chiffrement adapté à notre situation.

A.5.2.2. Chiffrement symétrique

Le premier type de chiffrement, et le plus naturel est le chiffrement symétrique. En chiffrement, on prend généralement l'exemple de d'Alice (A) qui veut envoyer un message à Bob (B) avec potentiellement C qui les espionne. Dans un chiffrement symétrique, on suppose qu'initialement Alice et Bob ont une clef de chiffrement commune que C n'a pas. Alice chiffre son message avec la clef et envoie son message chiffré à Bob qui pourra le déchiffrer avec la clef. Si C intercepte le message, il ne pourra pas le lire.

Un algorithme de chiffrement symétrique très utilisé car très fiable est l'algorithme AES. C'est un algorithme de chiffrement par bloc de 16 octets avec une clef de 128, 192 ou 256 bits. Il nécessite aussi une table de substitution commune entre Alice et Bob, mais cette table (analogue au tambour d'Enigma) n'a pas besoin d'être secrète. Le chiffrement par bloc signifie que le message va être découpé en blocs de 16 octets qui vont être chiffrés indépendamment. En conséquence cet algorithme doit être protégé contre les attaques par texte clair. C'est-à-dire qu'on ne peut aisément retrouver la clef même si l'on a le message chiffré et déchiffré. Si ce n'était pas le cas, la connaissance d'un bloc du message où des hypothèses sur son contenu permettraient le déchiffrement de l'ensemble.

A.5.2.3. Chiffrement asymétrique

Le chiffrement asymétrique, lui, part du principe qu'Alice et Bob n'ont pas de clef en commun. Ils doivent pourtant envoyer un message sans que C ne puisse le comprendre. Dans ce cas, Bob va générer deux clefs, une publique et l'autre privée, l'une permet de chiffrer le message (la clef publique) l'autre de le déchiffrer (la clef privée). Bob envoie la clef publique à Alice, celle-ci l'utilise pour chiffrer son message qu'elle renvoie ensuite à Bob. Bob peut ensuite déchiffrer le message avec sa clef privée. Si C espionne tout l'échange, il ne peut pas déchiffrer le message car il n'a jamais eu accès à la clef privée.

L'algorithme historique du chiffrement asymétrique est l'algorithme RSA qui repose sur la complexité de factoriser de grand nombre. Aujourd'hui on lui préférera des algorithmes reposant

sur des calculs elliptiques qui ont besoin de clef plus courte pour un même niveau de sécurité. De manière générale, ses algorithmes sont très lents, on les utilise souvent de manière hybride avec les algorithmes symétriques : l'algorithme asymétrique envoie la clef de l'algorithme symétrique.

Une faille structurelle des algorithmes asymétriques est l'attaque par l'homme du milieu. Si C se fait passer pour Bob, il peut demander à Alice de lui envoyer le message avec sa propre clef publique. Il peut de surcroît se faire passer pour Alice à Bob pour ne passer inaperçu. Cela nécessite donc de bien authentifier son interlocuteur.

A.5.2.4. Scénario

Dans ce scénario, le but est de transmettre un grand nombre de données par le data-muling. Il ne faut surtout pas que les données tombent dans de mauvaises mains. On suppose que l'on peut transmettre discrètement une petite quantité de données, la clef de chiffrement.

A.5.2.5. Première étape :

En premier lieu on génère une clef de chiffrement AES qu'il faudra transmettre par un autre canal à notre correspondant. Cela peut être directement une clef de 256 bits, ou alors une phrase ou un mot de passe qui une fois passé dans un algorithme de hachage nous donnera notre clef. Une phrase ou un mot de passe serait potentiellement plus facile à transmettre par des moyens humains.

Cette première clef, la clef C1, permet de chiffrer le message M en message M1.

A.5.2.6. Deuxième étape :

On génère aléatoirement une seconde clef AES C2 pour chiffrer M1 en M2. Il est important d'avoir une clef bien aléatoire, il ne faut pas faire de pseudo-aléatoire avec le temps par exemple. On peut par exemple se baser sur du bruit capteur. Le message M2 et sa clef C2 seront tous deux mis dans le premier robot. Le message M2, très lourd, sera stocké dans un disque dur et la clef C2 sera stockée dans la RAM.

A.5.2.7. Troisième étape :

Lors de la transmission des données d'un robot à l'autre, la clef C1 sera transmise par un chiffrement asymétrique et le reste des données M2 sans chiffrement particulier.

A la fin le receveur pourra déchiffrer le message par le procédé inverse. Déchiffré M2 avec C2 et M1 avec C1.

A.5.2.8. Justification du scénario :

Pourquoi faire comme cela ?

Imaginons le cas peu probable qu'un "ennemi" réussisse à piéger un robot et récupérer le message M2 et sa clef C2. Il pourra donc obtenir le message M1. Mais sans C1 transmise par un autre canal, il ne pourra pas déchiffrer le message.

Imaginons maintenant que l'"ennemi" obtienne la clef C1. Il lui faut tout le reste pour avoir le message. S'il souhaite avoir les données il pourrait s'attaquer au robot. Des systèmes de sécurité ont été mis en place pour détruire les données en cas d'interception. Une première chose à faire si

le robot détecte une attaque est l'effacement de la clef C2, cela rendrait toute interprétation du message M2 impossible. Mais si ces systèmes de sécurité ne fonctionnent pas, c'est sûrement parce que l'"ennemi" a réussi à désactiver/débrancher le robot avant l'activation des dits systèmes. Or si la RAM se retrouve débranché, elle perd par la même ses informations, et donc la clef C2 disparaît. Le message restera chiffré.

A.5.3. Destruction des données

Nous nous intéressons dans ce paragraphe à la destruction des données en cas d'interception du drone par une force ennemie. Il est essentiel que les données soient détruites efficacement pour des enjeux évidents de défense. Ce papier explique alors pourquoi un simple formatage du disque ne suffit pas à faire disparaître des données sensibles d'un disque dur.

A.5.3.1. Fonctionnement d'un disque dur

Nous nous intéressons ici aux disques durs mécaniques, les plus classiques, qui s'opposent aux disques durs à semi-conducteurs ou SSD. Un disque dur mécanique est constitué d'un ensemble de plateaux circulaires coaxiaux, et recouverts d'une couche magnétique. Des têtes de lecture-écriture se déplacent à la surface de chaque plateau sur un coussin d'air de l'ordre du micromètre. Un disque dur stocke les informations sous forme binaire grâce aux têtes de lecture-écriture qui sont dites inductives. Elles peuvent polariser la surface du disque en générant un champ magnétique positif ou négatif lors de l'écriture, ou à l'inverse émettre un courant induit lorsqu'elles passent sur une zone polarisée, qu'on peut transformer en message binaire à l'aide d'un convertisseur analogique numérique.

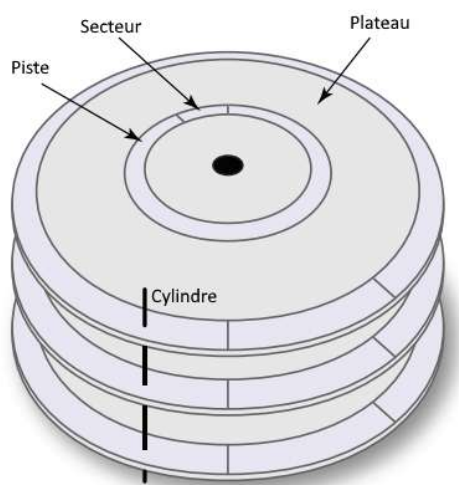


FIGURE A.25. – Schéma d'un disque dur

A.5.3.2. La destruction des données par réécriture ou overwriting

Réécrire une seule fois les données ne suffit pas à faire disparaître toutes les données. En effet, certaines traces des anciennes données peuvent encore être présentes sur le disque même

si la bande magnétique a été réécrite une première fois. Ces experts de la cybersécurité [37] recommandent 5 réécritures (c'est à dire remplacer tout le contenu du disque par des 0 ou des 1 ou une séquences choisie de 0 et de 1) pour des données personnelles, et jusqu'à 11 réécritures pour des données classées secret défense. Le principal défaut est que c'est un procédé très chronophage et dans notre cas d'une interception rapide par des forces ennemies, le robot ne pourra pas réécrire 11 fois son disque. Cette méthode a l'avantage de laisser le disque tout à fait opérationnel et réutilisable à la fin de l'opération, contrairement aux autres méthodes.

A.5.3.3. Le degaussing

Il s'agit d'utiliser un générateur de courant magnétique pour désaligner toutes les polarisations sur les couches magnétiques du disque. C'est un procédé qui nécessite un équipement spécialisé et qui peut endommager le disque, voire le rendre inutilisable dans certains cas. Il peut être difficile de réaliser un degaussing en embarqué, il faudrait envisager de stocker le disque dur dans un générateur de champ magnétique, qu'il suffirait d'activer rapidement en cas d'interception. Cette méthode a aussi l'avantage d'être plus rapide que la réécriture, même si le procédé peut prendre jusqu'à plusieurs minutes. [38]

A.5.3.4. La destruction physique du disque

Cela semble la méthode la plus adaptée à notre scénario pour détruire des données en cas d'interception. Il faut faire attention à ce que la destruction du disque dur soit bien réalisée, une simple noyade du disque ne suffirait pas, par exemple. [39] On pourrait penser à embarquer une charge explosive, située très proche du disque dur, qui se déclencherait en cas d'une interception ennemie afin de détruire le disque et se débarrasser des données.

A.5.3.5. Peut-on récupérer des données effacées ?

En théorie on peut lire partiellement des données d'un disque endommagé grâce à un microscope électronique, qui permet de voir les champs magnétiques induits sur les parties restantes du disque [38]. Cependant les avis ne sont pas tout à fait tranchés quant à l'efficacité de cette méthode au sein même de la communauté scientifique. Certains affirment que l'on peut récupérer des morceaux entiers de disque intacts même après une destruction physique et que l'on peut alors s'en servir pour lire une infime partie des données, qui représente tout de même une menace en cas de données très sensibles. D'autres scientifiques pensent que même avec des fragments de données il est impossible de reconstituer un message cohérent, et donc que ces quelques données fragmentées ne sont d'aucune utilité pour celui qui les récupère.

B. Cahier des charges

B.1. Introduction

Le projet Muling 2021 s'inscrit dans une problématique de transmission de données de façon discrète. En effet, transmettre une grande quantité de données via les canaux classiques (internet, radio. . .) encourt des risques d'interceptions. Pour pallier ce risque, l'usage de drones intelligents autonomes à été envisagé. Ces "mules" ont pour mission de transmettre une certaine quantité de données d'un point A à un point B, tout en évitant d'être interceptés et en détruisant les données le cas échéant.

B.1.1. Contexte du projet

La transmission de données sensibles est une problématique à laquelle font régulièrement face les puissances géopolitiques ou militaires. Nous pouvons par exemple imaginer une transmission d'instructions de fabrication d'équipement militaire entre la France (Bordeaux) et les États-Unis (New York) qui ne voudrait pas être interceptée par des ennemis. Dans ce contexte, nous pouvons donc supposer que de telles puissances voudraient utiliser des solutions innovantes pour répondre à ces problèmes. Nous pouvons également supposer que les budgets disponibles pour le développement de ces solutions seraient conséquents. En 2019, le budget pour l'armement en France est de 50 milliards d'euros/an par exemple, celui des États-Unis est de 731 milliards de dollars/an.

L'idée d'utiliser des drones autonomes plutôt que des agents humains vient du fait que de tels agents peuvent être soumis à de la corruption ou des attaques physiques. À l'inverse des drones suivent un ordre de missions qui pourra être validé par plusieurs parties prenantes et ainsi garantir que la mission se passera de manière planifiée.

B.1.2. Pré-existant

Les drones militaires sont bien répandus dans l'armée de l'air. Certains drones sous-marins sont en développement (Naval Group) ou d'autres pour l'armée de terre (Shark Robotics).

Les projets développés pour la défense et la sécurité, pour le data muling notamment, sont confidentiels, peu de données sont disponibles pour le large public.

B.2. Description technique des besoins client

Pour répondre aux enjeux présentés précédemment, un système de drones pouvant transmettre une grande quantité d'information (plusieurs To), de façon discrète (quasi-indétectable par des

équipements militaires) et de manière sécurisée (détection d'interception et destruction des données) est nécessaire.

Il s'agit d'ouvrir un canal de communication maritime permanent entre un point A et un point B le plus discret possible. S'il vient à être découvert par l'ennemi un jour, il sera démantelé.

B.2.1. Objectifs du projet

Le projet Muling 2021 a pour objectif de développer un démonstrateur de faisabilité (preuve de concept), prouvant la pertinence de l'utilisation de drones pour la transmission de données sensibles. Pour cela, une estimation des ordres de grandeur pertinents sera réalisée (coût, débit, risques, etc.).

Ce démonstrateur fonctionnera sur le principe suivant : une flotte de robots sous-marins (AUV ou Automated Underwater Vehicle) réalisera le transport de données du point A au point B en milieu maritime. Un ensemble de bases fixes ou points de relais seront disposés à intervalles réguliers en mer le long du parallèle reliant Bordeaux à New York où un AUV sera rechargé en permanence. Une chaîne de transmission sera mise en place selon les règles suivantes :

- Chaque AUV est placé à son point de départ (un point de relais maritime pour chaque AUV). Le premier AUV reçoit les données à transmettre selon le moyen choisi (dépôt physique du disque dur, communication filaire ou sans fil).
- Lorsqu'un AUV réceptionne la totalité des données à transmettre, il se déplace en direction de la prochaine base. Il utilisera la totalité de sa batterie pour rejoindre cette base et envoyer les données au prochain AUV. Une communication acoustique (basée sur des bips sonores) permettra à l'AUV émetteur d'ajuster sa trajectoire et d'estimer sa distance à l'AUV récepteur. Une communication visuelle (ondes électromagnétiques dans le domaine du visible) sera utilisée pour transférer la totalité des données de l'AUV émetteur à celui récepteur.
- L'AUV émetteur reste à la base ainsi atteinte pour recharger ses batteries. Pour cela, il utilisera les propriétés thermiques maritimes en réalisant des montées et descentes successives à l'aide de ses ballasts afin de convertir l'énergie thermique en énergie électrique. L'AUV émetteur devient récepteur à son tour et se prépare à partir en cas de transfert de nouvelles données dans le sens opposé.
- Un drone aérien s'occupera de réceptionner en bout de chaîne les données du dernier AUV pour les transporter au point d'arrivée terrestre. Il devra franchir au moins un obstacle tel qu'un mur. Le dernier AUV restera à la dernière base pour se recharger et attendre un nouveau transfert de données dans le sens opposé.

B.2.2. Description du/des produit(s) attendu(s)

Pour ce projet, les livrables suivants sont attendus :

- Un mini cours individuel d'environ 20 minutes sur un sujet en lien avec le data muling ;

- Le cahier des charges ci-présent pour fixer les besoins, objectifs, exigences et contraintes ;
- Un rapport comprenant un petit état de l'art reprenant les mini cours, et détaillant la réalisation pour le projet ;
- Une simulation fonctionnelle sous ROS pour valider la faisabilité du concept de data muling avec une interface graphique sous Gazebo.

Cette simulation comprend à la fois un moteur physique de l'environnement et des observations des capteurs extéroceptifs (photorécepteur, hydrophone), mais aussi la gestion des AUV et de leurs capteurs proprioceptifs (IMU) et actionneurs (moteurs, lumières, transducteur).

B.2.3. Description du/des service(s) attendu(s)

Un transport de plusieurs centaines de To de données sensibles d'une base militaire de Bordeaux (France) à une base militaire de New York (USA) sans être interceptées par l'ennemi.

L'idée du projet est donc de réaliser une preuve de concept de ce transport confidentiel à l'aide d'une simulation et d'expérimentations sur des points techniques délicats.

B.2.4. Description liée aux métiers concernés

Ce projet implique des compétences dans différents domaines :

- Robotique principalement pour les estimations d'état, la modélisation des robots, l'établissement de lois de commande, les tests de faisabilité de certains concepts, etc.
- Développement logiciel pour l'architecture de la simulation, l'utilisation de logiciels adaptés tels que ROS et ses outils de visualisation (RViz et Gazebo).
- Gestion de projet pour l'organisation des tâches, coordonner les équipes et chapoter les décisions techniques.

Les rôles de chacun des membres de l'équipes seront définis dans le rapport final.

B.2.5. Contexte d'utilisation

Cette application de data muling a tout d'abord une visée militaire pour la discrétion du transport de données sensibles. Cette preuve de concept technique vise à convaincre de potentiels clients travaillant dans la défense de mettre en place ce transport de données à travers de longues distances maritimes.

Il s'agirait donc d'un projet confidentiel qui serait utilisé par l'armée ou la défense une à plusieurs fois dans l'année. Une traversée maritime durerait en moyenne un mois selon le nombre de kilomètres à parcourir. Le nombre d'AUV nécessaire pour cette traversée varierait donc également mais serait de l'ordre d'une dizaine.

B.2.6. Description des données (liées au projet)

Les données à transporter d'un point A à un point B sont des données confidentielles encryptées avec le chiffrement RSA. Ces données sont stockées sur un disque dur et ont une taille allant de plusieurs To à plusieurs centaines de To. Les protocoles de communication de ces données d'un AUV à un autre ne sont pas sécurisés et seront réalisés par communication visuelle ou acoustique à une distance de moins de 5 mètres pour maximiser la vitesse de transmission et ne perdre aucune donnée.

Pour ce projet, pour des questions pratiques, les données sont simulées et ne présentent donc aucune confidentialité.

B.2.7. Conditions de mises en œuvre et de déploiement

Le système doit être intégré sous ROS 1 ou 2 pour faciliter la communication entre les différentes parties et centraliser l'affichage de la simulation sous Rviz ou Gazebo. Plusieurs nœuds seront créés et s'interfaceront à l'aide de topics ou de fichiers de log pour l'affichage des éléments en simulation. Un fichier README sera réalisé pour décrire comment installer et utiliser le package ROS ainsi créé.

Quelques expériences de faisabilité seront réalisées ou du moins la faisabilité de certains concepts techniques (communication visuelle, rendez-vous entre deux AUV à un point relais) sera prouvée par une recherche de l'existant.

Les conditions de mise en œuvre et de déploiement en situation réelle ne font pas partie de ce projet.

B.2.8. Exigences techniques et fonctionnelles

B.2.8.1. Contraintes

ID	Description
C_1	Établissement et validation d'un cahier des charges
C_2	Réalisation d'un démonstrateur de faisabilité (simulateur avec preuves de concept)
C_3	Langage informatique et framework : C++, Python, ROS
C_4	Logiciel de simulation : RViz ou Gazebo

TABLE B.1. – Contraintes du projet

B.2.8.2. Exigences non fonctionnelles du/des produits

ID	Description
ENF_1	Rendu d'un rapport technique rédigé en Latex
ENF_2	Rédaction d'un état de l'art
ENF_3	Rédaction d'un cahier des charges
ENF_4	Réalisation d'une vidéo de démonstration de faisabilité
ENF_5	Utilisation d'un dépôt Git/Github pour le versionnage du code

TABLE B.2. – Exigences non fonctionnelles du projet

B.2.8.3. Exigences fonctionnelles du/des produits

ID	Description
EF_1	Le système doit permettre la transmission de données d'un point A à un point B séparés de plusieurs milliers de km et traversant différents milieux (terrestre, aérien, maritime).
EF_2	Le système doit permettre la transmission de données sans interception. En cas d'interception, les données ne doivent pas être lisibles par l'ennemi.
EF_3	Les données doivent être transportées par des mules intelligentes sans intervention humaine.
EF_4	Les mules doivent pouvoir se rejoindre et transmettre leurs données sans être interceptées.
EF_5	Les mules doivent pouvoir naviguer dans des environnements inconnus de façon autonome.
EF_6	Les mules doivent pouvoir gérer leur batterie de façon autonome.

TABLE B.3. – Exigences fonctionnelles du système

B.3. Exigences portant sur la conduite du projet**B.3.1. Durée du projet**

Le projet complet débute le 20 Septembre 2021, et la phase 1 se termine le 06 décembre 2021. La phase 2 débute le 04 janvier 2022 et sera clôturée par une soutenance le XX février 2022.

B.3.2. Critères d'acceptation finale du produit

Le simulateur est considéré comme acceptable s'il est fonctionnel, c'est-à-dire s'il réalise le transport discret de données d'un point A à un point B dans un milieu hybride maritime/aérien, et présente tous les éléments mentionnés dans ce cahier des charges.

B.3.3. Structuration du projet, reporting clients

Un reporting bimensuel est réalisé avec le client M. Jaulin pour vérifier l'avancement du projet, valider sa cohérence ou au contraire le rediriger dans de nouvelles directions.

B.3.4. Contraintes de coûts, délais, ressources

Il n'y a pas de budget financier pour ce projet. La durée du projet est fixée à 21 semaines. La réalisation du projet a été budgétée à 84 heures d'effort réparties sur 21 semaines de travail pour 18 personnes, soit l'ensemble de la filière robotique de 3A.

B.3.5. Gestion des configurations

La gestion des versions du produit réalisé est effectuée grâce au dépôt Github créé sur le GitLab de l'ENSTA Bretagne. Chaque branche est dédiée à une tâche spécifique et une architecture de dossiers est respectée, ce qui sera détaillé dans le rapport final.

B.4. Exécution du contrat

B.4.1. Prestations prévues

Ce projet vise à concevoir et implémenter une simulation du système décrit et spécifié dans ce document sous le middleware ROS. La visualisation de la simulation du système se fera sous RViz ou Gazebo afin d'en extraire une vidéo démontrant la faisabilité du système imaginé.

La présentation de cette vidéo au client se fera lors de la soutenance finale du projet le 25 février 2022 en présence du client et de tous les membres de l'équipe.

B.4.2. Livrables

Le code de la simulation (dépôt Gitlab) ainsi que la vidéo extraite de la simulation seront remis au client.

Un rapport technique sur les détails de la conception et de l'implémentation logicielle de la simulation sera rendu ainsi que le présent cahier des charges en annexe du rapport.