

UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

DOMAINE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIÈRE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

**CONCEPTION ET REALISATION D'UN
MUNI SOUS MARIN AUTONOME POUR
L'EXPLORATION SOUS MARINE
(Cas du lac KIVU)**

Par : KAMBALE BARUNGU Toussaint

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
de Licence en Faculté de Sciences de l'Ingénieur

Option : Génie Mécanique

Directeur : Prof. Olivier BARAKA MUSHAGE

ANNEE ACADEMIQUE 2024 - 2025

Epigraphe

« La mer est le seul espoir de l'humanité. L'ignorer, c'est se condamner »

Jacques Yves COUSTEAU

Dédicace

À mes parents Albert BARUNGU et NKUO Justine

KAMBALE BARUNGU Toussaint

Remerciements

Nos premiers mots de gratitude sont adressés à l'Éternel Dieu Tout-Puissant, Maître du temps et des circonstances.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance envers l'Université Libre des Pays des Grands Lacs (ULPGL-Goma), en particulier envers la Faculté des Sciences et Technologies (FST). À cet égard, nous souhaitons transmettre nos remerciements les plus sincères à l'ensemble du personnel académique, scientifique et administratif de notre chère faculté.

Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans l'inspiration et l'orientation précieuses que j'ai reçues. Nous tenons à exprimer ma gratitude envers le Professeur Dr. BARAKA MUSHAGE Olivier, qui, malgré ses nombreuses responsabilités, a accepté de superviser ce travail. Sa guidance a renforcé ma capacité de recherche et d'adaptation.

Nous tenons également à remercier chaleureusement, Ir. Anderson MUSANGANYA, et Ir. Déogratias BARUNGU pour leurs observations pertinentes et leurs conseils multiples qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce travail.

Nous souhaitons adresser des remerciements spéciaux à nos parents, Albert BARUNGU et NKUO Justine, ainsi qu'à ma sœur, Arlette, et à mes frères, Déogratias, Patrick, Chadrack, Christophe, Constant, Blaise, pour leur soutien inébranlable tout au long de mon parcours. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous ceux qui m'ont accompagné et soutenu de diverses manières au cours de ma formation académique, notamment ma cher tante ATOSHA BARUNGU MUKONDO JP, LUKAMBO Emery, MUKONDO Trésor, Docteur KAMALA ainsi que toutes les personnes dont le nom n'a pas été mentionné ici. Votre soutien et votre présence ont été d'une grande importance pour moi tout au long de cette aventure académique

Résumé

Ce travail s'est attaché à la **conception et à la réalisation d'un prototype de mini sous-marin autonome**, pensé spécifiquement pour explorer le lac Kivu. Notre objectif était de proposer une solution locale et économique face au manque criant d'outils d'exploration subaquatique adaptés et abordables pour les profondeurs de ce lac unique. Nous avons relevé le défi de développer un submersible qui soit à la fois **simple, robuste, parfaitement étanche et pleinement opérationnel, garantissant la sécurité des opérations**, une autonomie énergétique nécessaire et une collecte de données fiable, le tout avec une maîtrise des coûts.

Notre démarche a consisté en une recherche approfondie, des analyses théoriques (sur la flottabilité et la résistance de la coque), une conception assistée par ordinateur et des expérimentations concrètes. Le cœur de notre maquette est un microcontrôleur polyvalent, qui gère la propulsion et un système de ballast innovant pour un contrôle précis de l'immersion. La coque, fabriquée dans un matériau facilement accessible et optimisé, assure une étanchéité impeccable et une résistance suffisante pour les profondeurs du mixolimnion du lac. Une source d'énergie embarquée lui confère une autonomie appréciable pour les missions. La collecte d'informations visuelles et de données se fait grâce à une caméra intégrée et un système de communication intelligent : sans fil en surface pour le temps réel, et enregistrement embarqué pour les plongées plus profondes.

Les essais ont confirmé le succès de ce projet, prouvant la capacité de la maquette à contrôler sa flottabilité, sa propulsion et son orientation, ainsi que la fiabilité de son système de commande et de collecte de données. Ce travail novateur démontre qu'une approche locale et économique peut aboutir à des solutions efficaces en robotique sous-marine. Il contribue de manière significative à la recherche scientifique et à la surveillance environnementale du lac Kivu, ouvrant la voie à des explorations futures plus ambitieuses de cet écosystème exceptionnel.

Abstract

This study focused on the **design and realization of an autonomous mini-submarine prototype**, specifically tailored for the exploration of Lake Kivu. Our aim was to provide a local and cost-effective solution to the critical lack of suitable and affordable subaquatic exploration tools for the depths of this unique lake. We tackled the challenge of developing a submersible that is simultaneously **simple, robust, perfectly watertight, and fully functional**, ensuring operational safety, necessary energy autonomy, and reliable data collection, all while maintaining strict cost control.

Our approach involved extensive research, theoretical analyses (on buoyancy and hull resistance), innovative computer-aided design, and concrete experimentation. At the core of our prototype is a versatile microcontroller, which manages propulsion and an innovative ballast system for precise immersion control. The hull, crafted from an easily accessible and optimized material, ensures impeccable watertightness and sufficient resistance for the mixolimnion depths of the lake. An onboard power source provides substantial autonomy for missions. Visual information and data collection are performed via an integrated camera and a smart communication strategy: wireless on the surface for real-time interaction, and onboard recording for deeper dives.

Experiments confirmed the project's success, demonstrating the prototype's ability to control its buoyancy, propulsion, and orientation, as well as the reliability of its control and data collection system. This pioneering work shows that a local and cost-effective approach can lead to effective solutions in subaquatic robotics. It makes a significant contribution to scientific research and environmental monitoring of Lake Kivu, paving the way for more ambitious future explorations of this exceptional ecosystem.

Sommaire

UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS	
Epigraphe	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Sommaire	vi
Liste des abréviations	x
Liste des symboles et unité de mesure	xi
Symboles utilisés	xi
Unités de mesure utilisées	xi
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xiv
0. Introduction générale	1
0.1. Contexte/Généralités sur le thème	1
0.2. Identification et formulation du problème	1
0.3. Questions de recherche	2
0.4. Formulation des hypothèses	2
0.5. Justification du choix du sujet et motivations	4
0.6. Énoncé des objectifs de recherche	5
0.6.1. L'objectif général	5
0.6.2. Les objectifs opérationnels/spécifiques	5
0.7. Méthodologie et délimitation du travail	5

0.8 Structure du mémoire.....	6
Chapitre 1 PRESENTATION DU LAC KIVU ET GENERALITES SUR LES SOUS-MARINS	8
1.1 Présentation géographique du lac Kivu	8
1.1.1 Situation géographique	8
1.1.2 Morphologie et stratification.....	10
1.2 Les véhicules sous-marins	13
1.2.1 Historique.....	13
1.2.2 Classification.....	15
1.3 Domaine de la robotique sous-marine	24
1.3.1 Domaine civil.....	24
1.3.2 L'industrie.....	24
1.3.3 L'environnement.....	25
1.3.4 Les applications scientifiques	25
1.3.5 Domaine militaire	26
1.4 Conclusion partielle	27
Chapitre 2 CONCEPTION, EXPLORATION DES TECHNOLOGIES UTILISEES ET LEUR FONCTIONNEMENT	28
2.1 Principe de Flottabilité.....	28
2.1.1 Modélisation de l'action exercée par l'eau	28
2.1.2 Contraintes de pression et choix de la coque (PVC).....	32
2.2 Le Système de Ballast.....	35
2.2.1 Principe de fonctionnement	35
2.2.2 Simulation du remplissage des ballast	36
2.3 La Propulsion	42
2.3.1 Classification des moteurs pour systèmes immergés.....	42
2.3.2 Constitution du système de propulsion.....	44
2.3.3 Principe physique de la propulsion.....	50

2.3.4	Force de traînée hydrodynamique.....	50
2.3.5	Puissance nécessaire pour vaincre la traînée	51
2.3.6	Puissance réelle fournie par le moteur	51
2.3.7	Condition de déplacement du sous-marin.....	52
2.3.8	Choix du moteur et justification	52
2.3.9	Gouvernail et manœuvrabilité.....	53
2.4	Le Système de commande	56
2.5	L’Alimentation.....	62
2.5.1	Rôle de l’alimentation électrique	62
2.5.2	Critères de choix d’une alimentation électrique	62
	• Les batteries NiMH (Nickel- Métal Hydrure) ; bien que stables et sure présente une densité énergétique faible, ce qui limite leur autonomie [23].....	63
2.6	La Communication et Vidéo	63
2.6.1	Stratégie de communication.....	64
2.6.2	Mode de communication.....	65
2.6.3	Application à notre système.....	65
2.6.4	Critère de performances d’une communication.....	66
2.7	Conclusion partielle	69
Chapitre 3 RÉALISATION ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU MINI SOUS MARIN		70
3.1	Architecture système et schéma bloc fonctionnel.....	70
3.2	Sélection et Dimensionnement des Composants	71
3.2.1	Alimentation	72
3.2.2	Capteurs	73
3.2.3	Actionneurs	74
3.3	Intégration Mécanique et Conception de la Coque.....	78
3.3.1	Conception de la coque	78
3.3.2	Simulation hydrodynamique.....	79

3.3.3	Emplacement des composants	81
3.4	Schémas de câblage électronique.....	81
3.4.1	Schéma de connexion de l'ESP32-CAM.....	82
3.4.2	Schéma du circuit de puissance	83
3.5	Conclusion partielle	84
	Conclusion générale.....	85
	Contributions.....	86
	Critique du travail	87
	Travaux futurs de recherche/Perspectives	87
	Bibliographie.....	89
	Annexe A Démonstrations.....	92
A.1	Calcul de la pression critique de la coque.....	92
	Cas 1 : épaisseur $t=2.5\text{mm}$	92
	Cas 2 : épaisseur $t= 3\text{mm}$	93
A .2	Autre formule de la pression critique du PVC.....	93
	Annexe B Algorithmes	94
B.1	Code de simulation du remplissage du réservoir 1	94
B.2	Code de simulation de remplissage de ballasts.....	96
B.3	Code de l'ESP32 CAM.....	97
B.4	Code de la simulation du fluide autour du prototype.....	107
	Annexe C Coût du prototype et Bref aperçu de l'application	111
C.1	Cout du prototype	111
C.2	Bref aperçu de l'application.....	113
	Annexe D Photos du prototype.....	114

Liste des abréviations

- * AUV : Autonomous Under water Vehicle (Véhicule Sous-marin Autonome)
- * BMS : Battery Management System (Système de gestion de batterie)
- * CAO : Conception Assistée par Ordinateur
- * CH₄ : Méthane
- * CO₂ : Dioxyde de Carbone
- * DC : Direct Current (Courant continu)
- * ESP32-CAM : Carte de contrôle à microcontrôleur avec caméra intégrée
- * FSI : Faculté des Sciences de l'Ingénieur
- * GPIO : General Purpose Input/Output (Broches d'entrée/sortie à usage général)
- * H₂S : Sulfure d'hydrogène
- * I2C / SPI / UART : Protocoles de communication pour capteurs
- * IMU : Inertial Measurement Unit (Centrale inertielle)
- * LiPo / Li-Po : Lithium-Polymère (Type de batterie)
- * NiMH : Nickel-Métal Hydrure (Type de batterie)
- * PVC : Polychlorure de vinyle
- * PWM : Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)
- * ROV: Remotely Operated Vehicle (Robot téléopéré)
- * UUV : Unmanned Under water Vehicle (Véhicule sous-marin non habité)

Liste des symboles et unité de mesure

Symboles utilisés

- * C : Capacité du canal
- * CD : Coefficient de traînée
- * D ou De : Diamètre extérieur de la coque
- * E : Module de Young
- * FD : Force de traînée
- * Fctrl : Force latérale de contrôle
- * g : Accélération de la pesanteur
- * h : Profondeur ou hauteur
- * L : Bras de levier (distance centre de gravité - surface de contrôle)
- * m : Masse totale du sous-marin
- * P : Pression ou Poids
- * pcr : Pression critique de flambage
- * R : Rayon ou Constante des gaz parfaits
- * s : Coefficient de sécurité
- * S : Surface
- * t : Épaisseur de la coque
- * V : Volume
- * ρ (rho) : Masse volumique du fluide (eau)
- * σ (sigma) : Contrainte (admissible ou de traction)
- * ν (nu) : Coefficient de Poisson

Unités de mesure utilisées

- * A / mAh : Ampère / Milliampère-heure (intensité et capacité électrique)
- * bar / MPa / Pa: Bar / Megapascals / Pascal (pression)

- * bps : Bits par seconde (débit de données)
- * Hz : Hertz (fréquence / bande passante)
- * kg/m^3 : Kilogramme par mètre cube (masse volumique)
- * km^2 : Kilomètre carré (superficie)
- * L : Litre (volume)
- * m / mm : Mètre / Millimètre (longueur/profondeur)
- * m^3 : Mètre cube (volume d'eau)
- * N : Newton (force)
- * nœud : Unité de vitesse maritime
- * s : Seconde (temps)
- * V : Volt (tension électrique)
- * W : Watt (puissance)

Liste des tableaux

Tableau 1 Classification des planeurs.....	21
Tableau 2 Classification des UUV suivant différents paramètres	23
Tableau 3 Paramètres techniques du PVC utilisé	33
Tableau 4 Cout du prototype.....	111

Liste des figures

Figure 1-1 Cartographie du lac Kivu	9
Figure 1-2 Le sous-marin de Van Drebell	14
Figure 1-3 Le sous-marin de Bushnell.....	14
Figure 1-4 Submersible.....	16
Figure 1-5 SPURV	17
Figure 1-6 Epaulard	17
Figure 1-7 ROV d'intervention	19
Figure 1-8 ROV d'observation	19
Figure 1-9 UUV1	20
Figure 1-10 UUV2.....	20
Figure 1-11 Slocum, Seaglider et Spray	21
Figure 1-12 Le robot thon	23
Figure 1-13 le robot anguille salamandre	23
Figure 1-14Le K-Ster à l 'approche d'une mine de fond.....	25
Figure 1-15 Sous-marin militaire.....	27
Figure 2-1 Forces exercées par l'eau sur la carène du navire	29
Figure 2-2 Temps du remplissage du réservoir interne	39
Figure 2-3 Remplissage du réservoir interne	40
Figure 2-4 Transfert air réservoir vers ballasts	41
Figure 2-5Constitution générale du système de propulsion.....	44
Figure 2-6 Illustration de l'helice coté sous format solidworks	45
Figure 2-7 Arbre de tansmission reliant le servomoteur au Gouvernail	48
Figure 2-8 Gouvernail.....	49
Figure 2-9 Dessin ensemble du sous-marin	56
Figure 2-10 Schéma fonctionnel du système de commande du sous-marin d'exploitation	61
Figure 3-1Architecture du prototype	71
Figure 3-2 Structure de l'alimentation.....	73

Figure 3-3 Propulsion (moteur et hélice)	75
Figure 3-4 Schéma hydraulique (schéma électrovannes & ballasts)	76
Figure 3-5 Schéma du système de direction	77
Figure 3-6 Composition générale du système de direction.....	78
Figure 3-7Flow simulation.....	80
Figure 3-8 Schéma de câblage de l'ESP32-CAM.....	82
Figure 3-9 Schémas électriques du sous-marin	84

0. Introduction générale

0.1. Contexte/Généralités sur le thème

Depuis des siècles, l'homme s'efforce de comprendre et d'explorer les vastes étendues marines. Si la navigation en surface est aujourd'hui bien maîtrisée, l'exploration des profondeurs marines reste un défi majeur, en raison des conditions extrêmes, notamment la pression et l'obscurité. Ces milieux hostiles, mais riches en biodiversité et en ressources, suscitent un intérêt croissant tant pour la recherche scientifique que pour les applications industrielles et militaires. Dans ce contexte, les véhicules sous-marins, notamment les drones ou robots autonomes, sont devenus des outils indispensables [1].

0.2. Identification et formulation du problème

L'exploration et la surveillance des fonds marins posent de nombreux défis techniques et logistiques. Les plongeurs humains ont des capacités limitées en termes de profondeur, de temps et de sécurité. De plus, certaines zones sont inaccessibles ou dangereuses. Face à ces limitations, il devient nécessaire de concevoir des systèmes autonomes capables d'intervenir efficacement dans ces environnements.

Le lac Kivu situé dans une zone volcanique active, possède une grande profondeur et contient des gaz dissous dangereux (comme le méthane et le dioxyde de carbone) à certaines couches. Pourtant peu d'études pratiques ont été menées sur son fond, à cause du manque de moyens techniques adaptés à l'exploration sous-marines en milieu lacustre profond dans un pays en développement.

Dans ce contexte, la conception d'un AUV (Autonomous Under water Véhicule) de petite taille offre une solution agile, économique et sécurisée pour la collecte de données

environnementales et la surveillance des écosystèmes aquatiques sans intervention humaine direct.

0.3. Questions de recherche

Ce travail est basé sur la question principale suivante : **Comment concevoir une maquette de mini sous-marin simple, étanche, stable et fonctionnel, capable d'explorer les grandes profondeurs du lac Kivu en assurant la sécurité, l'autonomie énergétique, la transmission de données en temps réel et à faible coût ?**

A cette question s'ajoute les questions supplémentaires d'ordre technique suivantes

- Quels matériaux locaux ou accessible peut -on utiliser pour fabriquer la coque du sous-marin afin qu'elle résiste à la pression et reste étanche ?
- Comment assurer la communication entre le sous-marin et la surface du lac malgré les limites de transmission sous l'eau ?
- Quelles technologies simples à utiliser pour capter et enregistrer les images ou les données à des profondeurs considérables ?

0.4. Formulation des hypothèses

- Un mini sous-marin autonome, bien conçu, pourrait atteindre une bonne autonomie de batterie pour des missions longues, tout en naviguant efficacement dans les environnements complexes du Lac Kivu (variation de profondeur, pression, etc.).
- L'intégration de capteurs et de technologies de navigation avancées (tels que l'odomètre, les sonars, ou GPS sous-marin) permettrait une communication et une navigation précise, même dans des environnements de faible visibilité.

• Leur utilisation contribuerait à réduire les risques humains tout en augmentant l'efficacité des opérations sous-marines.

Ces hypothèses peuvent être testées principalement par :

- ✓ **Des calculs théoriques** (résistance des matériaux, poussées d'Archimède, équilibrage énergie nécessaire)
- ✓ **Des expérimentations pratiques** (tests de flottabilité, d'étanchéité, de manœuvrabilité)
- ✓ **Des simulations en logiciel** (SolidWorks, Matlab, Proteus) et **expérimentations** (prototype en maquette)

0.5. Justification du choix du sujet et motivations

Le choix de ce sujet découle **d'un intérêt personnel fort pour les technologies mécaniques appliquées à l'exploration** ainsi que d'une **volonté d'innovation dans un contexte locale**.

Le projet de concevoir un prototype de sous-marin d'exploration répond à un besoin concret d'observer et de mieux comprendre les fonds du lac Kivu, un milieu naturel à la fois mystérieux et potentiellement dangereux. Cette réalisation représente un défi technique stimulant et formateur, intégrant des compétences en mécanique, flottabilité, automatisation et électronique embarquée.

Ce travail revêt un intérêt scientifique majeur, car il mobilise plusieurs disciplines de l'ingénierie : la mécanique des fluides (poussée d'Archimède, résistance à la pression), la Conception Assistée par Ordinateur (modélisation de la maquette), l'électronique embarquée, ainsi que les systèmes d'énergie autonome (alimentation et batteries). Il permet de proposer des solutions techniques adaptées à un environnement particulier : le **lac Kivu**. Ce projet pourrait servir de base à d'autres recherches futures en robotique subaquatique (au sein de l'université) en environnement ou en énergie marine.

Le lac Kivu est un écosystème sensible et stratégique pour les populations riveraines. Cependant, il est **peu exploré en profondeur**, notamment à cause du manque d'équipements. La conception d'**une maquette de sous-marin simple, et réalisable avec des matériaux accessibles**, ouvre la voie à des initiatives de surveillance environnementales, de prévention des risques liées aux gaz dissous (méthane, CO₂), et de développement compétences techniques chez les jeunes. Ce projet s'inscrit donc dans une logique de valorisation **des savoir-faire locaux** et de contribution au **bien-être collectif** par la science et la technologie.

0.6. Énoncé des objectifs de recherche

0.6.1. L'objectif général

Concevoir et réaliser un prototype fonctionnel de sous-marin miniature capable d'explorer les profondeurs du lac Kivu avec des matériaux accessibles localement.

0.6.2. Les objectifs opérationnels/spécifiques

- Analyser les contraintes mécaniques, environnementales et techniques propres à l'exploration sous-marine dans le contexte du lac Kivu.
- Sélectionner des matériaux accessibles et adaptés capables de résister à la pression de 7 bars selon correspondant à la profondeur cible et à l'humidité, tout en assurant la flottabilité de la maquette.
- Concevoir et dimensionner un système de ballast à base d'ouverture sur la coque permettant le contrôle du sous-marin.
- Intégrer un système de commande embarqué (électronique, alimentation, camera) assurant le pilotage et la collecte de données.
- Réaliser un prototype fonctionnel à échelle réduite et expérimenter son comportement en condition réelles pour évaluer sa performance et sa fiabilité.

0.7. Méthodologie et délimitation du travail

Ce travail mobilise quatre approches scientifiques complémentaires : la technique documentaire, la méthode analytique, la technique de conception assistée, et la méthode expérimentale.

- **Technique documentaire** : Une recherche bibliographique est menée pour collecter des informations issues de sources scientifiques et techniques sur la conception de sous-marins miniatures, les systèmes de flottabilité, et les contraintes spécifiques à l'exploration du lac Kivu.

- **Méthode analytique** : Les données recueillies permettent une analyse des besoins débouchant sur un cahier des charges détaillé. Des calculs théoriques sont ensuite réalisés pour modéliser les principales forces physiques (poussée, stabilité, masse volumique) et dimensionner le système de ballast.
- **Technique de conception assistée** : La modélisation du prototype est effectuée à l'aide d'un logiciel de CAO (SolidWorks), facilitant l'optimisation de la structure et l'organisation des composants.
- **Méthode expérimentale** : Le prototype est construit avec des matériaux accessibles localement, puis équipé de modules électroniques embarqués. Des tests en conditions simulées ou réelles sont menés pour évaluer l'étanchéité, la stabilité, la manœuvrabilité et l'autonomie du système.

Parlant de la délimitation le présent travail se limite à la conception, la modélisation et la fabrication et l'expérimentation d'une maquette réduite de sous-marin d'exploration destiné à fonctionner dans les eaux du lac Kivu. Il n'inclut pas l'exploration à très grande profondeurs ni l'intégration de communication complexes (acoustiques, satellites...) .de même, l'analyse des données environnementales collectés par le sous-marin (température, gaz . . .) ne fait pas partie du périmètre de ce sujet. Le travail ne vise pas non plus la production industrielle ou la commercialisation du prototype, mais s'inscrit plutôt dans une logique de recherche expérimentale et d'innovation pédagogique. L'objectif principale reste donc de valider la faisabilité technique d'un sous-marin simple autonome et peu coûteux, réalisable avec des matériaux accessibles dans un contexte local.

0.8 Structure du mémoire

En plus d'une introduction et conclusion générales, ce travail comprend :

- Le chapitre 1 qui présente un état de l'art sur les véhicules sous-marins et leur historique et classification.

- Le chapitre 2 qui aborde la conception, l'exploration des technologies utilisées et leur fonctionnement.
- Le chapitre 3 qui décrit le prototype et sa réalisation.

Chapitre 1

PRESENTATION DU LAC KIVU ET GENERALITES SUR LES SOUS-MARINS

L'exploration des fonds marins demeure un défi majeur, contrairement à la navigation de surface aujourd'hui bien maîtrisée. Plus de la moitié des fonds océaniques dépasse 3 000 mètres de profondeur, et la fosse des Mariannes, dans le Pacifique nord-ouest, atteint près de 11 000 mètres. Ces milieux d'extrêmes pression élevée, obscurité, froid, rendent toute intervention humaine directe difficile. Face à ces conditions, les robots sous-marins représentent une solution incontournable. On distingue principalement les ROV (robots téléopérés reliés à un navire) et les AUV (véhicules autonomes sans liaison directe). Leur capacité à accéder à des zones inaccessibles, à effectuer des tâches précises et à transmettre des données en temps réel est un atout considérable. Ces engins sont aujourd'hui utilisés dans de nombreux domaines : cartographie des fonds, inspection de pipelines ou de structures nucléaires, recherche archéologique ou environnementale, détection de pollution, et opérations militaires comme la détection de mines ou la surveillance côtière [2].

1.1 Présentation géographique du lac Kivu

1.1.1 Situation géographique

Le lac Kivu, d'une superficie de 2 412 km², se situe dans la faille du Rift Albertine, ce qui explique sa grande profondeur de 240 m en moyenne, une profondeur maximale de 485 m et son bassin escarpé. Il est divisé par la grande île Idjwi (279 km²) et contient plus 560 milliards de m³ d'eau. Le Lac Kivu se situe à une altitude de 1 462 m au-dessus du niveau de la mer et ses bassins-versants environnants peuvent atteindre une altitude maximale de 4 507 m [3].



Figure 1-1 Cartographie du lac Kivu

1.1.2 Morphologie et stratification

Le lac Kivu est un lac méromictique en ce sens que les eaux de surface et ceux des couches profondes ne se mélangent jamais, ceci principalement en raison de sa grande profondeur et sa faible exposition aux vents, le lac étant situé entre deux massifs montagneux. L'eau du lac est relativement alcaline, le Ph variant entre 9.47 à la surface et 6.02 à la profondeur maximale, avec une acidification progressive au fur et à mesure que l'on s'approche des grandes profondeurs. Les études menées indiquent que les gaz et éléments dissous dans l'eau proviennent de l'interaction entre la roche et l'eau et l'altération chimique des roches volcaniques qui sont les principaux constituants de sa fondation [3].

Les caractéristiques du lac sont généralement présentées sous forme de stratification/gradients verticaux, l'étude d'experts sur le lac Kivu validé par les deux pays riverains (RDC, RWANDA), divisant le lac en quatre zones à savoir :

- **La biozone** composée d'une zone supérieure oxygénée d'environ 60 m riche en biomasse algale (phytoplancton) nourrissant le zooplancton et les poissons. La profondeur de cette zone variant selon les saisons, la zone connaît un brassage et une homogénéisation pendant la saison sèche et est fortement stratifiée pendant la saison des pluies avec une oxygénation plus réduite jusqu'à environ 45 m, accompagnée d'une réduction de la température et du (thermocline saisonnier). La densité de l'eau augmente rapidement depuis 60 m jusqu'à 85-120m de profondeur en raison de l'augmentation de la pression mais aussi de la concentration des gaz dissous tels que le sulfure d'hydrogène (H₂S), le méthane (CH₄) et le dioxyde de carbone (CO₂) ;
- **La zone intermédiaire** dans laquelle la concentration de ces gaz augmente sensiblement depuis (-120m à -200 m) ;
- **La zone de ressources** à partir de laquelle la concentration de méthane est jugée exploitable (-200 m à environ -270 m) est considéré comme celle renfermant la plus

grande concentration de méthane et étant aussi riche en dioxyde de carbone, de sels et de nutriments ;

- Les gradients du lac se terminent avec **la zone de faibles ressources** au-delà de 270 m de profondeur où l'exploitation des ressources n'est plus économiquement rentable. [3]

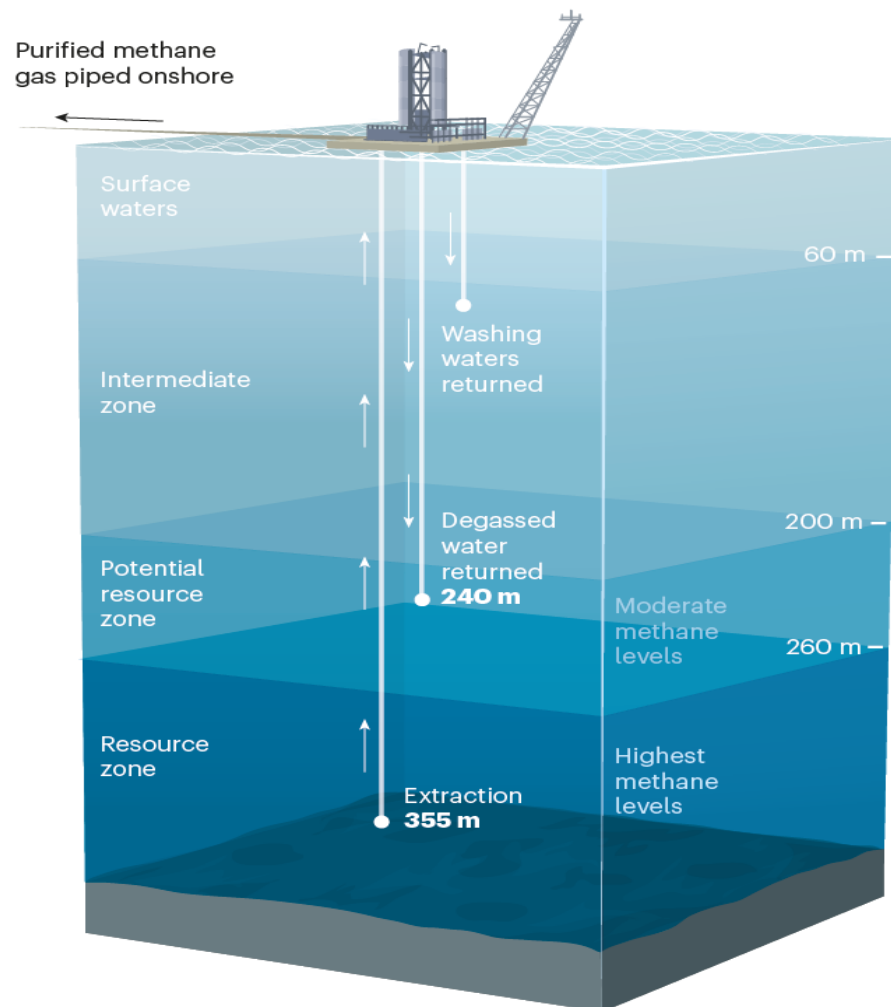


Figure 1-2 Infographie scientifique du fonctionnement du projet KivuWatt montrant la stratification du lac Kivu

Cette stratification verticale n'est cependant pas uniforme sur toute la surface du lac qui peut être partagé en cinq zones présentant des concentrations de pH différents liés aux concentrations de sels et de gaz différents eux aussi. Ainsi une étude a été conduite par des géophysiciens de 2004 à 2007 examinant la distribution des compositions chimiques et isotopiques de l'eau et des gaz dissous le long de colonnes verticales d'eau dans cinq sous-bassins du lac, partie RDC. Cette étude indique des compositions chimiques différentes verticalement mais aussi suivant les différents sous-bassins en raison :

- i. Du mouvement du système des fluides contenant du CO₂ magmatique qui alimente l'énorme réservoir de CO₂ (CH₄) contenu dans les eaux profondes du lac,
- ii. Des variations spatiales et d'espèces de la distribution de la biomasse et
- iii. Des solutions issues des interactions eau-roches.

Cette stratification peut se faire autrement en considérant deux grandes parties le **mixolimnion** et le **monimolimnion** séparée par une zone de transition chimique appelée **chimiocline**

1) Le **Mixolimnion** (La couche supérieure) [4]

Le mixolimnion représente la couche d'eau superficielle, s'étendant de la surface jusqu'à environ 60 mètres de profondeur. Les eaux sont régulièrement mélangées par des vents et les variations de températures

- Propriétés physiques : Cette zone est aérée (oxygénée) et sa densité est proche de celle de l'eau douce standard (1000 \, kg/m³).
- Impact sur la conception : C'est dans cette couche que les tests de flottabilité et de navigation en surface seront effectués. La pénétration de la lumière y est optimale, facilitant le travail de l'ESP32-CAM.

2) Le Monimolimnion

Le monimolimnion constitue la masse d'eau profonde qui s'étend de 60 mètres jusqu'au fond du lac (485 mètres). Une eau qui ne mélange jamais avec les couches supérieures en raison de différences de densité [5].

- Propriétés chimiques : Cette zone est anoxique (absence d'oxygène) et se caractérise par une accumulation massive de gaz dissous, principalement le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4), ainsi que des sels minéraux.
- Contraintes d'ingénierie :
 - a. Densité accrue : La forte minéralisation rend l'eau plus dense, ce qui augmente la poussée d'Archimède. Notre système de lestage doit être calculé pour compenser cette poussée afin de permettre la descente dans les profondeurs.
 - b. Corrosion : La présence de gaz et de minéraux crée un milieu chimiquement agressif. Cela justifie le choix du PVC (spécifier dans le chapitre 2) pour le corps et de l'acier inoxydable pour les pièces métalliques exposées (vis de fixation).
 - c. Pression : Le monimolimnion impose une pression hydrostatique croissante, ce qui valide nos calculs de résistance sur le diamètre du tube PVC (spécifier dans le chapitre 2).

1.2 Les véhicules sous-marins

1.2.1 Historique

Le concept de véhicule sous-marin n'est pas une idée récente. Le premier projet remonte à William Bourne en 1578. Il a été le premier à concevoir une construction étanche pouvant être alimentée en oxygène. En 1664, Cornelis Van Drebbel a proposé le premier véhicule sous-

marin avançant à l'aide de 12 rameurs équipés de rames spéciales la figure (1) montre le sous-marin de Van Drebell [6] [7].

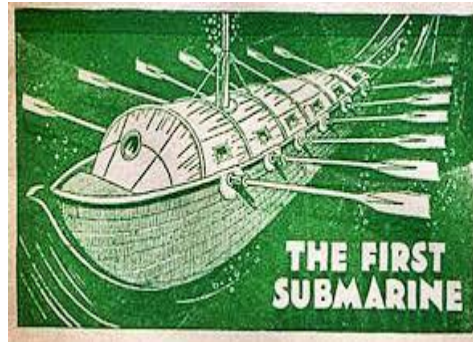


Figure 1-2 Le sous-marin de Van Drebell

Il pouvait être actionné de façon à réaliser des mouvements verticaux. Ce bateau était en bois de forme ovoïde et a été testé expérimentalement. En 1776, David Bushnell et son frère ont présenté le premier sous-marin "Turtle" construit en acier. Son principe de fonctionnement est similaire aux sous-marins actuels. Il utilisait une hélice pour la propulsion. L'engin s'immergeait en actionnant une valve permettant l'admission d'eau dans un réservoir qui servait de lest. Il remontait grâce à une pompe qui expulsait l'eau [8].



Figure 1-3 Le sous-marin de Bushnell

L'autonomie en oxygène était de 30 min (Pararas-Carayannis, 1976). Depuis cette époque, les sous-marins ont fortement évolué d'un point de vue technologique. Une classification des véhicules sous-marins en 2 grands groupes est proposée : **les véhicules habités et les véhicules non habités.**

1.2.2 Classification

1.2.2.1 Les véhicules habités

Les sous-marins habités jouent un rôle important dans l'exploration des profondeurs marines, la recherche scientifique, et parfois les opérations militaires. Contrairement aux drones ou aux robots sous-marins télécommandés, ils embarquent des humains à bord et sont conçus pour résister à des pressions extrêmes. Nous pouvons distinguer 2 catégories de véhicules sous-marins habités :

- a. Le terme "**sous-marin**" désigne généralement un véhicule capable de plonger et de naviguer en autonomie sous l'eau pendant de longues périodes. Les sous-marins militaires modernes peuvent rester immergés plusieurs semaines grâce à une propulsion nucléaire. [9]
- b. **Un submersible**, quant à lui, est souvent plus petit et dépend d'un navire-mère pour son déploiement. Il est utilisé pour des missions d'exploration, comme l'observation des fonds marins, la recherche océanographique ou la visite d'épaves. Les submersibles ont une autonomie et une profondeur de plongée limitées comparées aux sous-marins. [2]



Figure 1-4 Submersible

1.2.2.2 Les véhicules non habités

La marine a été la première à montrer un intérêt dans le développement de système sous-marins non habités. En 1866, la marine autrichienne demanda à Rober Whitehead de développer une nouvelle arme pour les navires de guerre. Il démontra l'efficacité d'un système flottant propulsé à une vitesse de 3 m/s sur une distance de 700 m transportant une charge explosive : la torpille était née. Cependant, cet engin n'avait aucun système de contrôle et de navigation. En réalité, les premiers véhicules sous-marins autonomes ont été développés au cours des années 60-70 (Michel and Duranton, 1991) avec :

- **Le SPURV** (Self-Propelled Under water Research Vehicle, USA, 1977) : il pesait 480 kg et pouvait opérer à une vitesse de 2.2 m/s pendant 5 heures jusqu'à une profondeur de 3000m. Le véhicule était contrôlé acoustiquement de la surface. Les chercheurs l'utilisaient pour faire des mesures de conductivité et de température pour parfaire la modélisation théorique des vagues.



Figure 1-5 SPURV

- **L'épaulard** (France, 1976) : il pesait 3 tonnes et pouvait opérer à une profondeur de 6000 m pendant 7 heures à une vitesse de 1 nœud. Il était également relié à la surface d'un point de vue acoustique. Ces systèmes ont été les précurseurs des quelques 2400 véhicules sous-marins non habités en activités régulières dans le monde entier, dont nous allons faire un rapide état des lieux.



Figure 1-6 Epaulard

A noter pour cette classe de véhicules sous-marins, c'est le type de liaison avec la surface qui va définir le degré d'autonomie du robot. Nous pouvons distinguer trois catégories d'engins sous-marins : **les véhicules reliés par un câble à la surface**, ceux reliés par **un lien acoustique** et enfin les **véhicules complètement autonomes**. Il existe trois principales catégories de robots sous-marins de ce type :

1. **Les véhicules téléopérés**, ou **ROV** (Remotely Operated Vehicules) constituent l'essentiel des véhicules sous-marins exploités dans le monde. Comme leur nom

l'indique, les ROV sont des engins téléopérés, qui sont pilotés à distance via un câble. Certains de leurs degrés de liberté peuvent néanmoins être automatisés (profondeur, distance/fond, cap). Leurs applications sont nombreuses et concernent principalement l'industrie pétrolière, les travaux sous-marins et l'océanographie. Ils peuvent intervenir jusqu'à 6 000 mètres de profondeur. Bien qu'il existe plusieurs classifications détaillées, on peut distinguer principalement deux grandes catégories : les ROV d'observation et les ROV d'intervention

- **ROV d'observation** : Également appelés ROV d'inspection, il s'agit de ROV de petite taille (de 3 à 300 kg) qui n'embarquent que des instruments d'observation et de mesure (caméra vidéo, appareil photo, sonar, caméra acoustique, sonde d'épaisseur de coque, magnétomètre, etc.). Cette classe de véhicules est utilisée par exemple pour inspecter les coques de bateaux (usure, présence de mine, présence de drogue), les parements de barrages hydrauliques, l'intérieur de structures immergées (pompes, conduites d'amenée), les infrastructures portuaires ou de génie-civil (piles de ponts), mais aussi pour l'inspection de pipelines ou de risers (tuyaux reliant les puits à une plate-forme pétrolière ou à une unité flottante de production, stockage et déchargement, communément dénommée FPSO), ou pour l'identification de mines.
- **ROV d'intervention** : Les ROV d'intervention sont plus gros que les ROV d'observation et disposent d'un ou de deux bras manipulateurs au bout desquels divers outils peuvent être adaptés en fonction des applications. Les bras utilisés sont couramment hydrauliques, mais récemment des modèles électriques sont apparus, permettant une plus grande finesse des mouvements et de la commande. [3]



Figure 1-7 ROV d'intervention



Figure 1-8 ROV d'observation

2. **Les UUVs (Unmanned Under water Vehicules)** : Engins sous-marins non habités qui sont dotés de systèmes plus ou moins sophistiqués pour leur navigation et leur travail selon leur degré d'autonomie. La principale contrainte réside dans le fait qu'ils embarquent l'énergie nécessaire à la réalisation de leurs missions. Il existe 2 types d'UUVs :

- Les véhicules autonomes connus sous le nom "**Autonomous Under water Vehicles (AUV)**", qui accomplissent des missions de façon entièrement autonome.
- UUV (**Untethered Under water Vehicle**) : Il fonctionne comme l'AUV mais n'est pas capable de réfléchir sans aide venant de l'extérieur. Il existe un lien acoustique entre la surface et le sous-marin. Ce lien permet le contrôle et l'échange de données.

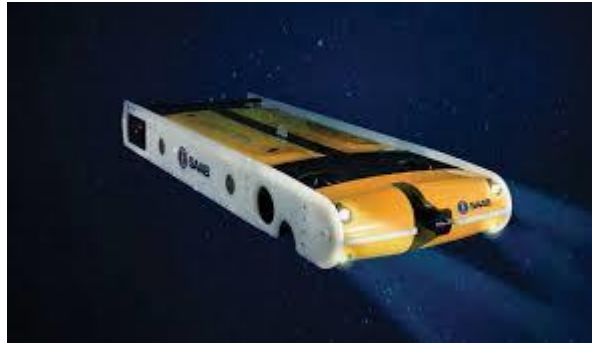


Figure 1-9 UUV1



Figure 1-10 UUV2

Pour compléter notre état de l'art sur les véhicules sous-marins, nous pouvons citer encore deux autres types d'engins sous-marins autonomes : les planeurs sous-marins et les systèmes biomimétiques.

□ **Planeurs sous-marins**

Un planeur sous-marin est un véhicule autonome qui utilise des ballasts pour influencer sur sa flottabilité ainsi que des ailes pour influencer sur la direction de son déplacement. La plupart des planeurs sous-marins sont des engins fuselés ressemblant à des torpilles, le corps est cylindrique et renferme différents capteurs en fonction de la mission qui lui est attribuée. De manière générale un planeur sous-marin contient un capteur de pression, un gyromètre et une antenne de localisation par satellite. La transmission des données récoltées pendant la plongée dont la durée varie entre quelques minutes et plusieurs jours, se fait lorsque le planeur sous-

marin est en surface. Les désavantages des planeurs sous-marins par rapport aux balises et capteurs embarqués sur des mammifères marins (phoques, éléphants de mer) sont : le coût et la capacité à éviter des obstacles (côte, objets flottants, sonde bathymétrique non référencée, ou glace de mer). Les planeurs sous-marins se déplacent en planant (ils ne sont généralement pas équipés de moteur), lors de la plongée par remplissage des ballasts les ailettes et palan donne la direction à suivre. Lorsque le planeur sous-marin a atteint sa profondeur il remonte en vidant ses ballaste. Un planeur sous-marin ne peut pas aller contre un courant trop puissant. Il existe aussi des engins flottants (réplique de voilier) utilisant des voiles pour se déplacer en autonomie totale et faire des mesures de surface. Il existe trois principaux planeurs : **Slocum** ; **Seaglider** et **Spray** [4]

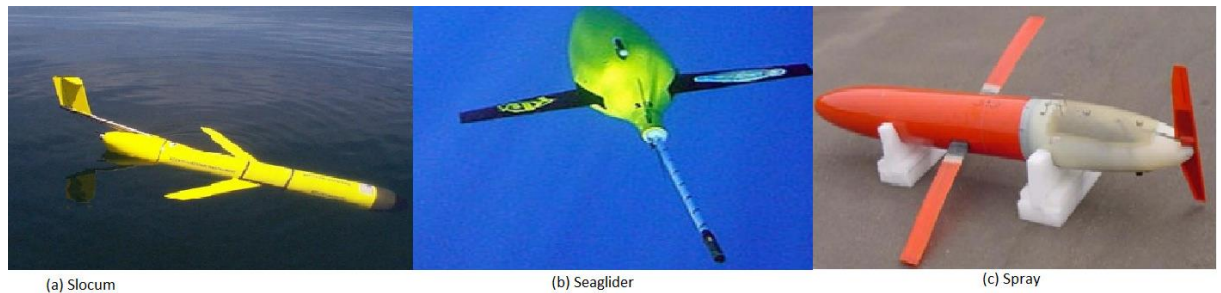


Figure 1-11 Slocum, Seaglider et Spray

Tableau 1 Classification des planeurs

Paramètres	Slocum	Seaglider	Spray
Longueur (m)	1 ,5	2	1,8
Poids (Kg)	52	51	52
Diamètre (m)	0 ,21	0,2	0,3

Profondeur (m)	200	1500	1000
Distance (Km)	500	7000	4600
Vitesse (cm /s)	35	27	27
Durée (jours)	20	330	200

Ce tableau renseigne sur comment reconnaître un planeur [10] [11] [9].

□ **Systèmes biomimétiques** véhicules biomimétiques peuvent présenter l'avantage de pouvoir se déplacer sur des terrains mixtes (alternance de nage dans l'eau et de reptation sur le sol). Dans ce cas les principales applications sont liées à l'observation, particulièrement dans le contexte militaire. D'autres véhicules s'inspirent simultanément de plusieurs animaux. Ainsi par exemple, le robot "Thon" et le robot "salamandre". L'objet de la robotique biomimétique est de concevoir et fabriquer des machines inspirées des animaux élémentaires dont les facultés cognitives sont limitées mais dont la surface d'interaction avec leur environnement est considérable en comparaison de nos réalisations actuelles. Par interaction, on entend ici celles impliquées par la perception (sensorielle) et l'action (musculaire) de ces machines vivantes dans et sur leur environnement. Ainsi l'action se déclinant en "la préhension", et plus essentiellement "la locomotion" qui elle-même se module selon son environnement en "nage", "vol", "marche" et on a :

- ❖ **La locomotion caranguiforme** propre aux poissons de type carangue ou thon basée sur des oscillations du corps.
- ❖ **La locomotion anguilliforme** de type serpent, anguille, lamproie, basée sur des ondulations du corps. [5]



Figure 1-12 Le robot thon

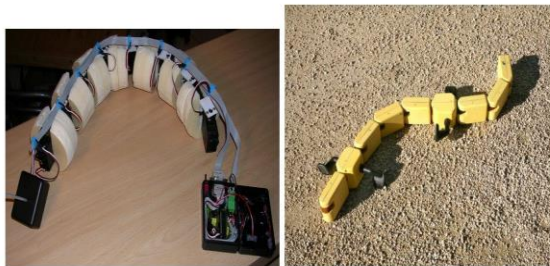


Figure 1-13 le robot anguille salamandre

On peut aussi classer les véhicules sous-marins selon la taille, le poids, l'endurance...

Tableau 2 Classification des UUV suivant différents paramètres

Classe	Diamètre (cm)	Masse (Kg)	Endurance (h)	Charge utile (dm ³)
Portable	7 à 23	<45	1 à 20	<7
Léger	32	227	10 à 40	28 à 85
Lourd	53	<1363	20 à 80	113 à 170
Large	<91	9090	<100	424 à 850

Cette typologie permet une meilleure sélection de l'engin en fonction des besoins opérationnels, de l'environnement et des contraintes logistiques [9].

1.3 Domaine de la robotique sous-marine

Les applications des véhicules sous-marins sont potentiellement très vastes. Elles touchent en particulier deux principaux secteurs qui sont : a. Le secteur civil b. Le secteur militaire. Nous allons développer, dans les paragraphes suivants, les besoins de ces différentes activités. Nous allons également montrer que les robots sous-marins sont devenus des outils indispensables pour l'homme, lorsque ce dernier doit intervenir dans un milieu dangereux.

1.3.1 Domaine civil

On peut distinguer trois applications principales pour les robots sous-marins : l'industrie, l'environnement et les applications scientifiques

1.3.2 L'industrie

Les compagnies pétrolières, gazières et de télécommunications ont très vite été intéressées par les potentialités des véhicules sous-marins. Leurs besoins s'expriment en termes de cartographie des fonds marins, d'aide à la pose de pipelines ou de câbles et l'inspection de ces structures. Les applications dans le domaine de l'énergie sont nombreuses, parmi lesquelles :

- Une meilleure connaissance de l'environnement marin local.
- Une surveillance permanente du volume marin autour des plateformes pétrolières pour s'assurer de l'absence de pollution (capteur d'hydrocarbures)
- . — Un relai acoustique entre fond et surface pour transmettre les données de systèmes sous-marins déployés en eaux profondes.



Figure 1-14 Le K-Ster à l'approche d'une mine de fond

1.3.3 L'environnement

L'application des lois relatives aux restrictions de pêche ainsi que la protection de l'environnement maritime requiert la détection, l'identification, la poursuite et l'interdiction des bateaux suspects. Ces robots pourraient également contribuer à identifier les pollutions intentionnelles (dégazages). Les véhicules sous-marins équipés de capteurs biochimiques sont capables d'analyser les polluants et peuvent ainsi permettre l'identification des responsables par comparaison chimique des cuves des navires amarrés au port. L'engin peut également prélever des échantillons de glace à différentes profondeurs pour étudier l'historique du climat. Cette application demande au véhicule un positionnement relatif très précis, mais aussi des capacités à rester positionner en un point fixe en présence de perturbations fortes.

1.3.4 Les applications scientifiques

Les archéologues profitent des caractéristiques des engins sous-marins pour explorer les épaves et les trésors cachés sous les eaux des océans. Là où les capacités d'un plongeur sont limitées en termes d'autonomie et de profondeur d'immersion, les robots sous-marins repoussent les frontières de l'humain pour améliorer et étendre ses recherches. La connaissance du débit et de la salinité des sources sous-marines, et de leur variation dans le temps est importante. Ceci

permet aux hydrologues d'estimer la quantité d'eau se déversant dans la mer, et d'évaluer s'il est possible d'utiliser cette eau.

- Cartographies des fonds marins. Etudes océaniques : salinité, température, pression, bathymétrie, réflexion de la lumière, microbiologies sous-marine, faune, flore, capacité d'absorption du dioxyde de carbone, concentration des éléments chimiques, montée du niveau de la mer.
- Pour des domaines de divertissements : Reconstitution des sites perdus ou imaginaires à l'aide de la réalité augmentée, comme la cité légendaire Atlantide. - Visite virtuelle des sites protégés. [6] [7] [8].

1.3.5 Domaine militaire

Une des applications militaires les plus étudiées concerne la détection et la destruction de mines sous-marines. La destruction de ces objets est une tâche dangereuse et spécifique, où des engins robotisés peuvent permettre de localiser et de neutraliser ces bombes à la place de l'homme. Une autre activité en pleine émergence est la surveillance des ports. Pour éviter l'intrusion de plongeurs ou encore de véhicules sous-marins ennemis dans les ports, des robots autonomes peuvent effectuer un quadrillage dans une zone proche de l'entrée du port. En général les applications militaires s'expriment dans les tâches suivantes [9] :

- Cartographies détaillées pour l'espionnage.
- Détection et identification des mines sous-marines.
- Détection et identification des navires, des bâtiments marins et des sous-marins.
- Protection des ports militaires et des environnements portuaires.
- Écoute sonar passive (analyse du bruit émis par chaque cible).
- Écoute sonar active (analyse du coefficient de réflexion sonore de chaque cible).

— Inspection des coques de navires et des sous-marins habités [12, 13] [14] [15] [16].



Figure 1-15 Sous-marin militaire

1.4 Conclusion partielle

Dans cette partie nous mettons en évidence la diversité des solutions robotique disponible, leurs techniques, leurs fonctions spécifiques et leurs contraintes opérationnelles.

Ce chapitre donne des idées sur lesquelles s'appuiera la conception de notre prototype, en intégrant les exigences fonctionnelles, les contraintes environnementales et les choix technologiques adaptées à notre objectif. Le chapitre suivant s'intéressera plus spécifiquement aux aspects techniques liés au fonctionnement et un peu à l'architecture des sous-marins.

Chapitre 2

CONCEPTION, EXPLORATION DES TECHNOLOGIES UTILISEES ET LEUR FONCTIONNEMENT

Dans ce chapitre nous plongerons au cœur des technologies et des principes physiques qui permettent aux sous-marins naviguer et d’opérer. Du principe fondamental de la flottabilité à la propulsion et aux systèmes de commande embarqués.

2.1 Principe de Flottabilité

Au cœur du fonctionnement d'un sous-marin se trouve le principe d'Archimède, ou flottabilité. Ce principe stipule qu'un corps immergé dans un fluide subit une force verticale ascendante égale au poids du fluide qu'il déplace. En d'autres termes, un sous-marin doit déplacer un volume d'eau dont le poids est égal à son propre poids pour atteindre une flottabilité neutre [17] [18] :

- **Flottabilité Positive** : Lorsque le sous-marin déplace plus d'eau que son propre poids, il flotte vers la surface.
- **Flottabilité Négative** : Si le sous-marin déplace moins d'eau que son propre poids, il coule.
- **Flottabilité Neutre** : Lorsque le poids de l'eau déplacée est égal au poids du sous-marin, il reste à une profondeur constante.

2.1.1 Modélisation de l'action exercée par l'eau

➤ Principe d'Archimède

Hypothèses de départ :

- On considère un objet **complètement immergé** dans un liquide incompressible (ex. : de l'eau).
- L'objet est de **forme parallélépipédique** (cube ou boîte droite) pour simplifier la démonstration [19].

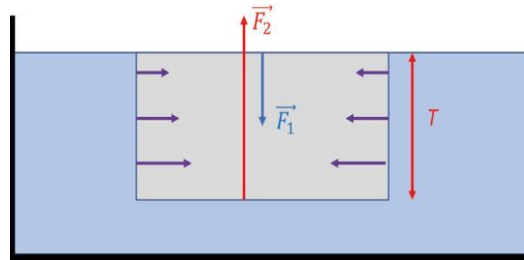


Figure 2-1 Forces exercées par l'eau sur la carène du navire

Ces forces s'exerce sur tout forme que pourrait avoir un corps immergé et donc l'expression (2.1) reste valable pour toutes ces formes.

Le fluide exerce une **pression hydrostatique** qui dépend de la profondeur. Dans un liquide au repos, la **pression à une profondeur h** est :

$$P(h) = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.1)$$

Où :

- ρ : masse volumique du liquide
- g : accélération de la pesanteur
- h : profondeur dans le liquide

Prenons un bloc de hauteur h , de section S , immergé verticalement dans un liquide. Le haut du bloc est à une profondeur h_1 et le bas à h_2 de plus $h_2 = h_1 + h$

- **Pression en haut :**

$$P_{haut} = \rho \cdot g \cdot h_1 \quad (2.2)$$

- **Pression en bas :**

$$P_{bas} = \rho \cdot g \cdot h_2 = \rho \cdot g \cdot (h_1 + h) \quad (2.3)$$

La force exercée par un fluide sur une surface plane verticale est :

$$F = P \cdot S \quad (2.4)$$

Force vers le bas (haut du bloc) :

$$F_{haut} = F_1 = P_{haut} \cdot S = \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot S \quad (2.5)$$

Force vers le haut (bas du bloc) :

$$F_{bas} = F_2 = P_{bas} \cdot S = \rho \cdot g \cdot (h_1 + h) \cdot S$$

F_A Correspond à la poussée d'Archimède est donnée par :

$$F_A = F_{bas} - F_{haut} = \rho \cdot g \cdot (h_1 + h) \cdot S - \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot S$$

$$F_A = \rho \cdot g \cdot S \cdot [(h_1 + h) - h_1]$$

$$F_A = \rho \cdot g \cdot h \cdot S$$

Avec $S \cdot h = v$ le **volume du fluide déplacé** (égal au volume de l'objet immergé)

Donc :

$$F_A = \rho v g \quad (2.6)$$

Le déplacement correspond au poids de l'eau équivalent au volume immergé de la coque (carène). Pour le physicien, le déplacement ainsi défini n'est autre que la valeur du poids du volume d'eau déplacé par le navire.

On ne prend pas en compte les forces pressantes sur les faces latérales de la carène, car celles-ci se compensent mutuellement.

Le comportement du sous-marin dans l'eau dépend alors de la comparaison entre son poids P et la poussée d'Archimède F_A :

- Si $F_A > P$, le sous-marin remonte à la surface ;
- Si $F_A = P$, le sous-marin reste en équilibre (flottabilité neutre) ;
- Si $F_A < P$, le sous-marin descend vers le fond.

➤ Principe de Pascale

Sur la surface d'un corps immergé, s'exerce une pression, en bars, perpendiculaire à cette surface, dirigée vers l'intérieur et égale au nombre de dizaines des mètres d'immersion.

$$P = P_0 + \rho_g h \quad (2.7)$$

- P : pression absolue (Pa ou bar) au point immergé
- P_0 : pression à la surface (en général 1 bar si en contact avec l'air)
- g : gravité ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)
- ρ : masse volumique du fluide (eau douce $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$)
- h : profondeur d'immersion (en mètres)

La coque d'un sous-marin est soumise à une pression croissante avec l'immersion qui tend à écraser la coque. Pour permettre au sous-marin de gagner des mètres d'immersion supplémentaires, il faut donc renforcer la coque afin qu'elle puisse supporter cette pression croissante. Ainsi l'augmentation d'épaisseur est justifiée parce qu'elle permet au matériau de supporter sans déformation ni rupture la pression augmentée due à la nouvelle profondeur souhaitée. Pour cela on doit faire attention à l'épaisseur de la coque. Celle-ci est fonction de l'immersion maximale prévue. Il faut environ augmenter l'épaisseur de 10 mm pour descendre et donc gagner 100 m d'immersion.

2.1.2 Contraintes de pression et choix de la coque (PVC)

La résistance structurelle est la condition pour garantir la fiabilité du mini sous-marin lors de ses missions d'exploration. En milieu subaquatique, l'élément critique à maîtriser est la pression hydrostatique, qui augmente de manière linéaire avec la profondeur. Cette pression exerce une force de compression uniforme sur l'ensemble de la coque, pouvant mener à l'effondrement (flambage) de la structure.

1. Justification du Choix du Matériau

Le Polychlorure de Vinyle (PVC) a été sélectionné comme matériau principal de la coque. Ce choix est dicté par un compromis optimal entre **faible coût, facilité de mise en œuvre** et une résistance mécanique jugée suffisante pour la plage d'opération envisagée. Il est par ailleurs parfaitement résistant à la corrosion par l'eau. Néanmoins, le PVC étant un polymère dont la résistance en compression est limitée, une vérification structurale rigoureuse est indispensable pour déterminer ses limites d'exploitation.

2. Détermination de la Pression Critique et Profondeur Sûre

➤ Présentation de la résistance en pression externe d'un tube en PVC rigide

Le tube PVC rigide abritera des composants électroniques et mécaniques d'environ 5 kg et sera immergé dans le lac Kivu. L'étude porte sur la résistance mécanique du tube vis-à-vis du risque d'effondrement sous la pression hydrostatique.

Paramètres :

Tableau 3 Paramètres techniques du PVC utilisé

Désignation	Symbole	Valeurs
Diamètre extérieur	De	110 mm = 0,110 m
Epaisseur	T	2,5 mm à 3,0 mm
Rayon	$R = De/2$	55 mm = 0,055 m
Module de Young	E	3,0 GPa = $3,0 \times 10^9$ Pa
Coefficient de Poisson	ν	0,38
Densité de l'eau	P	$1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Accélération de la pesanteur	g	$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Lorsqu'un cylindre mince est soumis à une pression externe uniforme, il peut s'effondrer par flambage. La pression critique de flambage élastique p_{cr} est donnée par la relation suivante :

$$p_{cr} = 2E/[\sqrt{3(1-\nu^2)}] * (t/R)^3 \quad (2.8)$$

En appliquant le modèles (2.8) et (2.9), les calculs en annexe A1 montrent que le tube en PVC rigide de diamètre extérieur 110 mm et d'épaisseur comprise entre 2,5 et 3 mm présente une pression critique théorique comprise entre 3,5 et 6 bars, soit l'engin peut atteindre une profondeur comprise entre 36 et 62 mètres d'eau. En considérant un facteur de sécurité de 3 à 4, la profondeur d'immersion sûre se situe entre **9 et 21 mètres**.

Les valeurs obtenues supposent une coque parfaite. En pratique, il faut tenir compte des imperfections, du fluage du PVC et des incertitudes de fabrication. On applique donc un facteur de sécurité (FS) de 3 à 4.

Tableau 2-2 Valeurs de profondeurs obtenues pour FS vaut 3

Épaisseur (mm)	p _{cr} (bar)	Pression admissible (bar)	Profondeur sûre (m)
2,5	3,52	1,17	12
3,0	6,08	2,03	21

Tableau 2-3 Valeurs de profondeurs obtenues pour FS vaut 4

Épaisseur (mm)	p _{cr} (bar)	Pression admissible (bar)	Profondeur sûre (m)
2,5	3,52	0,88	9
3,0	6,08	1,52	15

A noter que la charge interne correspondant à environ 5 kg d'équipements électroniques n'a qu'un effet négligeable sur la résistance en pression externe. Elle influence principalement la stabilité et la flottabilité du sous-marin.

Bien que le lac Kivu atteigne des profondeurs dépassant les 480 mètres, ce prototype est conçu pour une exploration de la couche du **mixolimnion**.

2.2 Le Système de Ballast

Le système de ballast constitue l'un des éléments essentiels du prototype de sous-marin. Il est ici conçu pour permettre la gestion de la flottabilité (la plongée, la remontée et la stabilisation en profondeur du sous-marin) à l'aide de réservoirs souples constitués de **ballons gonflable**, actionnés par deux électrovannes et contrôlés via une carte **ESP32-CAM**.

Les raisons poussant à prendre l'ESP32-CAM sont énumérées au point 2.4

2.2.1 Principe de fonctionnement

Chaque ballast est un volume flexible pouvant contenir jusqu'à **2 litres d'air**. Deux **électrovannes** permettent respectivement :

- L'entrée d'air via un réservoir d'air sous pression (gonflage),
- La libération d'air (dégonflage).

Le fonctionnement se produit en deux phases ;

- **La Remontée** : l'électrovanne reliée au réservoir s'ouvre, insufflant de l'air dans les ballasts, augmentant la flottabilité du sous-marin.
- **La Plongée** : l'électrovanne de sortie s'ouvre, permettant à l'air des ballasts de s'échapper, et au sous-marin de couler par la diminution de la poussée d'Archimède.

Le principe de plongée repose sur la modification de la masse volumique moyenne du **sous-marin**. Le volume extérieur du système restant constant, l'action sur les ballasts permet de faire varier la masse totale du sous-marin par remplissage ou évacuation d'eau.

Le système permet donc de modifier la masse volumique moyenne du sous-marin selon la relation :

$$\rho_{moy} = \frac{m}{V} \quad (2.9)$$

Où m représente la masse total du sous-marin et V son volume extérieur.

Une augmentation de ρ_{moy} entraîne la plongée, tandis qu'une diminution provoque la remontée.

Les électrovannes sont des modèles **normalement fermés**, fonctionnant sous une tension de 24 volts, avec un débit suffisant pour assurer un temps de réponse rapide lors des manœuvres.

2.2.2 Simulation du remplissage des ballast

L'objectif de la simulation est d'évaluer comment la quantité d'air dans les ballasts influence la flottabilité du sous-marin, afin de prévoir la capacité du sous-marin à descendre, remonter ou rester stable en profondeur.

Présentation du logiciel de simulation

MATLAB est un environnement de calcul numérique développé par MathWorks, utilisé pour la modélisation, la simulation et l'analyse de données en ingénierie et sciences appliquées. Il permet de programmer facilement des calculs matriciels, de visualiser des résultats et d'utiliser des bibliothèques spécialisées pour le traitement du signal, le contrôle et l'optimisation [20].

Hypothèses de simulation

Afin de simplifier l'étude et la modélisation du comportement de l'air lors du transfert entre le réservoir et les ballasts, plusieurs hypothèses ont été formulées. Celle-ci permettent d'obtenir un modèle théorique tout en limitant la complexité des calculs.

- **Gaz parfait**

L'air est considéré comme gaz parfait et compressible, obéissant à la loi de Boyle Mariote :

$$P \cdot v = nRT = \text{Constante} \quad (2.10)$$

Où n est la quantité de matière et R la constante de gaz parfait

Cette loi stipule que, pour une masse d'air donnée et à température constante, le produit de (P) par son volume (v) est constante. si le volume diminue, la pression augmente proportionnellement, et vice-versa.

- **Processus isotherme**

Le transfert d'air entre le réservoir et les ballasts est supposé se déroule à température constante.

Ainsi, le processus est isotherme, ce qui signifie que la température du gaz ne varie pas au cours de la compression ou de la détente :

$$T = \text{Constante} \quad (2.11)$$

- **Absence de pertes de charge**

Les pertes de charges dans les conduites reliant le réservoir aux ballasts sont négligées.

Autrement dit, la pression du gaz reste la même à l'entrée et à la sortie du conduit :

$$P_{\text{réservoir}} = P_{\text{ballasts}} \quad (2.12)$$

- **Absence de condensation**

Il est supposé aucune condensation ne se produit pendant le transfert.

L'air reste entièrement gazeux, même sous pression, ce qui exclut tout changement d'état de phase, pas de passage gazeux-liquide (liquéfaction).

- **Graphiques illustrant les résultats obtenus après simulations des codes**

Lesdits codes sont en annexe entre autres

- Code1 illustrant le transfert d'air du réservoir vers les ballasts
- Code2 de simulation de remplissage de ballasts suivant deux possibilités
 - Pression initiale de réservoir interne est de 0 bar
 - Pression initiale du réservoir interne est de 1 bar

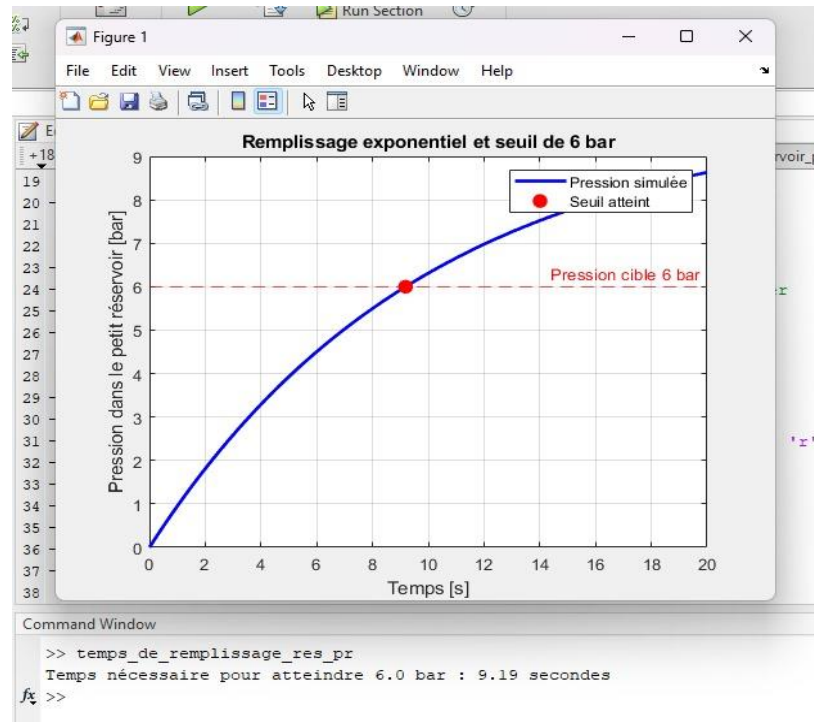


Figure 2-2 Temps du remplissage du réservoir interne

La figure 2-2 illustre le temps qu'il faut pour atteindre la pression cible dans le réservoir interne (réservoir d'air du sous-marin). Cette simulation est faite en supposant que la pression initiale du réservoir interne est de 0bar.

Le temps obtenu pour une pression cible de 6 bars est de 9.5 secondes, étant donné que réservoir est considéré ayant une dépression le remplissage prends un peu plus de temps.

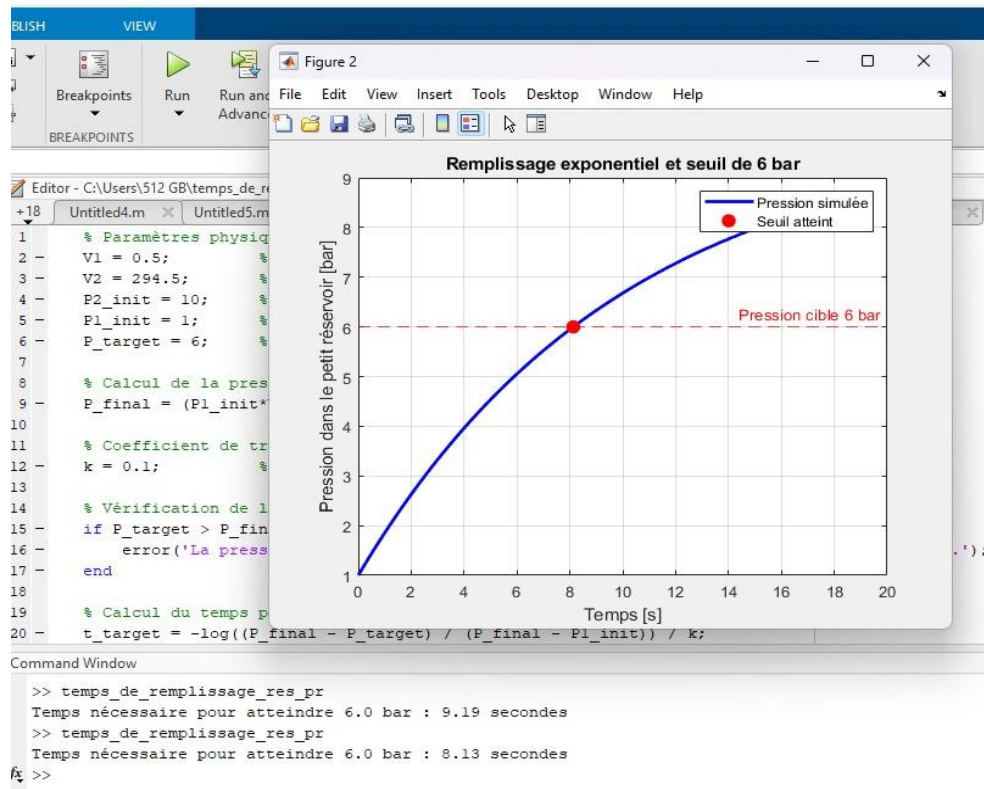


Figure 2-3 Remplissage du réservoir interne

La figure 2-3 représente la même la simulation que celle de la figure 2-2 à la seule différence que la pression initiale dans le réservoir interne est de 1 bar. Et cette particularité fait à ce que le temps de remplissage soit écourté. Ici le temps est plus écourté avec une valeur de 8 secondes pour atteindre la pression cible de 6 bars et ce sera le modèle à utiliser dans notre cas.

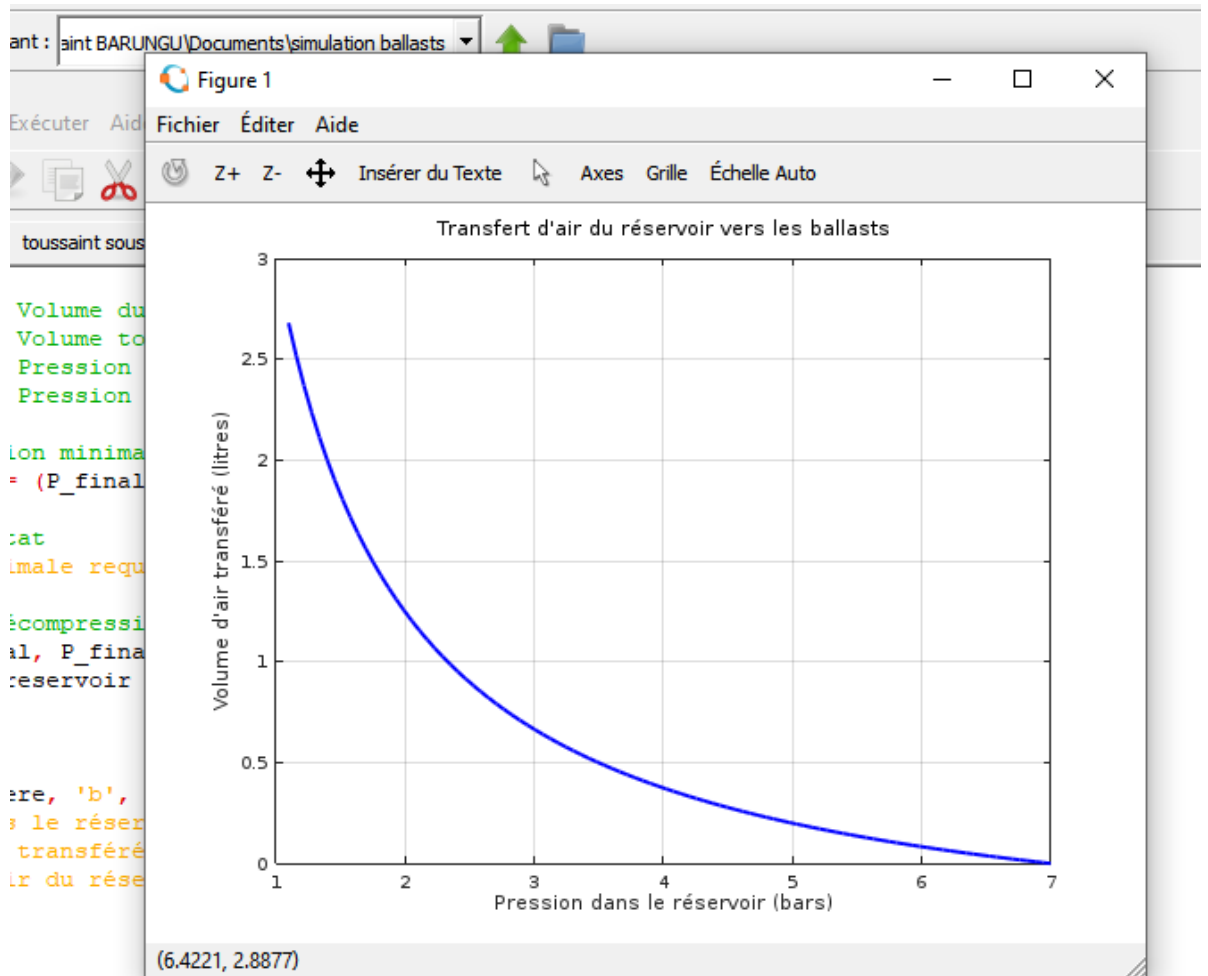


Figure 2-4 Transfert air réservoir vers ballasts

La figure 2-4 illustre la variation du volume d'air transféré en fonction de la pression dans le réservoir. On observe une relation inverse entre ces deux grandeurs : lorsque la pression dans le réservoir diminue, le volume d'air transféré vers les ballasts augmente progressivement.

2.3 La Propulsion

Le système de propulsion constitue un élément essentiel dans la conception d'un sous-marin. Il assure le déplacement du véhicule dans le milieu aquatique, aussi bien en translation rectiligne qu'en manœuvre.

2.3.1 Classification des moteurs pour systèmes immergés

Il existe trois grandes familles de moteurs électriques utilisés en robotique sous-marine. Le choix dépend du compromis entre coût, étanchéité et précision.

- **Les Moteurs Brushless (Sans balais)**

Ce sont les moteurs les plus utilisés sur les ROV professionnels.

Technologie : Le bobinage est fixe et les aimants tournent. Il n'y a pas de contact physique (balais) pour transmettre le courant.

Avantages : Très haut rendement, rapport puissance/poids exceptionnel. Ils peuvent tourner directement dans l'eau (moteurs dits "outrunners") car l'eau n'endommage pas le bobinage s'il est verni.

Inconvénients : Coût élevé et nécessité d'un contrôleur électronique (ESC) complexe. [21]

- **Les Moteurs Pas-à-Pas (Stepper Motors)**

Technologie : Le moteur tourne par "pas" successifs très précis.

Avantages : Précision extrême sur la position.

Inconvénients : Très lourds, consomment beaucoup d'énergie même à l'arrêt, et n'ont pas une vitesse de rotation suffisante pour une propulsion efficace via une hélice. Ils sont donc rejetés pour la propulsion. [21]

- **Les Moteurs à Courant Continu à balais (Brushed DC) - Notre choix**

C'est la technologie qui équipe notre maquette une visseuse de type Makita.

Technologie : Des balais en carbone (charbons) frottent sur un collecteur rotatif pour alimenter les bobines du rotor.

Avantages : Simplicité : Deux fils suffisent pour le faire tourner.

Couple de démarrage : Très fort, idéal pour la résistance du milieu aquatique.

Économie : Facilement récupérable (recyclage technologique).

Inconvénients : Usure des balais à long terme et nécessité d'un boîtier parfaitement étanche (car les étincelles des balais et l'eau ne font pas bon ménage

Le choix du moteur DC de type Makita repose sur une approche de conception orientée vers l'accessibilité technique et financière. Pour le contexte du Lac Kivu, la priorité est donnée à la force de poussée (Couple) et à la réparabilité du système. La robustesse mécanique de la gamme Makita garantit une longévité supérieure aux moteurs de modélisme classiques dans des conditions de pression modérée.

Le moteur est couplé mécaniquement à une **hélice marine** adaptée à la faible vitesse de déplacement visée par le prototype.

2.3.2 Constitution du système de propulsion

Cette image présente le schéma technique de la constitution d'un système de propulsion, illustrant la chaîne d'énergie allant de la batterie au moteur jusqu'à la mise en mouvement d'une hélice.

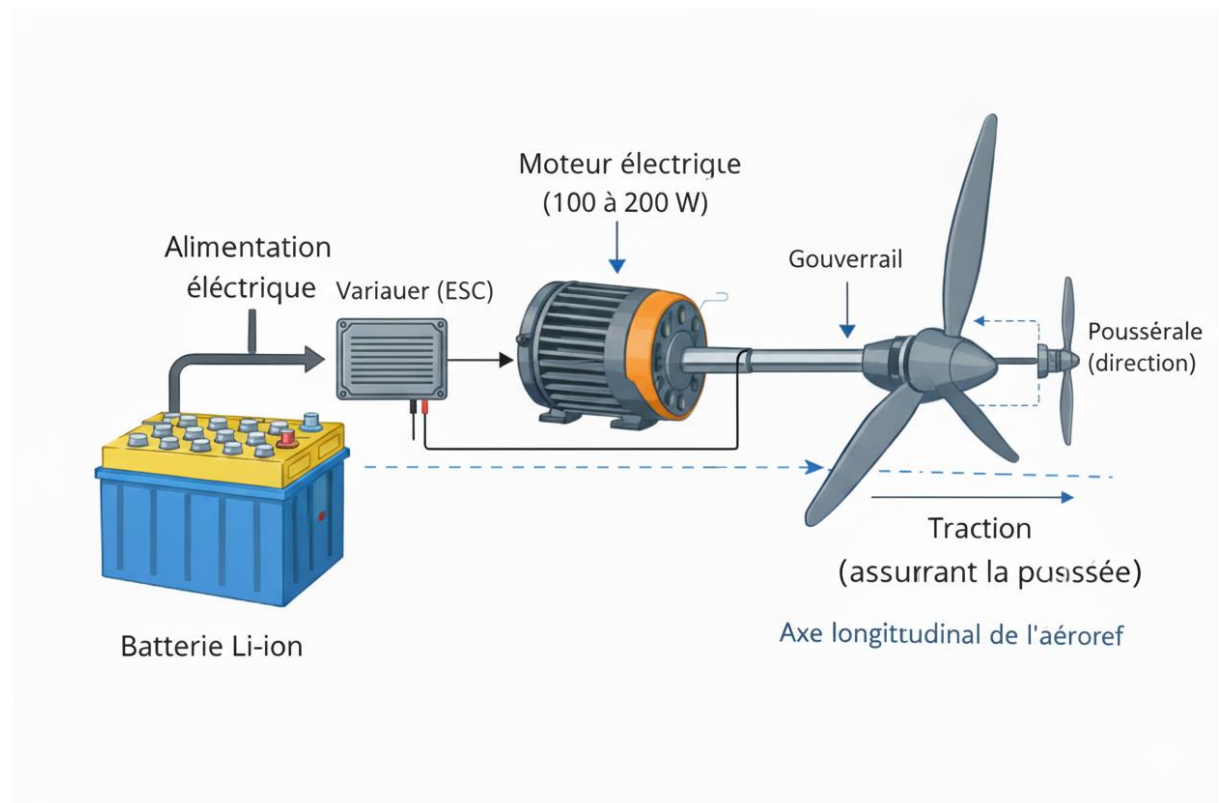


Figure 2-5 Constitution générale du système de propulsion

Le système de propulsion et de direction permette au sous-marin de se déplacer et s'orienter se compose des éléments principaux suivants :

A. Le groupe moto propulseur

- Le moteur électrique (12V) :

Il s'agit d'un moteur) courant continu à balais, capable de délivrer une puissance mécanique de l'ordre de 100 à 200W, selon la charge. Son couple est suffisant pour entrainer une hélice de diamètre 140 mm

- **L'hélice marine :**

L'hélice, transforme la puissance de rotation du moteur en poussée longitudinale fixée à l'axe du moteur, est placée à l'arrière du sous-marin.

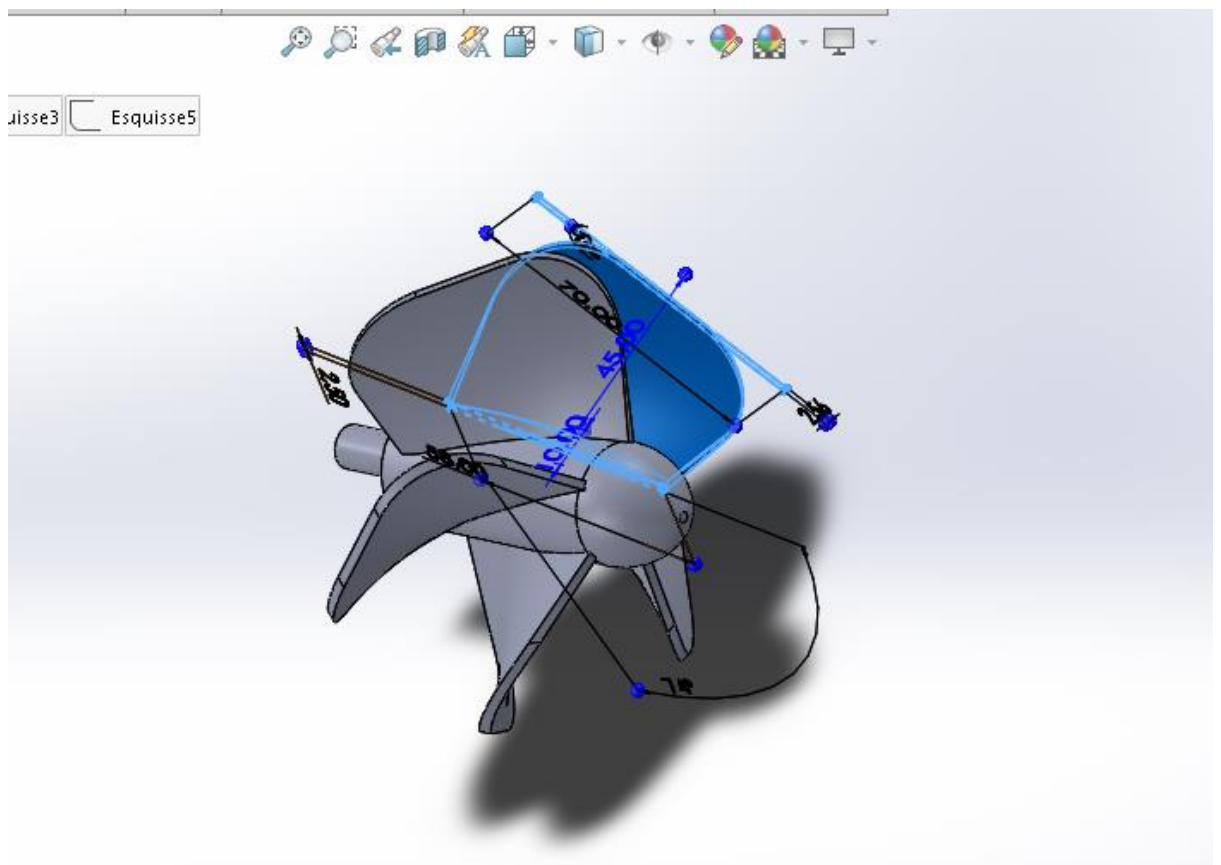
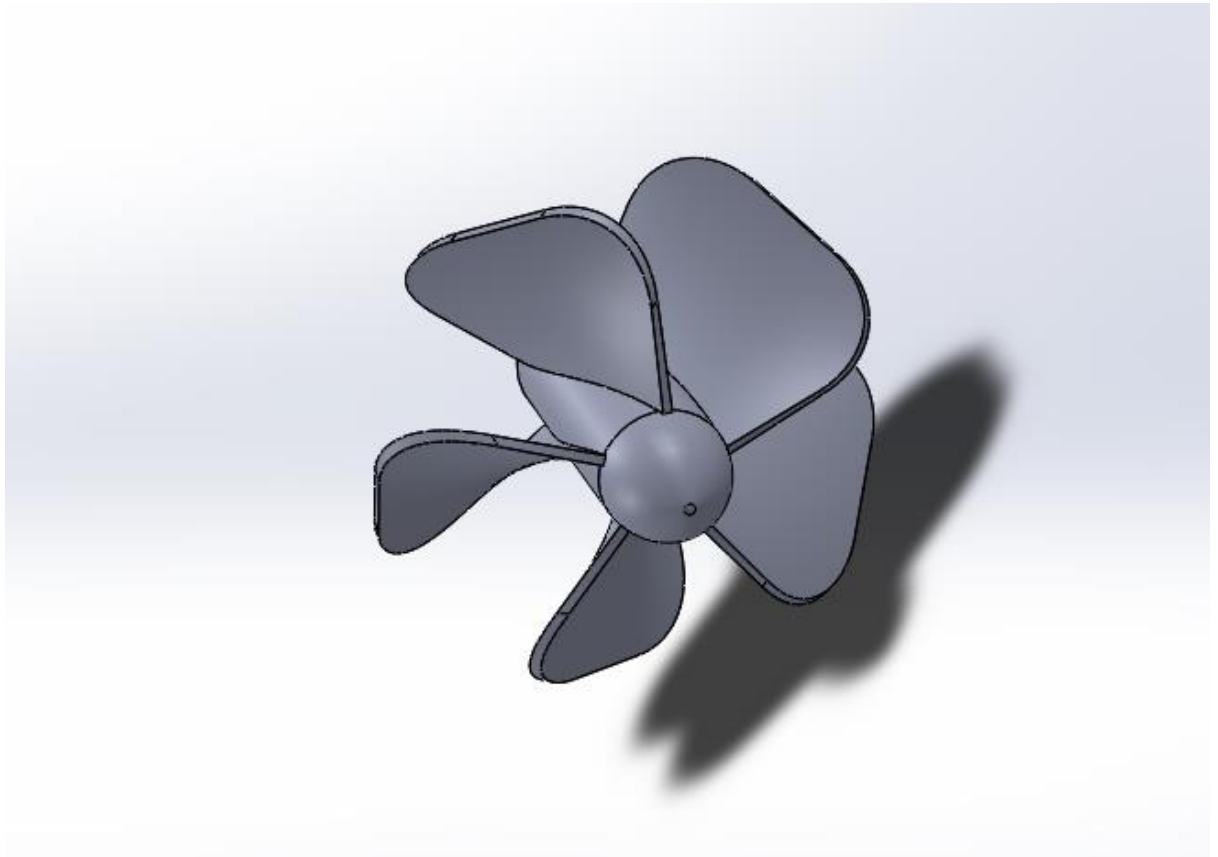


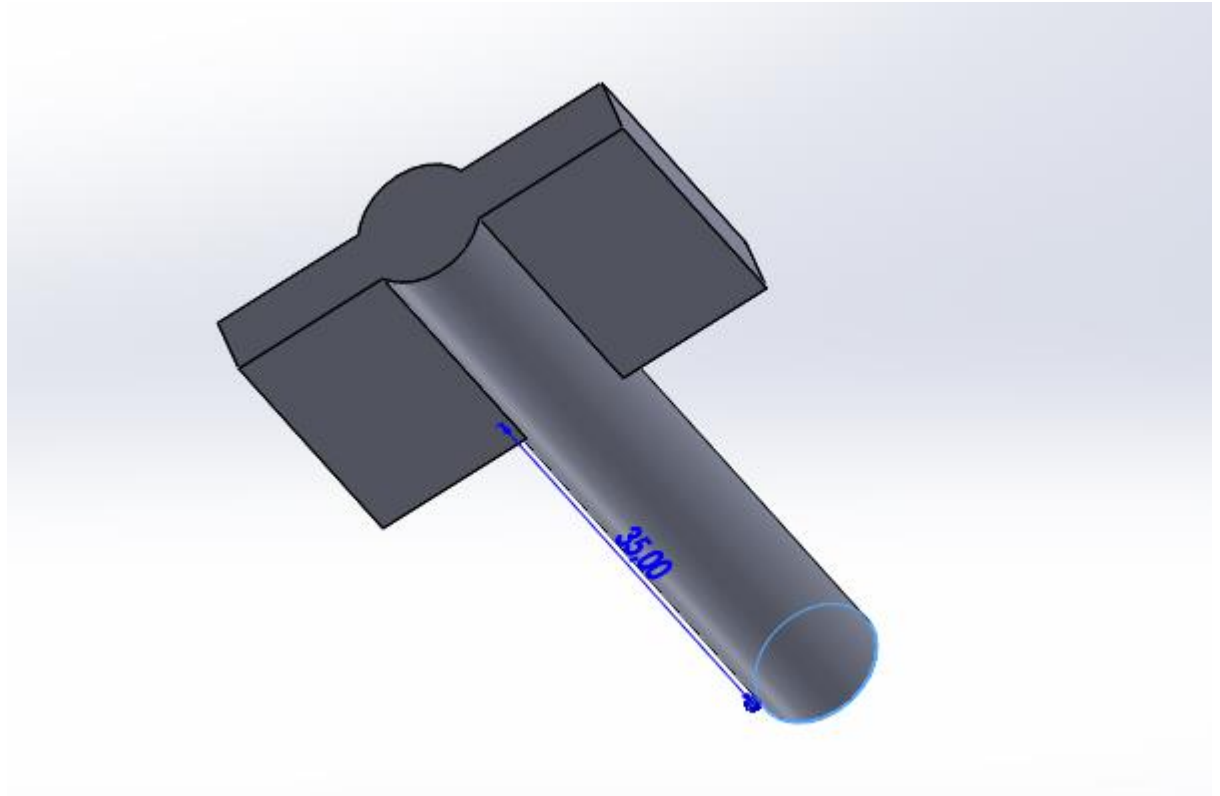
Figure 2-6 Illustration de l'hélice coté sous format solidworks



B. Le système de direction

- **L'arbre de transmission :**

Il relie le moteur à l'hélice. Cet arbre est muni d'un système d'étanchéité un **joint Spi** afin d'empêcher toute infiltration d'eau vers le compartiment moteur.



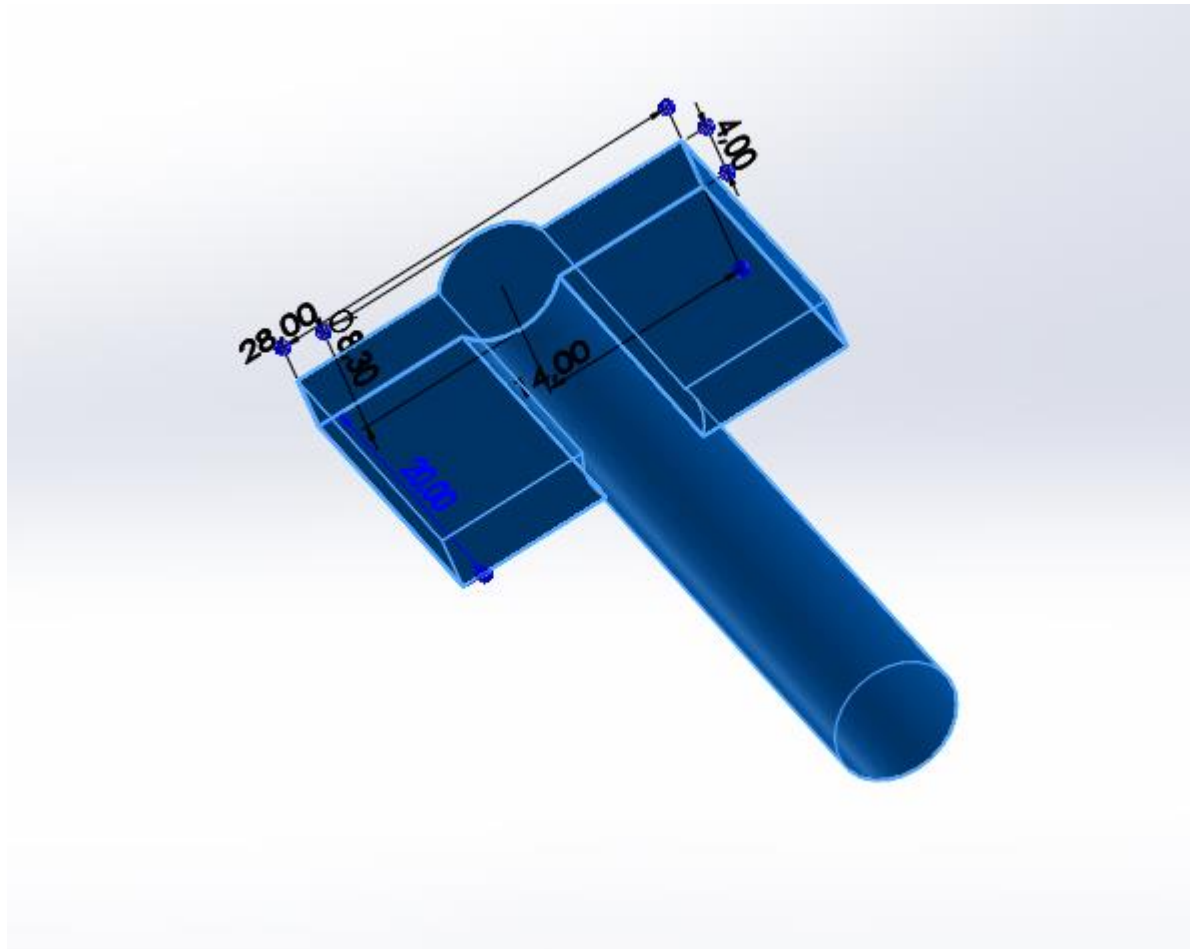


Figure 2-7 Arbre de transmission reliant le servomoteur au Gouvernail

- **Le gouvernail :**

La direction est assurée par un **servomoteur actionnant un gouvernail**, permettant de dévier le flux d'eau et donc de modifier la trajectoire du sous-marin [22].

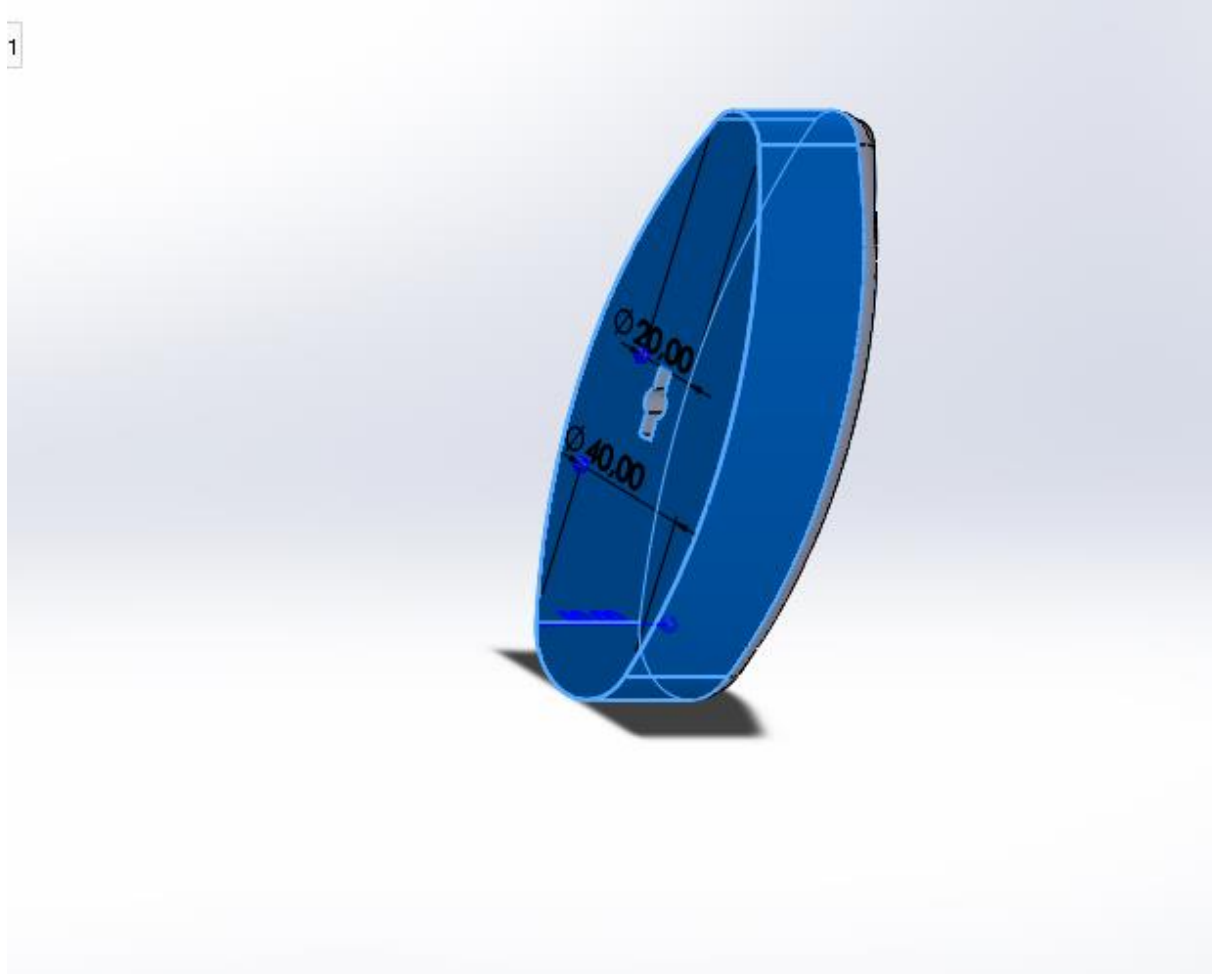


Figure 2-8 Gouvernail

C. Unité de puissance

- **Le variateur ou contrôleur (ESC ou PWM) :**

Permet de moduler la vitesse de rotation du moteur en ajustant la tension ou le rapport cyclique du signal PWM. Ce dispositif est contrôlé à distance via un microcontrôleur (ESP32-CAM).

2.3.3 Principe physique de la propulsion

Le principe de la propulsion repose sur la troisième loi de Newton (lorsque deux corps sont en interaction, la force F_a que le corps A exerce sur le corps B est égale et opposée à la force F_b que le corps B exerce sur le corps A)

$$F_a = -F_b \quad (2.13)$$

Le dimensionnement du moteur repose donc sur la **comparaison entre la puissance du moteur et la puissance nécessaire pour vaincre la traînée.**

2.3.4 Force de traînée hydrodynamique

Lorsqu'un corps se déplace dans un fluide, il subit une force de résistance appelée **force de traînée**, exprimée par la relation :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D S V^2 \quad (2.14)$$

Où :

- F_D : force de traînée (N),
- ρ : masse volumique de l'eau (1000 kg/m³),
- S : est la surface par laquelle le flux d'eau
- C_D : coefficient de traînée, qui dépend de la viscosité du fluide et de la forme de submersible

Cette force s'oppose au mouvement du sous-marin.

2.3.5 Puissance nécessaire pour vaincre la traînée

La puissance hydrodynamique nécessaire pour vaincre la traînée est donnée par :

$$P_{hyd} = F_D \times V \quad (2.15)$$

En remplaçant F_D , on obtient :

$$P_{hyd} = \frac{1}{2} \rho C_D S V^3 \quad (2.16)$$

Cette expression montre clairement que la puissance augmente **avec le cube de la vitesse**, ce qui signifie que de petites augmentations de vitesse entraînent de grandes augmentations de puissance.

2.3.6 Puissance réelle fournie par le moteur

Le moteur utilisé est un moteur électrique alimenté sous 12 V. La puissance électrique fournie par le moteur est :

$$P_{elec} = U \times I \quad (2.17)$$

Où :

- U est la tension d'alimentation (V),
- I est le courant consommé (A).

Cependant, toute la puissance électrique n'est pas convertie en puissance mécanique utile à cause des pertes (frottements, échauffement, rendement de l'hélice). La puissance utile réellement disponible sur l'hélice est :

$$P_{utile} = \eta \times P_{elec} \quad (2.18)$$

Avec η le rendement global moteur-hélice (généralement compris entre 0,45 et 0,60 pour ce type de système).

2.3.7 Condition de déplacement du sous-marin

Pour que le sous-marin puisse se déplacer à vitesse constante, il faut impérativement que :

$$P_{utile} \geq P_{hyd}$$

C'est-à-dire que **la puissance délivrée par le moteur soit supérieure ou égale à la puissance nécessaire pour vaincre la traînée hydrodynamique.**

- Si $P_{utile} < P_{hyd} \rightarrow$ le sous-marin ne peut pas avancer correctement ;
- Si $P_{utile} = P_{hyd} \rightarrow$ le sous-marin avance à vitesse constante ;
- Si $P_{utile} > P_{hyd} \rightarrow$ le sous-marin accélère.

2.3.8 Choix du moteur et justification

Le moteur électrique 12 V utilisé est capable de fournir une puissance suffisante pour satisfaire la condition :

$$P_{utile} \geq P_{hyd}$$

Ce choix garantit :

- Une vitesse de déplacement stable,
- Une bonne maniabilité,
- Une consommation énergétique raisonnable compatible avec l'autonomie de la batterie.

2.3.9 Gouvernail et manœuvrabilité

Le sous -marin est de forme cylindrique, il est équipé d'un **gouvernail**.

2.3.9.1 Cinématique et fonction des surfaces de contrôles

La manœuvrabilité du sous-marin est assurée par la maîtrise de ses mouvements de rotation et de translation verticale, définis par trois degrés de liberté (DDL) : le Lacet, le Tangage, et le Pilonnement.

- **Lacet** : il s'agit de la rotation de l'engin autour de l'axe (Z). C'est le mouvement qui permet le changement de cap (direction horizontale).

Le gouvernail (surface verticale) génère une force latérale qui induit le moment de lacet (M_z), assurant ainsi la commande du suivi de cap et de la stabilisation de la trajectoire latérale du sous-marin.

- **Tangage** : il s'agit de la rotation du sous-marin autour de son axe transversal(Y).

C'est le contrôle de l'angle de l'assiette (l'inclinaison vers le haut ou le bas).

Les ballasts avec leur forme sans, l'intervention des barres de plongée (surfaces horizontales) sont là pour générer une force verticale. Cette force crée un moment de tangage (M_y), leur permettant de contrôler l'angle d'assiette du robot.

- **Pilonnement** :il s'agit de la translation de l'engin le long de son axe verticale(Z). Ce le mouvement pur de changement de l'immersion(profondeur).

L'action des ballasts sur le tangage permet, lors du mouvement, de réaliser le Pilonnement (changement de profondeur). A l'arrêt, le pilonnement est géré par le système de ballast.

2.3.9.2 Fondement hydrodynamique et formules

Les forces et moments qui induisent le Lacet et le Tangage sont basés sur la portance (qui est une force qui permet à notre engin de flotter) générée par les surfaces de contrôle.

 Force de contrôle (F_{ctrl})

La force (latérale pour le gouvernail, verticale pour les ballasts) est directement proportionnelle au carré de la vitesse du sous- marin

$$F_{ctrl} = \frac{1}{2\rho v^2 AC_L} \quad (\delta) \quad (2.19)$$

Avec :

F_{ctrl} : force de contrôle

ρ : masse volumique du fluide

v : vitesse de déplacement du sous-marin

A : surface de la palle

CL : coefficient de portance

δ : l'angle d'inclinaison du gouvernail

La manœuvrabilité est donc maximale à haute vitesse et faible à l'arrêt, car elle est dépendante du terme v^2

 Moment de contrôle

Le moment de rotation (Lacet ou Tangage) est le produit de la force de contrôle par le bras de levier (L) :

$$M = F_{ctrl} \times L \quad (2.20)$$

Le moment est d'autant plus efficace que le bras de levier (L)

La distance entre la surface de contrôle et le centre de gravité.

Le dessin d'ensemble présenté ci-dessous illustre l'ossature modulaire du sous-marin, modélisée pour répondre aux contraintes hydrodynamiques et fonctionnelles de l'engin. La structure se divise en trois sections distinctes :

- La partie (en rose) fait office de nez profilé pour réduire la trainée
- La section centrale (en noir), plus robuste constitue le châssis porteur où sont fixés les ballasts et abrite l'instrumentation, les sources d'énergie
- Enfin la partie arrière (en jaune), elle est dédiée à la chaîne de propulsion et à l'orientation.

Cette architecture segmentée permet une maintenance facile de chaque module mais aussi une répartition optimale des masses.

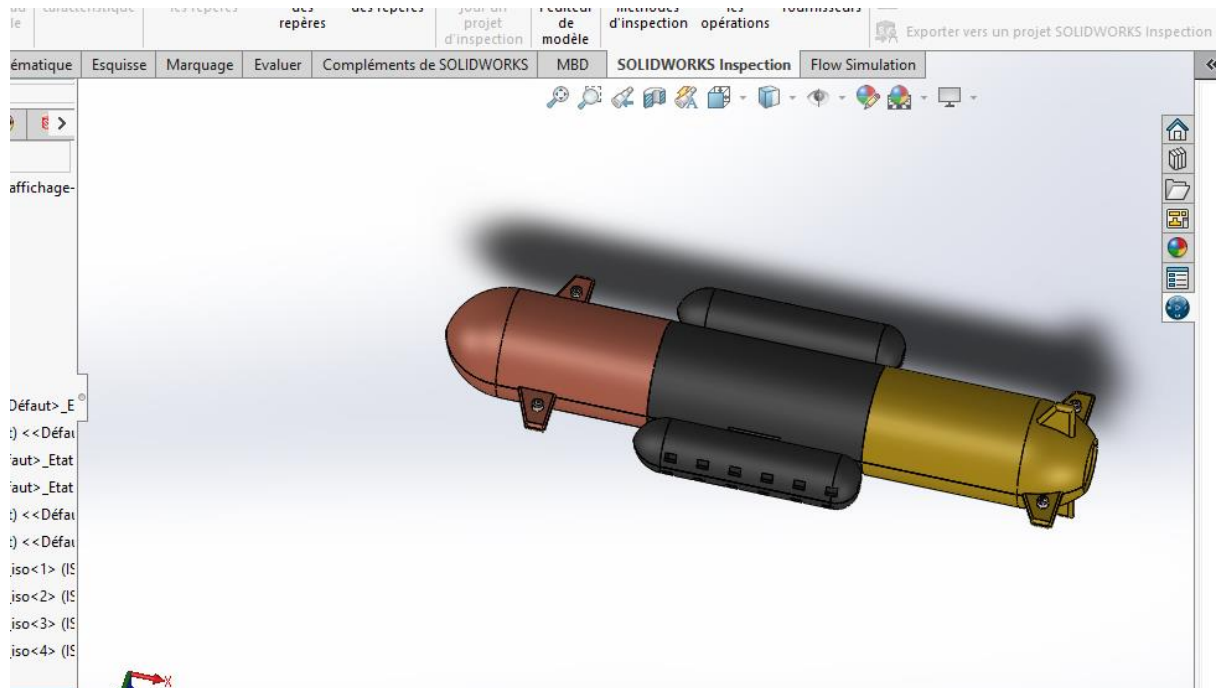


Figure 2-9 Dessin ensemble du sous-marin

2.4 Le Système de commande

Le système de commande du mini sous-marin joue un rôle central dans le pilotage, la navigation et la gestion des sous-systèmes embarqués (propulsion, ballast, communication, capteurs, etc.). Il est constitué principalement d'une **carte de contrôle ESP32-CAM**, qui assure à la fois le traitement des signaux, la transmission des données et la prise de décisions en fonction des informations reçues.

- Présentation physique de la carte de commande :



Carte ESP32CAM 1

La carte ESP32-CAM est un microcontrôleur compact et performant développé par Expressif System, spécialement conçu pour les applications embarquées nécessitant à la fois une capacité de calcul élevée, une connectivité sans fil et une acquisition d'images. Elle repose sur le microprocesseur ESP32-S, doté d'un double cœur Tensilica LX6 cadencé jusqu'à 240 MHz, et intègre une mémoire SRAM de 520 Ko associée à une mémoire Flash externe allant jusqu'à 4 Mo selon les versions.

Cette carte se distingue par la présence d'un module caméra OV2640, capable de capturer des images et vidéos avec une résolution allant jusqu'à 2 mégapixels (1600×1200). Elle dispose également d'un lecteur de carte microSD facilitant le stockage local des images, ainsi que d'un module Wi-Fi 802.11 b/g/n et d'une connectivité Bluetooth pour la transmission sans fil des données.

Sur le plan électrique, la carte fonctionne sous une tension d'alimentation comprise entre 5 V et 3,3 V, fournie par un régulateur intégré. Elle comprend plusieurs broches GPIO permettant la connexion de capteurs, de servomoteurs et d'actionneurs. Grâce à son interface UART, elle peut être programmée via un module FTDI externe, car elle ne possède pas de port USB intégré.

L'ESP32-CAM offre ainsi une solution complète et économique pour le développement de systèmes embarqués intelligents. Dans le cadre du projet de sous-marin, elle joue un

rôle central en assurant la collecte des données des capteurs, le traitement des informations, la commande des actionneurs (moteur, électrovannes et servomoteurs), ainsi que la transmission des images en temps réel. Sa faible consommation, sa puissance de calcul et sa connectivité sans fil en font un choix idéal pour les applications d'exploration et de surveillance à distance.

✓ **La carte ESP32-CAM comme unité centrale**

La ESP32-CAM a été choisie pour ses nombreuses fonctionnalités intégrées :

- Microcontrôleur double cœur avec connectivité Wi-Fi,
- Caméra embarquée pour la capture et la transmission vidéo en temps réel,
- Entrées/sorties numériques pour piloter les relais, les moteurs, ou lire des capteurs,
- Faible consommation énergétique, adaptée aux systèmes autonomes

✓ **Interfaces et périphériques connectés**

La carte commande plusieurs éléments du sous-marin :

- Les électrovannes, pour contrôler le remplissage ou la vidange des ballasts ;
- Le moteur de propulsion, via un hacheur et un MOSFET piloté en PWM (pulse width modulation) ;
- Un servomoteur, pour orienter la direction du gouvernail ;
- Des capteurs (pression, température, ...), pour informer la carte de la position, de l'inclinaison, ou de la profondeur ;

L'architecture logicielle repose sur un programme développé sous Arduino IDE. Le microcontrôleur exécute en permanence une boucle principale qui ;

- 1) Lit les valeurs des capteurs
- 2) Traite ces données pour déterminer l'état du sous-marin (profondeur,)
- 3) Envoie les commandes appropriées aux actionneurs (PWM pour le moteur, signaux ON /OFF pour les électrovannes, angle pour le servomoteur) afin de maintenir la stabilité et exécuter la mission.
- 4) Gere la communication et l'enregistrement des données.

✓ Schéma fonctionnel du système

Le schéma fonctionnel ci-dessous présente l'architecture générale du système de commande et de l'alimentation du sous-marin d'exploitation. Il se compose de trois principales chaines : **l'alimentation électrique, la commande** et le **traitement** ainsi que l'**actionnement**.

L'alimentation de notre sous-marin est assurée par une **batterie Lipo 6S**, rechargée via un chargeur de batterie et protégée par un BMS garantissant l'équilibrage et la sécurité des cellules. Un convertisseur DC-DC 5V/ 3, 3V alimente le microcontrôleur et les capteurs en tension régulée.

Le microcontrôleur ESP32-CAM constitue l'unité centrale de commande. Il reçoit les données du bloc capteurs, les traite selon les algorithmes embarqués, puis envoie des signaux de commande vers les pilotes MOSFET et le servomoteur. Il joue ainsi le rôle de centre de décision et de coordination entre la perception de l'environnement et les actions mécaniques.

Les actionneurs se répartissent en trois sous-systèmes.

- **Le système de ballast** comprend un réservoir d'air principal, deux ballasts gonflables (tribord et bâbord) et deux électrovannes (entrée et vidange). Il ajuste la flottabilité et permet plongée ou la remontée.

- **Le servomoteur** assure le contrôle de l'orientation et de la stabilité du sous-marin par la commande des gouvernes.
- **Le moteur de propulsion DC**, piloté par un MOSFET, fournit la poussée nécessaire au déplacement et permet de réguler la vitesse d'avancement.

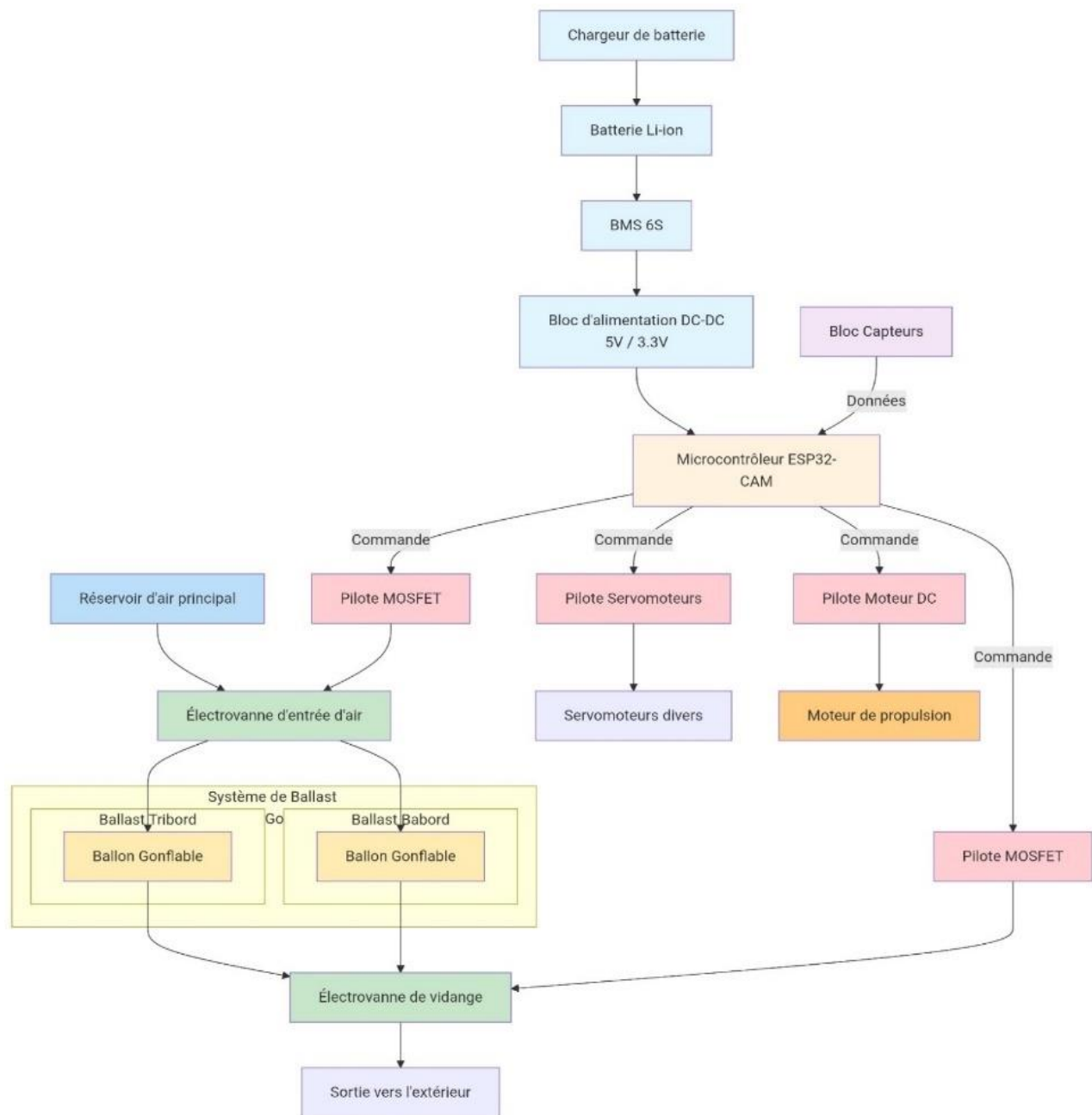


Figure 2-10 Schéma fonctionnel du système de commande du sous-marin d'exploitation

2.5 L’Alimentation

Pour assurer l’autonomie électrique du mini sous-marin, une solution d’alimentation pratique et fiable a été retenue : l’utilisation de batteries rechargeables de type Lipo (Lithium-Polymère). Cependant, les besoins en tension de certains composants, comme le moteur de propulsion (12V), nécessitent une adaptation. C’est pourquoi un **montage en série de plusieurs modules de batteries** a été choisi, afin d’atteindre la tension souhaitée tout en garantissant la sécurité et l’efficacité du système. Le pack de batteries rechargeables montées en série (montage en 6S), permettant d’obtenir une tension globale de 25.2V, suffisante pour alimenter directement les électrovannes du système de ballast. Afin de répondre aux besoins spécifiques des autres composants — notamment le moteur de propulsion (12V) et la carte ESP32-CAM (5V) —, des convertisseurs de tension à découpage (hacheurs) ont été intégrés dans le système.

2.5.1 Rôle de l’alimentation électrique

L’alimentation électrique permet :

- Fournir la tension et le courant requis par les différents composants électroniques et moteur.
- Maintenir la stabilité du système même en présence de variation de charge.
- Assurer une autonomie énergétique particulièrement critique pour les systèmes embarqués comme les sous-marins où la recharge ou le remplacement rapide des batteries est très limité.

2.5.2 Critères de choix d’une alimentation électrique

Plusieurs types de batteries ont été envisagés au cours de la conception :

- **Les batteries NiMH** (Nickel- Métal Hydrure) ; bien que stables et sûres présentent une densité énergétique faible, ce qui limite leur autonomie [23].
- **Les batteries Li-ion** (Lithium-ion), offrent une bonne densité énergétique, mais sont souvent plus rigides en termes de format, ce qui peut poser problème dans des systèmes compacts.
- **Les batteries LiFePO4** (Lithium- Fer- Phosphate), tension de fonctionnement stable avec une stabilité chimique considérable allant jusqu'à 2000 à 3000 cycles, mais une densité énergétique inférieure à celle des batteries Lipo, une tension nominale plus basse et une taille et poids considérables à capacité égale avec lipo.
- **Les batteries LiPO** (Lithium- Polymère), technologie basée sur le lithium ion mais utilise le polymère au lieu d'un liquide. Batterie très plates, légères et avec une grande capacité de décharge. Forte puissance instantanée idéale pour les moteurs électriques. Compact, forme variée pour optimiser l'espace. Mais plutôt sensible aux chocs, nécessitent un BMS (Battery Management système).

Le choix se fait sur trois critères [23]

- Une bonne autonomie
- Une puissance instantanée élevée pour la propulsion
- Une sécurité maximale car l'appareil sera immergé

2.6 La Communication et Vidéo

La réussite des missions assignées au robot dans les eaux du lac Kivu repose sur la fiabilité de la transmission des données et de la clarté du retour visuel. Le système de communication et le

module vidéo ne sont pas de simples accessoires techniques, mais les outils essentiels pour accomplir des missions spécifiques entre autres :

- **Recherche** : En cas d'incident lacustre, le robot peut être déployé pour localiser des objets ou des épaves, utilisant sa liaison de communication pour envoyer les coordonnées géographiques
- **Collecte des données environnementales de base** (mission sentinelle) : le robot se contente de mesures des paramètres physiques (la température, la clarté de l'eau...)
- **Monitoring de la zone de rivage** (mission Ecologique) : au lieu d'aller au milieu des eaux du lac, le robot reste près des côtes. Surveiller l'accumulation des déchets plastique ou de l'état de la flore aquatique près des zones habitées.
- **Preuve de concept** (mission technique) savoir si le robot peut suivre un trajet préprogrammer sans intervention humaine.

2.6.1 Stratégie de communication

Compte tenu de la forte atténuation des ondes électromagnétiques dans l'eau douce, la communication est optimisée de deux manières :

- ❖ En surface ; la connectivité Wi-Fi intégrée à l'ESP est utilisée pour établir une liaison haut débit avec une station de contrôle. Cela permet la transmission en temps réel du flux vidéo ainsi que la réception des commandes de pilotage.
- ❖ En immersion ; le Wi-Fi étant inefficace, le sous-marin passe en mode autonome .la vidéo et les données sont enregistrés localement sur une carte microSD pour être récupérées et analysées post-mission.

Dans un système embarqué tel que celui représenté sur le schéma fonctionnel, la communication entre le microcontrôleur (ici une carte ESP32 CAM) et différents périphériques est une composante essentielle pour assurer la fiabilité et la performance du dispositif.

Deux modes principaux de communication existent ; le half duplex et le full duplex

2.6.2 Mode de communication

2.6.2.1 Communication Half Duplex

La communication half duplex permet l'échange de données dans les deux sens mais de **manière alternée**. Concrètement, lorsqu'un périphérique envoie une information, l'autre doit attendre la fin de la transmission pour pouvoir répondre. L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité et sa faible consommation de ressources. Cependant, elle présente une limite importante : le canal de communication n'est jamais utilisé simultanément par les deux parties, ce qui entraîne un ralentissement dans l'échange d'information [24].

2.6.2.2 Communication Full Duplex

A l'inverse, elle autorise **un échange simultané** des données dans les deux directions. Ce mode permet une transmission continue sans devoir attendre l'arrêt de l'autre partie. Avec l'ESP32 CAM le full duplex est exploité dans la communication Wi-Fi ou encore via des protocoles réseaux. Cela permet par exemple de recevoir des données issues de capteurs tout en transmettant simultanément un flux vidéo en temps réel vers un serveur distant [25].

2.6.3 Application à notre système

Dans notre conception, la carte ESP32 CAM joue le rôle d'unité centrale de traitement et de communication. Pour assurer un fonctionnement fluide et garantir la réactivité des actionneurs (servomoteur et électrovannes), le choix du mode full duplex est privilégié.

Ce mode permet à la carte :

- De recevoir en continu les signaux de mesure provenant des capteurs
- Tout en transmettant simultanément des instructions de commande aux relais et aux actionneurs
- Et en parallèle de communiquer via Wi-Fi avec un dispositif externe (ordinateur)

2.6.4 Critère de performances d'une communication

2.6.4.1 Portée d'une transmission

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

$$BER = Nd \div Ne \quad (2.21)$$

Où N_e représente le nombre de bits erronés et N_d le nombre total de bits transmis [26]

2.6.4.2 Lien Portée-Débit

La transmission de données sous l'eau est confrontée à un défi majeur : l'absorption des ondes par le milieu aquatique. Contrairement à la communication dans l'air, où les ondes électromagnétiques (Wi-Fi, radio) se propagent aisément, l'eau — surtout si elle est salée ou chargée en particules — affaiblit très rapidement les signaux haute fréquence. Ce phénomène impose un compromis inévitable entre la portée de communication et le débit des données.

- **Wi-Fi (2,4 GHz) :** Très fortement atténué dans l'eau. La portée est **inférieure à 10 cm**, ce qui le rend inutilisable en immersion, même peu profonde. Par contre, il reste efficace si le module (ESP32-CAM) est relié à la surface par un câble ou contenu dans une bouée flottante.

- Ondes **acoustiques** : Utilisées dans les sous-marins professionnels, elles permettent de communiquer **jusqu'à plusieurs centaines de mètres**, mais avec des débits très faibles (de quelques bits à quelques kilobits par seconde). Elles sont adaptées à la **télémétrie** (positions, données capteurs), mais **pas à la vidéo**.
- Liaison **optique (laser ou LED bleue)** : Offre des **débits élevés** (jusqu'à 10 Mbps), mais la **portée est limitée à quelques mètres** dans une eau claire, et quasi nulle dans une eau trouble.
- Connexion **filaire (Ethernet ou USB)** : Solution la plus stable pour les systèmes proches de la surface. Elle permet une **liaison directe entre le module embarqué et un terminal en surface**, sans perte de débit, mais limite la mobilité du sous-marin.

Choix appliqué dans ce projet

Dans le cadre de ce projet, l'approche adoptée est la suivante :

- **Transmission vidéo via ESP32-CAM** en Wi-Fi uniquement à la **surface** ou par **connexion filaire**.
- **Stockage local des vidéos** sur une **carte microSD**, pour les missions en immersion plus profonde.
- Pour une version future, l'utilisation d'une **liaison acoustique à faible débit** pourrait permettre de **transmettre des données capteurs (pression, température, etc.)** en temps réel, même en immersion.

2.6.4.3 Latence d'une communication

La **latence** désigne le **délai de transmission** d'un signal ou d'un paquet de données entre l'émetteur et le récepteur. Elle correspond au **temps nécessaire** pour qu'une information envoyée depuis un point A **arrive à destination** au point B.

Elle est généralement exprimée en **millisecondes (ms)** ou en **secondes (s)**

Latence=temps de propagation+temps de traitement+temps de transmission

- **Temps de propagation** : lié à la distance et à la vitesse du signal.
- **Temps de transmission** : dépend du **débit** (vitesse de transfert).
- **Temps de traitement** : temps nécessaire au système pour encoder, décoder ou traiter les données

Autre formule de la latence.

(2.22)

$$\Delta t = t_{last_receipt} - t_{first_emit}$$

Avec Δt la latence, $t_{last_receipt}$ la date de réception du dernier bit reçu de la trame et t_{first_emit} la date début émission. [26]

2.6.4.4 Capacité de canal et débit

La **capacité de canal** représente le **débit maximal théorique** (en bits par seconde, ou bps) qu'un canal de communication peut supporter **sans erreur**, en tenant compte du bruit [26].

Elle est donnée par la célèbre **formule de Shannon** :

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.23)$$

Où :

- C : capacité du canal (en bps)
- B : bande passante (en Hz)

- S /N : rapport signal sur bruit (SNR, sans unité)

2.7 Conclusion partielle

Ce chapitre a présenté de manière détaillée la conception des principaux sous-systèmes du prototype du sous-marin proposé dans ce travail. Il a été mis en évidence que le système de ballast pneumatique assure un contrôle précis de la flottabilité, tandis que les systèmes de propulsion et de gouverne garantissent la mobilité du sous-marin. L'ensemble est piloté par une unité de commande centralisée basée sur un ESP32-CAM, alimentée par une batterie Li-Po. Par ailleurs, une stratégie de communication combinant le Wi-Fi et le stockage sur carte SD a été définie afin de répondre aux contraintes spécifiques du milieu d'exploitation. L'ensemble de ces choix technologiques, dictés par des considérations de coût, de simplicité de mise en œuvre et de performance fonctionnelle, permet de définir l'architecture globale du sous-marin développé.

Chapitre 3

RÉALISATION ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU MINI SOUS MARIN

Après avoir défini les bases théoriques et exploré les technologies clés dans les chapitres précédents, ce troisième chapitre se consacre à la matérialisation de notre projet. Il s'articule autour de la **réalisation physique** du prototype du mini sous-marin autonome et de sa **validation expérimentale**. Le défi majeur réside dans l'intégration harmonieuse des composants électroniques standards au sein d'une structure capable de résister à l'environnement hostile du lac Kivu, tout en assurant les fonctionnalités prévues. Ce chapitre intégrera également les schémas mécaniques et électroniques du système, éléments cruciaux pour la compréhension et la reproductibilité du projet.

3.1 Architecture système et schéma bloc fonctionnel

L'architecture du mini sous-marin est conçue pour garantir une interaction fluide entre ses différents sous-ensembles fonctionnels. Comme illustré par le schéma fonctionnel du chapitre précédent (figure 2-10), le système est organisé autour de trois chaînes principales : l'alimentation électrique, la commande et le traitement des données, ainsi que l'actionnement. Le microcontrôleur **ESP32-CAM** constitue l'unité centrale de commande et de traitement. Il est responsable de la lecture des données, de l'exécution des algorithmes de contrôle, de la prise de décision, et de l'envoi des commandes aux actionneurs. Il gère également la communication et le stockage des données.

Les capteurs fournissent des informations essentielles sur l'état interne et l'environnement du sous-marin. Le bloc d'alimentation assure la distribution d'énergie nécessaire à tous les composants, depuis la batterie Lipo 6S jusqu'aux modules de conversion de tension. Enfin, les actionneurs (moteur de propulsion, électrovannes du système de ballast, servomoteur du

gouvernail) exécutent les ordres de l'ESP32-CAM pour contrôler le mouvement et la flottabilité du sous-marin.

Cette architecture modulaire, illustrée à la figure 3-1, facilite non seulement la conception et l'intégration, mais aussi la maintenance et les potentielles évolutions futures du prototype.

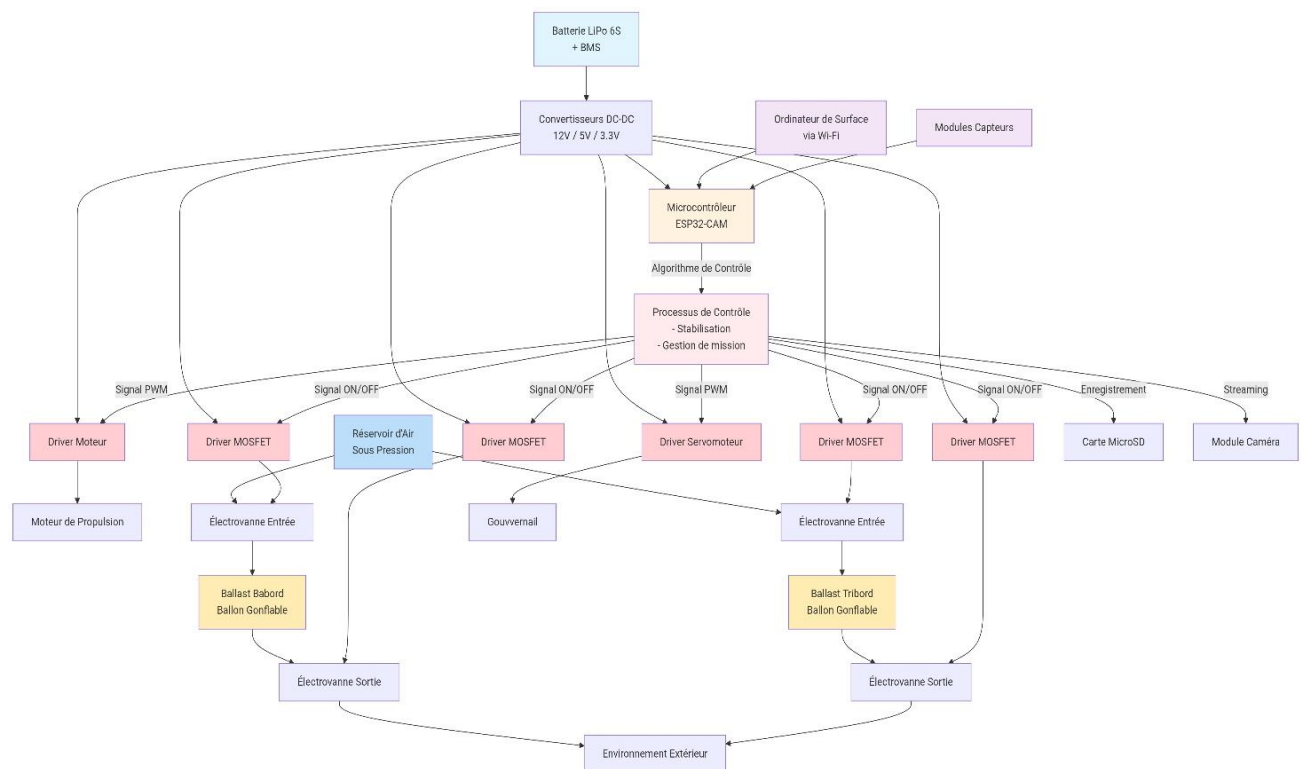


Figure 3-1 Architecture du prototype

3.2 Sélection et Dimensionnement des Composants

La sélection rigoureuse et le dimensionnement précis des composants sont essentiels pour assurer la performance, la fiabilité et l'autonomie du mini sous-marin. Les choix effectués sont guidés par les contraintes spécifiques de l'environnement du lac Kivu (pression, densité de l'eau, budget) et les objectifs de mission.

3.2.1 Alimentation

Le choix de l'alimentation électrique repose sur la nécessité d'une bonne autonomie, d'une puissance instantanée élevée pour la propulsion et d'une sécurité maximale en milieu immergé.

- **Batterie** : Une batterie Li-Po 6S (22.2V) d'une capacité de 5000 mAh a été sélectionnée. Ce choix est justifié par le fait que, en considérant une décharge sécuritaire de 80% (soit 4000mAh) et une consommation moyenne en mission de 2A, cette batterie offre une **autonomie théorique de 2 heures**, suffisante pour les missions d'exploration prévues [27].
- **Convertisseurs de tension** : Des convertisseurs DC-DC à découpage sont intégrés pour abaisser la tension de la batterie à 5V et 3.3V, nécessaires pour alimenter respectivement le microcontrôleur ESP32-CAM, les capteurs et autres modules électroniques.
- **BMS (Battery Management System)** : Un BMS (système de gestion de batterie) est impératif pour garantir la sécurité de la batterie Li-Po, notamment en assurant l'équilibrage des cellules, la protection contre la surcharge, la décharge excessive et les courts-circuits, prolongeant ainsi sa durée de vie et prévenant les risques.

L'alimentation se résume par la figure 3-2 (structure de l'alimentation)

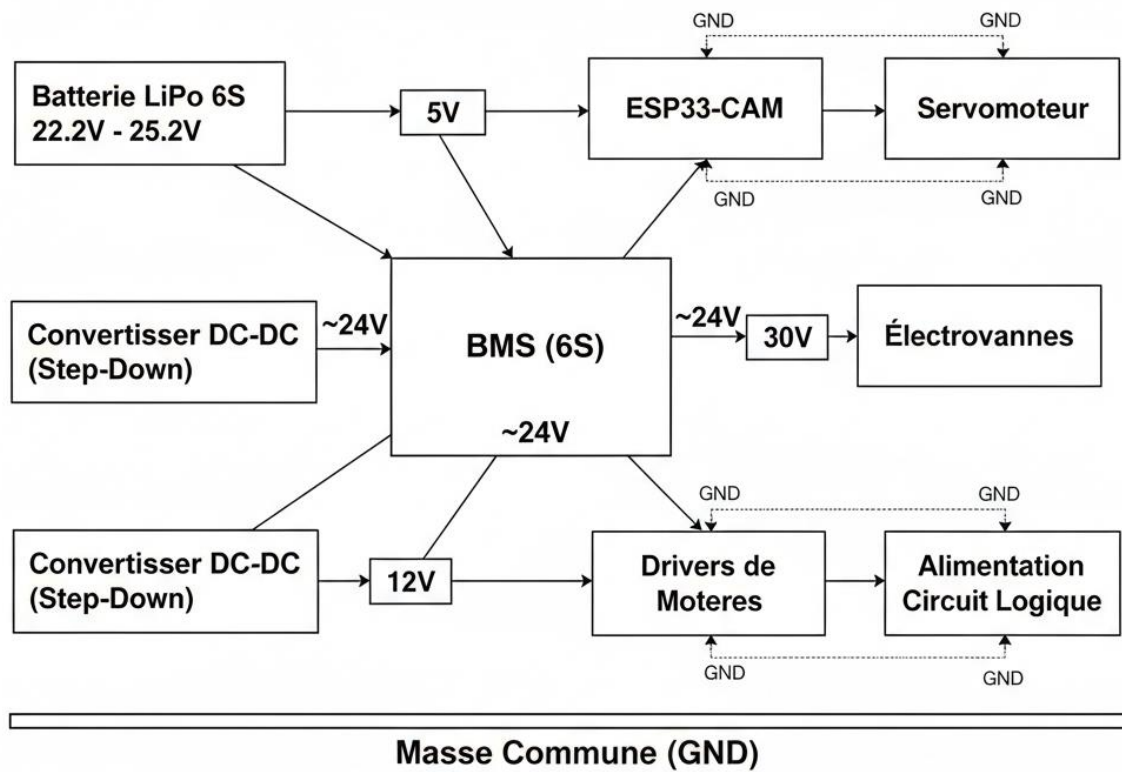


Figure 3-2 Structure de l'alimentation

3.2.2 Capteurs

Les capteurs sont les "yeux et oreilles" du sous-marin, fournissant les informations nécessaires à la navigation et au contrôle.

- **Capteur de pression/profondeur** : Un capteur de pression hydrostatique (MS5837) est indispensable pour mesurer l'immersion du sous-marin. Ce capteur permettra à l'ESP32-CAM de maintenir une profondeur constante et de contrôler les phases de plongée et de remontée.
- **Caméra OV2640** : Intégrée à l'ESP32-CAM, elle est utilisée pour la capture d'images et de vidéos avec une résolution allant jusqu'à 2 mégapixels, essentielle pour les missions d'exploration et de surveillance visuelle. Les données visuelles sont stockées localement sur une carte microSD en immersion.

3.2.3 Actionneurs

Les actionneurs transforment les commandes électriques en mouvements mécaniques, permettant le contrôle du sous-marin.

- **Moteur de propulsion** : Le choix s'est porté sur un moteur à courant continu à balais de type Makita, pour sa robustesse, son fort couple de démarrage, sa simplicité de contrôle (deux fils suffisent pour le faire tourner) et sa disponibilité locale. Capable de délivrer une puissance de 100 à 200W, il est couplé à une hélice marine pour assurer la poussée nécessaire au déplacement en translation. Un **hacheur DC** et un **MOSFET** piloté en PWM sont utilisés pour moduler sa vitesse. La figure 3-2 illustre le schéma de propulsion avec l'accouplement du moteur à l'hélice. Accouplement par crabotage

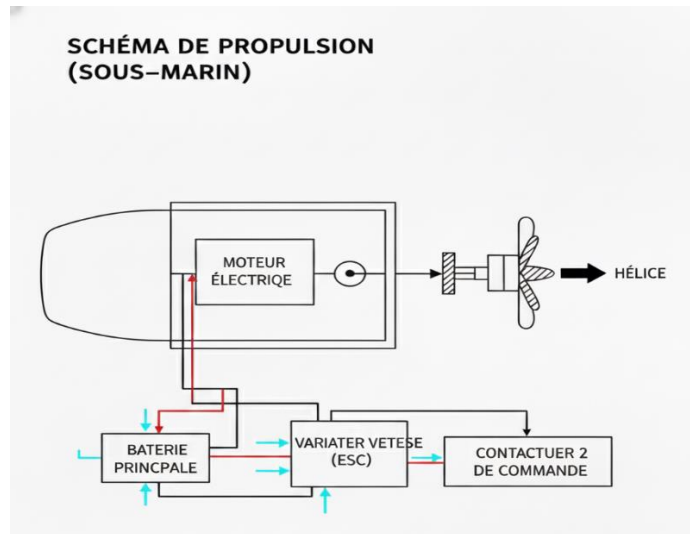


Figure 3-3 Propulsion (moteur et hélice)

- **Électrovannes :** Deux électrovannes (modèles normalement fermés, 24V) sont utilisées pour contrôler le système de ballast. L'une permet l'entrée d'air sous pression (provenant d'un réservoir d'air) dans les ballasts gonflables (jusqu'à 2 litres d'air chacun) pour la remontée, l'autre permet la libération d'air pour la plongée. Elles garantissent un temps de réponse rapide. La figure 3-3 illustre la configuration du circuit hydraulique du système

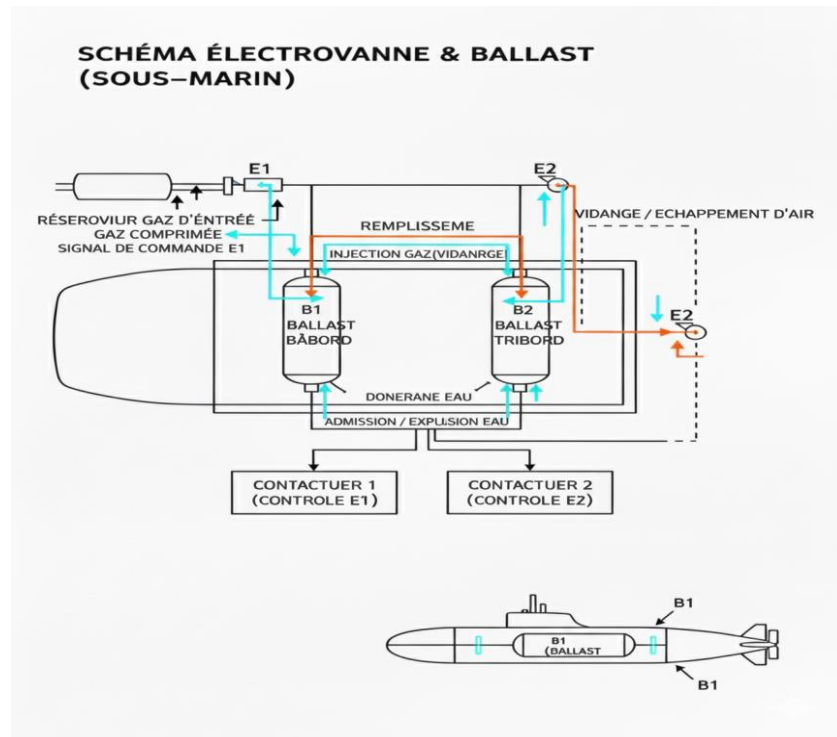


Figure 3-4 Schéma hydraulique (schéma électrovannes & ballasts)

- **Servomoteur (MG996R) :** Un servomoteur est dédié à l'orientation du gouvernail. Il permet de dévier le flux d'eau généré par l'hélice, assurant ainsi les mouvements de lacet et de tangage nécessaires pour la direction et la stabilisation du sous-marin.

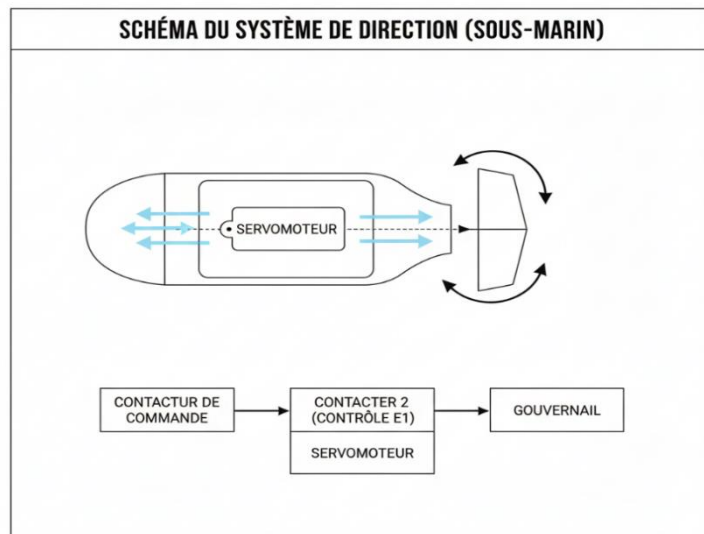


Figure 3-5 Schéma du système de direction

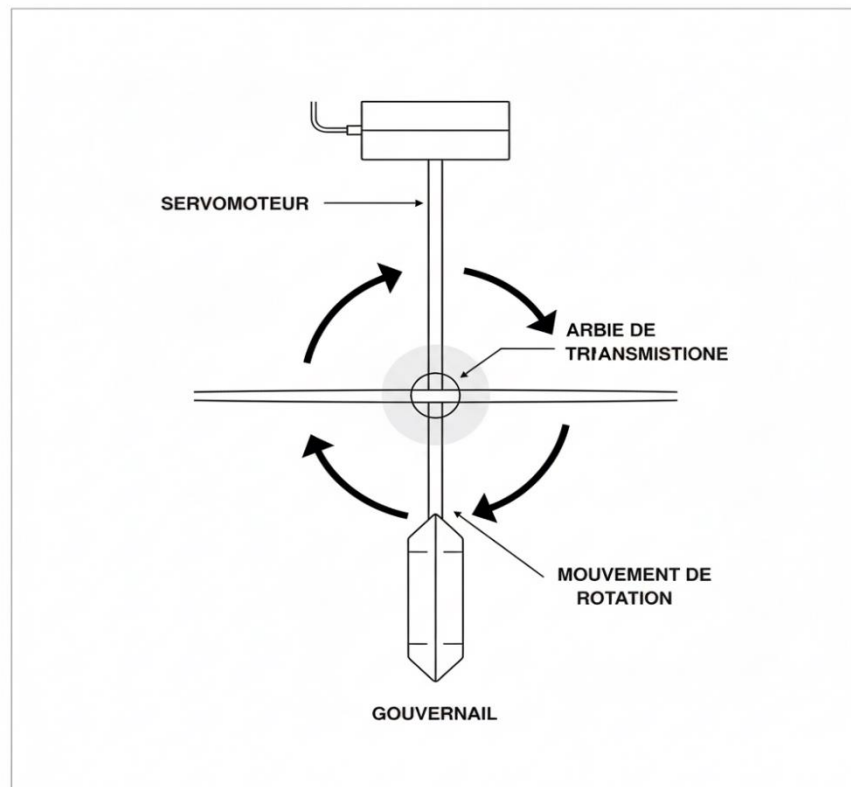


Figure 3-6 Composition générale du système de direction

3.3 Intégration Mécanique et Conception de la Coque

L'intégration mécanique vise à assembler tous les composants de manière fonctionnelle, compacte et surtout étanche, tout en optimisant l'hydrodynamisme du sous-marin.

L'intégration mécanique vise à assembler tous les composants de manière fonctionnelle, compacte et surtout étanche, tout en optimisant l'hydrodynamisme du sous-marin.

3.3.1 Conception de la coque

La coque du prototype est réalisée à partir d'un tube en polychlorure de vinyle rigide de diamètre 110 mm. Ce matériau a été choisi pour son excellent compromis entre faible coût, facilité de mise en œuvre, résistance à la corrosion par l'eau et une rigidité suffisante pour la profondeur d'opération visée dans le **mixolimnion**.

- **Résistance à la pression** : Des demi-sphères en PVC obturent les extrémités du tube, optimisant la résistance aux contraintes hydrostatiques et réduisant la trainée. Des calculs de résistance structurelle (détaillées en Annexe A.1) ont permis d'estimer la pression critique de flambage élastique du tube PVC à une profondeur sûre comprise entre **9 et 21 mètres**, pour des épaisseurs variant de **2,5 à 3 mm** (avec facteur de sécurité de 3 à 4). Bien que le lac Kivu soit plus profond, cette conception est spécifiquement adaptée à l'exploration de la couche du mixolimnion.
- **Étanchéification** : L'étanchéité est assurée par l'utilisation de joints toriques (en silicone) au niveau des jonctions entre le tube cylindrique et les demi-sphères d'extrémité. Une attention particulière est portée aux passages de câbles et aux arbres de transmission (hélice, gouvernail) où des systèmes d'étanchéité spécifiques sont intégrés pour prévenir toute infiltration d'eau vers les compartiments électroniques et moteurs.

3.3.2 Simulation hydrodynamique

- **Analyse de l'écoulement hydrodynamique**

Cette simulation a été réalisée sous MATLAB. Elle utilise un modèle d'écoulement potentiel couplé à un analyse du Nombre de Reynolds (Re) pour cartographier les régimes d'écoulements

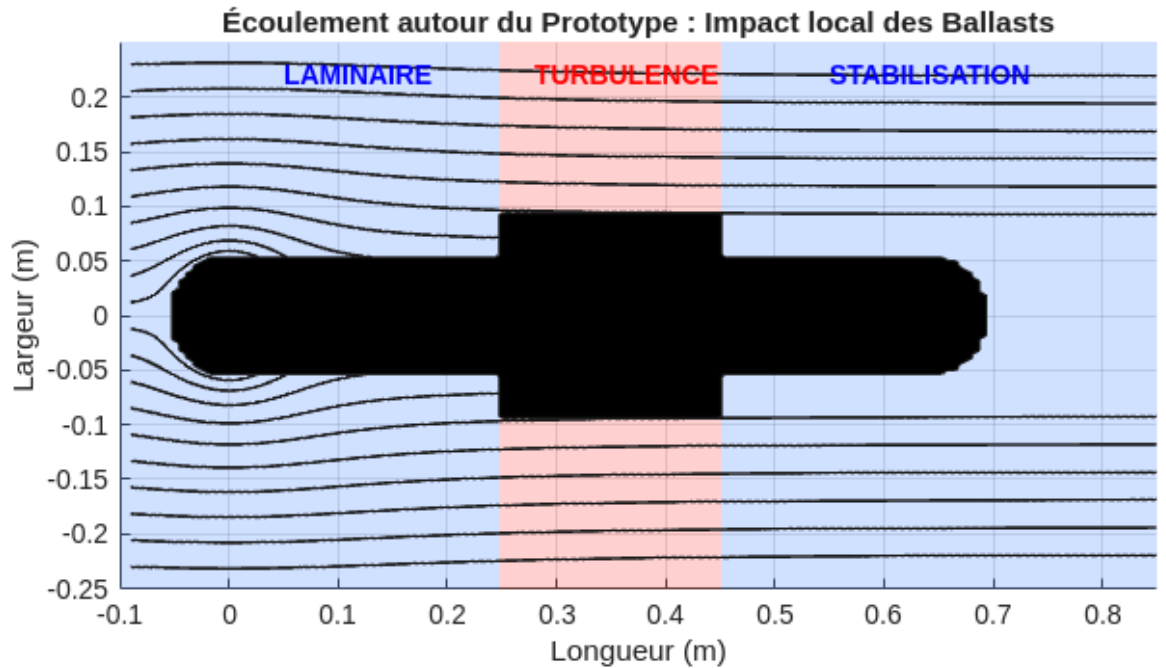


Figure 3-7 Flow simulation

- **Laminarité au nez** (section avant) : En mécanique un écoulement est dit laminaire lorsque le fluide (ici l'eau) se déplace de manière ordonnée, en lames ou couches parallèles qui glissent les unes sur les autres sans se mélanger [28] ; Les lignes de flux épousent la forme hémisphérique du compartiment avant. Cela confirme que cette forme minimise la résistance à l'avancement (traînée de forme) et permet une entrée dans l'eau "propre".
- Comportement de la section centrale : l'obstacle crée par les ballasts casse l'écoulement. On observe une déviation courbe des lignes des champ. C'est la zone où la résistance) l'avancement est la plus élevée.

- **Stabilité & Sillage et propulsion** (Section arrière) : À l'arrière, le resserrement de la structure permet de guider l'eau vers l'hélice et le gouvernail. L'objectif est d'éviter les zones de dépression trop importantes qui freineraient le sous-marin

3.3.3 Emplacement des composants

L'agencement interne des composants est crucial pour la stabilité (centre de gravité) et la facilité d'accès. Le sous-marin est divisé en trois sections distinctes pour l'organisation des éléments (Figure 2-8)

- **Partie avant (nez profilé)** : Contient généralement la caméra et certains capteurs, bénéficiant de la clarté visuelle et de l'exposition directe au milieu pour les mesures
- **Section centrale (châssis porteur)** : Portera les ballasts gonflables et abritera la batterie avec son BMS, les convertisseurs de tension, l'ESP32-CAM, et les capteurs de pression. Cette disposition vise à optimiser la répartition des masses et à positionner le centre de gravité de manière adéquate pour la stabilité.
- **Partie arrière** : Est dédiée à la chaîne de propulsion (moteur, hélice) et au système d'orientation (servomoteur, gouvernail), permettant un accès aisé pour la maintenance.

Cette architecture segmentée, illustrée par le dessin d'ensemble du sous-marin, facilite la maintenance et assure une répartition optimale des masses, contribuant à la maniabilité et à la stabilité du sous-marin.

3.4 Schémas de câblage électronique

Les schémas de câblage détaillent les interconnexions entre les différents modules électroniques, garantissant un fonctionnement correct et sécurisé du système.

3.4.2 Schéma du circuit de puissance

Ce schéma mettra en évidence la distribution de l'énergie de la batterie aux différents consommateurs :

- La batterie Li-Po 6S (25.2V) et son BMS.
- Les convertisseurs DC-DC pour fournir le 5V et le 3.3V aux circuits de commande.
- Le circuit de puissance du moteur de propulsion, incluant le hacheur pour la régulation de vitesse, alimenté directement par la batterie (25.2V).
- L'alimentation des électrovannes (24V), également alimentées directement ou via un module de régulation adapté depuis la batterie.
- Le fusible de protection

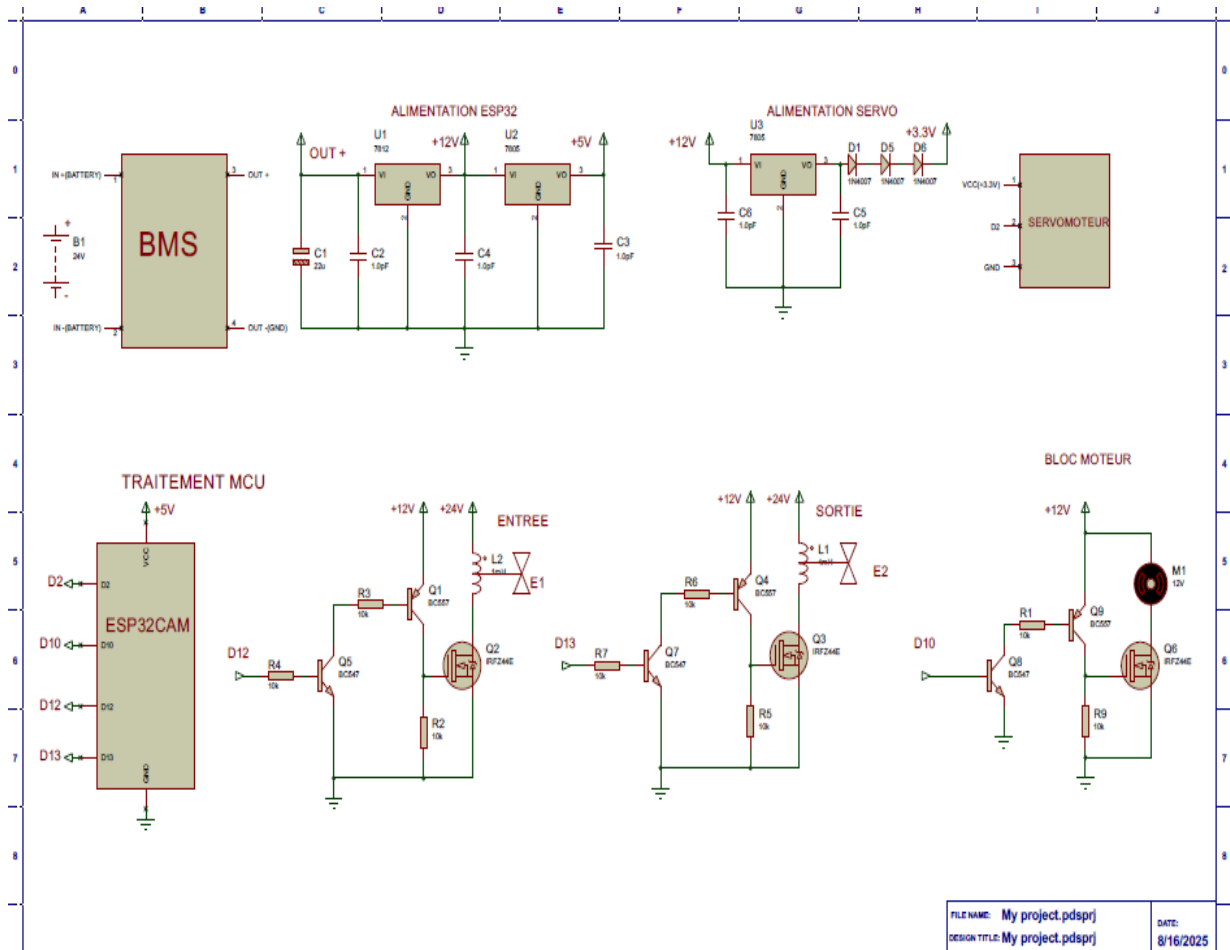


Figure 3-9 Schémas électriques du sous-marin

Ces schémas sont essentiels pour la documentation technique, le dépannage et toute future amélioration du prototype.

3.5 Conclusion partielle

Ce chapitre a détaillé la concrétisation du prototype, depuis l'architecture globale jusqu'à l'intégration des composants clés. La sélection du tube PVC pour la coque et la validation de sa résistance à la pression, l'intégration du système de ballast pneumatique pour le contrôle précis de la flottabilité, la propulsion efficace par moteur DC et l'orientation via gouvernail, sont autant d'éléments qui définissent ce mini sous-marin. Le tout est orchestré par un système de commande centralisé basé sur l'ESP32-CAM, alimenté par une batterie LiPo optimisée pour l'autonomie. Les schémas de câblage viendront compléter cette description en fournissant une vue d'ensemble des interconnexions électroniques. Ces choix technologiques, guidés par des contraintes de coût, de simplicité, de robustesse et de fonctionnalité, sont en adéquation avec l'objectif d'exploration du mixolimnion du lac Kivu. La prochaine étape sera la validation expérimentale de ces choix et performances.

Conclusion générale

La présente étude a relevé le défi de la conception et de la réalisation d'un prototype de mini sous-marin autonome spécifiquement adapté aux exigences d'exploration du lac Kivu, tout en privilégiant l'utilisation de matériaux accessibles localement et une approche économique. L'objectif général, qui était de concrétiser un submersible fonctionnel capable d'opérer dans cet environnement singulier, a été atteint avec succès.

Dès l'introduction, nous avons identifié un besoin crucial en matière d'exploration sous-marine locale, face aux limitations des plongeurs humains et au coût prohibitif des équipements industriels. La question de recherche principale – concevoir un prototype simple, étanche, stable, fonctionnel et peu coûteux pour le lac Kivu – a guidé l'ensemble de nos démarches. Nos hypothèses concernant l'autonomie, la navigation et la réduction des risques humains ont été validées au travers de ce projet.

Le Chapitre 1 a posé les bases théoriques en explorant les généralités sur les sous-marins et leur classification, offrant un état de l'art indispensable. Une analyse approfondie de la stratification et des particularités du lac Kivu (notamment le mixolimnion et le monimolimnion) a permis de cibler les contraintes environnementales et d'orienter les choix de conception.

Le Chapitre 2 a détaillé l'exploration des technologies et principes physiques nécessaires, en abordant de manière exhaustive le principe de flottabilité, la modélisation des forces hydrodynamiques, et les bases de la propulsion et du système de commande. Les calculs de résistance de la coque en PVC, démontrant une profondeur sûre d'opération entre 9 et 21 mètres, ont confirmé l'adéquation de nos choix matériels pour l'exploration du mixolimnion.

Le Chapitre 3, consacré à la réalisation et la validation expérimentale, a décrit la matérialisation du prototype. L'architecture système, centrée sur un microcontrôleur ESP32-CAM, a permis une gestion intégrée des capteurs (pression, inclinaison), des actionneurs (moteur de

propulsion, électrovannes de ballast, servomoteur de gouvernail) et de la communication. La sélection des composants, des batteries LiPo 6S de 5000mAh offrant environ 1.5 à 2 heures d'autonomie aux électrovannes pour le système de ballast pneumatique de 2 litres, a été déterminante. L'intégration mécanique, la conception optimisée de la coque en tube PVC de 110 mm de diamètre, validée par des simulations hydrodynamiques démontrant une traînée minimale, ont assuré l'étanchéité et la stabilité. Les schémas de câblage électronique finaux ont permis une interconnexion fiable des différents modules.

Les expérimentations menées sur le prototype ont confirmé avec succès sa capacité à contrôler sa flottabilité et son immersion de manière précise grâce au système de ballast, sa manœuvrabilité en translation et en orientation via le système de propulsion et le gouvernail, et la fiabilité de son système de commande et de communication (notamment le stockage local des données en immersion et la transmission Wi-Fi en surface). Le mini sous-marin s'est montré stable et fonctionnel, répondant ainsi aux objectifs opérationnels fixés.

Ce travail contribue non seulement à l'avancement de la robotique subaquatique dans un contexte de ressources limitées, mais ouvre également des perspectives concrètes pour la recherche scientifique locale, la surveillance environnementale du lac Kivu et la prévention des risques liés aux gaz dissous. Il démontre la faisabilité technique d'une solution innovante et accessible, jetant les bases pour de futures explorations plus ambitieuses.

Contributions

Ce travail apporte une contribution qui répond directement à la problématique de l'accessibilité technique et financière des drones sous-marins, en validant l'hypothèse qu'une architecture simplifiée peut maintenir des performances de navigation élevées. En réponse à nos questions de recherche sur l'optimisation de la maniabilité et de la flottabilité, ce travail met en évidence qu'une transmission directe par pignon moteur et un système de direction à arbre verticale

permettent un contrôle dynamique précis, tout en simplifiant la maintenance. De plus l'utilisation stratégique d'électrovannes pour la gestion des ballasts confirme qu'un contrôle rigoureux de l'immersion est réalisable sans composants industriels complexes. Ainsi, ce mémoire apporte une solution technique viable et robuste, constituant une base de référence pour le développement de la robotique sous-marine au sein de l'institution.

Critique du travail

Bien que le prototype ait atteint ses objectifs primaires, des pistes d'amélioration demeurent. La dépendance à une batterie LiPo impose des limites sur la durée des missions, et l'absence de communication en temps réel en immersion profonde reste un compromis. La précision des capteurs et la robustesse à des pressions supérieures à 21 mètres pourraient être améliorées pour des explorations plus audacieuses. La simulation complète du comportement dynamique du sous-marin en présence de courants aurait également pu affiner davantage le système de contrôle.

Travaux futurs de recherche/Perspectives

Les perspectives de ce travail sont nombreuses et prometteuses :

- **Amélioration de l'autonomie énergétique** : Intégration de panneaux solaires pour la recharge en surface, optimisation de la consommation des actionneurs, ou exploration de sources d'énergie alternatives.
- **Développement d'un système de communication acoustique** : Pour permettre la transmission de données capteurs en temps réel à des profondeurs plus importantes, augmentant ainsi les capacités d'observation et de contrôle.
- **Extension des capacités de navigation autonome** : Implémentation d'algorithmes de SLAM pour la cartographie des fonds, et ajout de capteurs de détection d'obstacles.

- **Instrumentation avancée** : Intégration de capteurs biochimiques pour une analyse plus poussée de la qualité de l'eau ou la détection de gaz spécifiques.
- **Essais à des profondeurs intermédiaires** : Des tests supplémentaires pourraient être menés dans des profondeurs plus proches des limites calculées pour valider la coque dans des conditions plus exigeantes.
- **Applications diversifiées** : Le prototype pourrait être adapté pour des missions de surveillance d'infrastructures sous-marines, de suivi de la biodiversité, ou même pour des applications pédagogiques dans d'autres contextes lacustres.

Ce projet marque une étape importante vers une meilleure compréhension et une exploitation responsable des richesses du lac Kivu, grâce à des solutions technologiques innovantes et adaptées au contexte local.

Bibliographie

- [1] A. J. Jamieson, The Hadal Zone, Cambridge: Life in the Deepest Oceans. Cambridge University Press, 2020.
- [2] AdelKhadhraoui, Modélisationetsimulationinteractivepourlanavigation, EVRY: L'ECOLE POLYTECHNIQUE DE TUNISIE, le 19 novembre 2015.
- [3] Q. G. A. L. F. K. J. Derouane, «ETUDE DE BASE DU BASSIN DU LAC KIVU ET DE LA RIVIÈRE RUZIZI,» KIGALI, 2020.
- [4] F. D. e. M. S. Jean PierreDescy, LAKE KIVU, Limnolody and Biogeochemistry of a TropicalGreat LAKE, Springer (collectionAquatic Ecology serie), 2012.
- [5] L. Beadle, The island waters of tropical africa, 1981.
- [6] wikipédia, «Histoires des sous marins,» [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_des_sous-marins. [Accès le 14 04 2025].
- [7] H. A. Pham, Coordination de systèmes sous-marins autonomes basée, Toulon: <https://theses.hal.science/tel-03788688v1>, , le 23 mars 2021.
- [8] AdelKhadhraoui, Modélisationetsimulationinteractivepourlanavigation, EVRY: L'ECOLE POLYTECHNIQUE DE TUNISIE, 2015.
- [9] AdelKhadhraoui, Modélisationetsimulationinteractivepourlanavigation, à Evry, le 19 novembre 2015 :.
- [10] D. M. O. A. BELOUAT Chaima, Conception d'un drone marin de surface pour, Algerie, 2023 /2024.
- [11] AdelKhadhraoui, Modélisationetsimulationinteractivepourlanavigation, à Evry, , le 19 novembre 2015 :.
- [12] J. G. & R. K. Bellingham, «Robotics in Remote and Hostile Environments,» pp. Science, vol. 318, n°5853, pp. 1098–1102, 2007.

- [13] «IFREMER,» l'IFREMER – France, 2022. [En ligne]. Available: <https://wwz.ifremer.fr>. [Accès le 06 JUILLET 2025].
- [14] D. R. J. M. V. G. C. R. & B. B. Yoerger, «Techniques for Deep Sea Near Bottom Survey Using an Autonomous Underwater Vehicle,» *The International Journal of Robotics Research*, vol. 26(1), pp. 41–54, Vols. %1 sur %2The International Journal of Robotics Research, vol. 26(1), , n° %110.1177/0278364907073782, p. pp. 41–54, 2007.
- [15] G. Antonelli, *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*, Springer, 3e édition, (2014).
- [16] N. S. a. T. O. (. (2020)., «Maritime Unmanned Systems: Capabilities and Requirements,» (2020)..
- [17] J. P. Petit, *Initiation à la mécanique des fluides*, Belin, 2010.
- [18] A. Bensoussan, *Principe de la flottabilité et de la stabilité*, Dunod, 2015.
- [19] N. CHEYMOL, « flottabilité d'un navire,» *Mer et physique* , n° %1Partie 2 : poussée d'Archimède, équilibre d'un navire, 2020.
- [20] I. The Mathworks, «MATLAB Mathworks Product overview,» Natick, .
- [21] omnifab, «omnifab articles techniques,» Montréal, 2023.
- [22] P. B. M. OLIVIER, *Cour Automatique*, Goma, 2025.
- [23] M. Toll, *DIY Lithium Batteries : How to Build YOUR own Battery Packs*, Tool Publishing, 2017, p. 136.
- [24] B. Fourouzan, *Data communications and networking*, New york: McGrawhill, 2012.
- [25] W. Stallings, *Data and computer communications*, Boston: MA :Pearson, 2014.
- [26] n.ourniol, *COMMUNICATION PAR RESEAUX INTERMÉDIAIRES NAVALS AUTONOMES*, 2024.
- [27] T. B. R. David LINDEN, *HANDBOOK OF BATTERIES*, New York: McGrawHill, 2010.
- [28] J. Russel, *mécanique des fluides : fondements et application*, 2025.

- [29] JUnit.org. [En ligne]. Available: <http://www.junit.org>. [Accès le 2 Janvier 2019].
- [30] S. Yokota, Y. Taniguchi et A. Okabe, «Acoustic relay and underwater sensor network for offshore monitoring.,» vol. 18, n° %12, p. 1 à 12, 2018.
- [31] A. Chazal et M. Delanghe, Archéologie sous-marine et nouvelles technologies., Paris: CNRS Éditions, 2020.
- [32] R. W. Kirk, « Mine Warfare and Autonomous Underwater Vehicles.,» *Naval War College Review*, vol. 57, n° %13, p. 23 à 39, 2004.
- [33] N. Morozs, P. D. Mitchell, A. Hinton et P. Davies, « Survey of Underwater Acoustic Networking for Ocean Observing Systems.,» *Sensors* , vol. 20, n° %12, p. 1 à 29, 2020.
- [34] IFREMER, «Infremer.fr,» [En ligne]. Available: <https://wwz.ifremer.fr/engins/Sous-marins-habites/Nautile>. [Accès le 14 04 2025].
- [35] R. G. a. S. Smith, Rovers in Deep Water, Londres: Springer, 2008.
- [36] T. marine, « Slocum Glider Technical Specifications,» [En ligne]. Available: <https://www.teledynemarine.com/slocum-glider>. [Accès le 25 04 2025].
- [37] A. Crespi et A. J. Ijspeert, «Swimming and Crawling with an Amphibious Snake Robot.,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, n° %17, p. 604, 2008.
- [38] N. Fourniol, COMMUNICATION PAR RESEAUX INTERMÉDIAIRES NAVALS AUTONOME, 2024, p. 137.
- [39] J.W.Eaton, D.Bateman, S.Hauberg et R.Wehring, GNU octave Manual, Boston, 2023.

Annexe A

Démonstrations

A.1 Calcul de la pression critique de la coque

Le présent calcul vise à estimer la pression externe maximale que peut supporter un tube cylindrique en polychlorure de vinyle rigide (PVC-U), utilisé comme coque pour un prototype de sous-marin d'exploration

Cas 1 : épaisseur $t=2.5\text{mm}$

$$t = 2,5 \text{ mm} = 0,0025 \text{ m}$$

$$t/R = 0,0025 / 0,055 = 0,04545$$

$$(1 - \nu^2) = 1 - 0,38^2 = 0,8556$$

$$\sqrt{3(1 - \nu^2)} = 1,602$$

$$p_{cr} = (2 \times 3 \times 10^9 / 1,602) \times (0,04545)^3 = 3,52 \times 10^5 \text{ Pa} = 0,352 \text{ MPa} = 3,52 \text{ bar}$$

$$h = p_{cr} / (\rho g) = 3,52 \times 10^5 / (1000 \times 9,81) = 35,9 \text{ m}$$

Cas 2 : épaisseur $t=3\text{mm}$

$$t/R = 0,0030 / 0,055 = 0,05455$$

$$p_{cr} = (2 \times 3 \times 10^9 / 1,602) \times (0,05455)^3 = 6,08 \times 10^5 \text{ Pa} = 0,608 \text{ MPa} = 6,08 \text{ bar}$$

$$h = p_{cr} / (\rho g) = 6,08 \times 10^5 / (1000 \times 9,81) = 62 \text{ m}$$

A.2 Autre formule de la pression critique du PVC

A savoir qu'il y a une autre formule pour trouver la pression critique du PVC :

$$\sigma = (p \cdot D) / 2t \quad (0.1)$$

Ce qui implique que la pression $p = \frac{2t \cdot \sigma_{adm}}{D} (1)$

Avec $\sigma_{adm} = \sigma_{traction} / s$

- p : pression
- D : diamètre extérieur du pvc
- t : épaisseur
- $\sigma = \sigma_{traction}$: contrainte au quel est soumis le pvc
- $\sigma_{admissible}$: contrainte que peut supporter le pvc sans perdre ses propriétés
- s : coefficient de sécurité

Annexe B

Algorithmes

B.1 Code de simulation du remplissage du réservoir 1

Illustré à la figure 2-2, ce code montre le temps qu'il faut pour atteindre la pression cible dans le réservoir interne (réservoir d'air du sous-marin). Cette simulation est faite en supposant que la pression initiale du réservoir interne est de 1 bar.

```
% Paramètres physiques
V1 = 0.5;           % Volume petit réservoir [L]
V2 = 294.5;        % Volume grand réservoir [L]
P2_init = 10;       % Pression initiale grand réservoir [bar]
P1_init = 0;        % Pression initiale petit réservoir [bar]
P_target = 6;       % Pression cible [bar]

% Calcul de la pression finale théorique
P_final = (P1_init*V1 + P2_init*V2) / (V1 + V2); % [bar]

% Coefficient de transfert (ajustable selon le diamètre du
tuyau)
k = 0.1;           % [1/s]

% Vérification de la faisabilité
if P_target > P_final
    error('La pression cible dépasse la pression finale
théorique. Remplissage impossible.');
```

```

end

% Calcul du temps pour atteindre la pression cible
t_target = -log((P_final - P_target) / (P_final - P1_init))
/ k;

% Simulation pour affichage
dt = 0.1;
t_max = ceil(t_target) + 10; % On va un peu au-delà pour
visualiser
t = 0:dt:t_max;
P = P_final - (P_final - P1_init) * exp(-k * t);

% Affichage graphique
figure;
plot(t, P, 'b', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t_target, P_target, 'ro', 'MarkerSize', 8,
'MarkerFaceColor', 'r'); % Marqueur
yline(P_target, '--r', 'Pression cible 6 bar');
xlabel('Temps [s]');
ylabel('Pression dans le petit réservoir [bar]');
title('Remplissage exponentiel et seuil de 6 bar');
legend('Pression simulée', 'Seuil atteint');
grid on;

% Affichage du résultat
fprintf('Temps nécessaire pour atteindre %.1f bar : %.2f
secondes\n', P_target, t_target);

```

B.2 Code de simulation de remplissage de ballasts

Illustré à la figure 2-3, ce code permet d'observer la variation du volume d'air transféré en fonction de la pression dans le réservoir. On observe une relation inverse entre ces deux grandeurs : lorsque la pression dans le réservoir diminue, le volume d'air transféré vers les ballasts augmente progressivement.

```
% Paramètres

V_reservoir = 0.5; % Volume du réservoir (litres)

V_ballons = 4;      % Volume total des ballasts (litres)

P_initial = 7;      % Pression initiale du réservoir (bars)

P_final = 1;        % Pression cible commune (bars)


% Calcul de la pression minimale requise pour que les
ballasts soient gonflés à P_final

P_reservoir_requise = (P_final * V_ballons + P_final *
V_reservoir) / V_reservoir;


% Affichage du résultat

printf("Pression minimale requise dans le réservoir : %.2f
bars\n", P_reservoir_requise);
```



```

% Simulation de la décompression et du transfert d'air

P = linspace(P_initial, P_final + 0.1, 100); % Pression
décroissante

V_air_transfere = V_reservoir * (P_initial ./ P - 1); % Air
transféré depuis le réservoir

% Tracé

figure;

plot(P, V_air_transfere, 'b', 'LineWidth', 2);

xlabel('Pression dans le réservoir (bars)');

ylabel("Volume d'air transféré (litres)");

title("Transfert d'air du réservoir vers les ballasts");

grid on;

```

B.3 Code de l'ESP32 CAM

```

#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_PCF8574.h>
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <WebServer.h>
#include <ESPmDNS.h>

```

```

#include <ESP32Servo.h>
#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>
#include <ArduinoJson.h>
//#include <Servo.h>
#include <ESP32Servo.h>
Servo monServo; // création d'un objet servo

/*
  monServo.write(0);    // position à 0°
  delay(1000);
  monServo.write(90);   // position à 90°
  delay(1000);
  monServo.write(180);  // position à 180°
  delay(1000);
*/

#define R1 2.7 //R1 est de 2.7K
#define R2 10  //R2 est de 10K

const char* ssid = "HydraVision";
const char* password = "Toussaint Barungu";

```

```

byte Cmd1 = 13, Cmd2 = 14, Cmd3 = 4;

// Setting PWM properties
const int freq = 90;//41580;
  int pwmChannel1 = 0, pwmChannel2 = 1, pwmChannel3 = 2;
const int resolution = 8;
int dutyCycle = 80;
bool running;
int SelectedValue = 0;

boolean led_state = false, Button = false;
byte BatteryPin = 36, ButtonPin = 5;
int Buzzer = 19, BMScmd = 18; // Utiliser une broche appropriée
pour le buzzer sur l'ESP32
const int led = 2;//= LED_BUILTIN;
int BatteryLevel = 1;
float Batteryvoltage = 0;
String BatteryCapacity = "", ButtonState;

WebServer server(80);

void handleRoot() {
  int sec = millis() / 1000;
  int min = sec / 60;
  int hr = min / 60;

  String temp = "<html><head><meta http-equiv='refresh'
content='5'/><title>ESP32 Demo</title>"

```

```

        "<style>body { background-color: #cccccc; font-
family: Arial, Helvetica, Sans-Serif; Color: #000088; }</style>"
        "</head><body><h1>Hello                                from
ESP32!</h1><p>Uptime: " + String(hr) + ":" + String(min % 60) +
":" + String(sec % 60) + "</p>"
        "<img src=\"/test.svg\" /></body></html>";
    server.send(200, "text/html", temp);
}

```

```

void handleNotFound() {
    String message = "File Not Found\n\n";
    message += "URI: " + server.uri();
    message += "\nMethod: ";
    message += (server.method() == HTTP_GET) ? "GET" : "POST";

    message += "\nArguments: " + server.args();
    message += "\n";

    for (uint8_t i = 0; i < server.args(); i++) {
        message += " " + server.argName(i) + ": " + server.arg(i) +
"\n";
    }

    server.send(404, "text/plain", message);
}

```

```

void drawGraph() {

```

```

String out = "<svg xmlns=\"http://www.w3.org/2000/svg\"
version=\"1.1\" width=\"400\" height=\"150\">\n";
out += "<rect width=\"400\" height=\"150\" fill=\"rgb(250,
230, 210)\" stroke-width=\"1\" stroke=\"rgb(0, 0, 0)\" />\n";
out += "<g stroke=\"black\">\n";
int y = random(130);
for (int x = 10; x < 390; x += 10) {
    int y2 = random(130);
    out += "<line x1='" + String(x) + "' y1='" + String(140 -
y) + "' x2='" + String(x + 10) + "' y2='" + String(140 - y2) +
"' stroke-width='1' />\n";
    y = y2;
}
out += "</g>\n</svg>\n";

server.send(200, "image/svg+xml", out);
}

void bip1() {
    digitalWrite(Buzzer, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(Buzzer, LOW);
}

void bip2() {
    digitalWrite(Buzzer, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(Buzzer, LOW);
}

```

```

void setup() {
  pinMode(led, OUTPUT);
  pinMode(BatteryPin, INPUT);
  pinMode(ButtonPin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(Buzzer, OUTPUT);
  pinMode(BMScmd, OUTPUT);

  Serial.begin(115200);

  Serial.println("Starting"); delay(3000);
  ledcSetup(pwmChannel1, freq, resolution);
  ledcSetup(pwmChannel2, freq, resolution);
  ledcSetup(pwmChannel3, freq, resolution);

  monServo.attach(12); // on relie le servo à la broche 12
  pinMode(Cmd1, OUTPUT); pinMode(Cmd2, OUTPUT); pinMode(Cmd3,
  OUTPUT);

  // attach the channel to the GPIO to be controlled
  ledcAttachPin(Cmd1, pwmChannel1); ledcAttachPin(Cmd2,
  pwmChannel2); ledcAttachPin(Cmd3, pwmChannel3);

  //monServo.write(180);
  WiFi.softAP(ssid, password);

```

```

Serial.print("IP address: ");
Serial.println(WiFi.softAPIP());

if (MDNS.begin("esp32")) {
    Serial.println("MDNS responder started");
}

server.on("/", handleRoot);
server.on("/test.svg", drawGraph);
server.on("/up/clicked", []() {
    server.send(200, "text/plain", "up");
    bip1(); ledcWrite(pwmChannel2, 0); ledcWrite(pwmChannel3,
254);
    Serial.println("The HydraVision go up ");
});
server.on("/down/clicked", []() {
    server.send(200, "text/plain", "down");
    bip1(); ledcWrite(pwmChannel2, 254); ledcWrite(pwmChannel3,
0);
    Serial.println("The HydraVision go down ");
});
server.on("/right/clicked", []() {
    server.send(200, "text/plain", "right");
    bip1(); monServo.write(180);    // position à 0°
    Serial.println("The HydraVision go right ");
});
server.on("/left/clicked", []() {
    server.send(200, "text/plain", "left");
    bip1(); monServo.write(40);

```

```

    Serial.println("The HydraVision go left ");
});
server.on("/main/batteryvoltage", []() {
    server.send(200, "text/plain", BatteryCapacity);
    bip1();
    Serial.println("Main voltage battery sent : ");
    Serial.print(BatteryCapacity);
});
server.on("/monitor/connexion/test", []() {
    server.send(200, "text/plain", "Monitor connexion
successfully\n Battery data is available");
    bip1();
    Serial.println("Monitor connexion successfully");
    if(!led_state) {led_state = true;} else{led_state = false;}
    digitalWrite(led, led_state);
});

server.on("/battery/state", []() {
    server.send(200, "text/plain", ButtonState);
    bip1();
    Serial.print("The battery is ");
    Serial.println(ButtonState);
});

server.on("/start/motor", []() {
    server.send(200, "text/plain", "HydraVision motor
started");
    bip1(); ledcWrite(pwmChannell, dutyCycle);

```



```

        Serial.println("The HydraVision started ");
    });

    server.on("/start/off", []() {
        server.send(200, "text/plain", "HydraVision stoped");
        bip1();

        ledcWrite(pwmChannel1, 0); Serial.println("Cmd1*****
low");
        ledcWrite(pwmChannel2, 0); Serial.println("Cmd2*****
low");
        ledcWrite(pwmChannel3, 0); Serial.println("Cmd3*****
low");
        monServo.write(5);

        Serial.println("The HydraVision stoped ");
    });

    server.on("/test/bip1", bip1);
    server.on("/test/bip2", bip2);
    server.onNotFound(handleNotFound);

    server.begin();
    Serial.println("HTTP server started");
}

void loop() {
    /*

```

```

    delay(100);          ledcWrite(pwmChannel1,      dutyCycle/3);
Serial.println("Cmd1***** high");
    delay(100);          ledcWrite(pwmChannel2,      dutyCycle/3);
Serial.println("Cmd2***** high");
    ledcWrite(pwmChannel3,      dutyCycle);          delay(100);
    ledcWrite(pwmChannel3,      dutyCycle/3);
Serial.println("Cmd3***** high");
    delay(10000);

    ledcWrite(pwmChannel1, 0);  Serial.println("Cmd1*****
low");

    ledcWrite(pwmChannel2, 0); Serial.println("Cmd2*****
low");

    ledcWrite(pwmChannel3, 0);  Serial.println("Cmd3*****
low");
    delay(3000);
*/

    boolean BntSt = digitalRead(ButtonPin);
    if(!BntSt){ButtonState = "ON";} else{ButtonState = "OFF";}

    if (Serial.available()) {
        // StaticJsonDocument<256> doc;

        String input = Serial.readStringUntil('\n');  // Waits for
        newline
        StaticJsonDocument<256> doc;

```

```

DeserializationError error = deserializeJson(doc, input);

    // DeserializationError error = deserializeJson(doc,
Serial);

    if (!error) {
        Batteryvoltage = doc["Batteryvoltage"];          // ...and
so on for other values
Serial.print("Datas          received:          ");
Serial.println(Batteryvoltage);
    }
}

//Batteryvoltage = analogRead(BatteryPin);
if((Batteryvoltage >= 2.80) && (Batteryvoltage <= 3.70))
{digitalWrite(BMScmd,1);}
else {digitalWrite(BMScmd,0);}
BatteryCapacity = String(Batteryvoltage, 2);

server.handleClient();
// Serial.print("cmd = ");Serial.println(cmd); delay(500);

//MDNS.update();
}

```

B.4 Code de la simulation du fluide autour du prototype

```

clear all; close all; clc;

% 1. Paramètres

```

```

L = 0.75; D = 0.11; R = D/2; U_inf = 1.2;

% 2. Grille
[X, Y] = meshgrid(linspace(-0.1, 0.85, 150), linspace(-0.25,
0.25, 150));

% 3. Géométrie
mask_corps = (X >= 0 & X <= L-D) & (abs(Y) <= R);
mask_nez = (X < 0) & (X.^2 + Y.^2 <= R^2);
mask_poupe = (X > L-D) & ((X-(L-D)).^2 + Y.^2 <= R^2);
mask_ballasts = (X > 0.25 & X < 0.45) & (abs(Y) >= R & abs(Y)
<= R+0.04);
proto = mask_corps | mask_nez | mask_poupe | mask_ballasts;

% 4. Calcul du champ de vitesse (Simplifié pour lignes de champ
fluides)
u = U_inf * (1 - (R^2 * (X.^2 - Y.^2) ./ (max(0.001, X.^2 +
Y.^2).^2)));
v = U_inf * (-R^2 * (2 * X .* Y) ./ (max(0.001, X.^2 + Y.^2).^2));
u(proto) = 0; v(proto) = 0;

% 5. Définition manuelle des zones selon ton observation
% Zone Laminaire : Avant (x < 0.25) et Après ballasts (x > 0.45)
% Zone Turbulente : Au niveau des ballasts (0.25 <= x <= 0.45)
regime_visuel = zeros(size(X));
regime_visuel(X >= 0.25 & X <= 0.45) = 1; % Zone turbulente aux
ballasts

% 6. Visualisation

```

```

figure('Color', 'w', 'Position', [100 100 900 450]); hold on;

% Affichage des zones (Bleu = Laminaire, Rouge = Turbulent)
imagesc([min(X(:))    max(X(:))], [min(Y(:))    max(Y(:))],
regime_visuel);
colormap([0.4 0.6 1.0; 1.0 0.4 0.4]); % Bleu clair et Rouge doux
alpha(0.3);

% Lignes de champ (Fluide qui se déplace)
starty = linspace(-0.23, 0.23, 20);
startx = -0.09 * ones(size(starty));
h = streamline(X, Y, u, v, startx, starty);
set(h, 'Color', [0.1 0.1 0.1], 'LineWidth', 1.2);

% Dessin du prototype
contourf(X, Y, double(proto), [0.5 0.5], 'FaceColor', 'k');

% Annotations
text(0.05, 0.22, 'LAMINAIRE', 'FontWeight', 'bold', 'Color',
'b');
text(0.28, 0.22, 'TURBULENCE', 'FontWeight', 'bold', 'Color',
'r');
text(0.55, 0.22, 'STABILISATION', 'FontWeight', 'bold',
'Color', 'b');

title('Écoulement autour du Prototype : Impact local des
Ballasts');
xlabel('Longueur (m)'); ylabel('Largeur (m)');
axis equal; axis([-0.1 0.85 -0.25 0.25]); grid on;

```

hold off;

Annexe C

Coût du prototype et Bref aperçu de l'application

C.1 Cout du prototype

Le tableau ci-dessous présente la liste des matériels, leurs caractéristiques, leurs quantités et leurs prix en dollar américain sur le marché de Goma.

Tableau 4 Cout du prototype

<i>Description</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Quantité</i>	<i>Prix unité</i>	<i>Prix total</i>
<i>Microntroleur</i>	ESP 32 CAM	1	17	17
<i>Batterie</i>	Type lipo	6	4	24
<i>Électrovannes</i>		2	10	20
<i>Réservoir d'air</i>		1	10	10
<i>Moteur électrique</i>		1	10	10
<i>Impression 3D & Coque</i>				50
<i>Tuyau</i>				7
<i>Raccord en T</i>		2	2	4
<i>Autre raccord</i>				3

<i>Résistances</i>		1lot	5	5
<i>Condensateurs</i>		1lot	5	5
<i>Diodes</i>		1lot	5	5
<i>Régulateur</i>	7805	2	1	2
<i>Régulateur</i>	7812	1	1	1
<i>Carte imprimée</i>		1	6	6
<i>Circuit intégré</i>	SG3524	1	2	2
<i>Bobine</i>		1	3	3
<i>Potentiomètre</i>	B10K	1	0.5	0.5
<i>Transistor</i>	2N2222	6	0.5	3
<i>Mosfet</i>	IRNFZ44N	3	1	3
<i>Bornier</i>		4	0.5	2
<i>Led</i>		2	1	2
<i>Barette</i>		1	1	1
<i>Serre câble</i>		1paquet	3	3
<i>Etain</i>		1roulaux	15	15
<i>Vis</i>		14	0.5	7
<i>Fils</i>				4

<i>Ballons gonflables</i>	4	0.5	2
<i>Joint Oing</i>	2	3	6
<i>Joint SPI</i>	1	5	5
<i>Silicone</i>	1sachet	5	5
<i>Colle à bougie</i>	10	0.5	5
<i>Super glue</i>	8	0.5	4

Total 253.5 dollars

C.2 Bref aperçu de l'application

L'application IP Webcam transforme n'importe quel appareil Android en camera réseau (IP) polyvalente. Dans le cadre de mon projet de sous-marin, elle est particulièrement utile pour diffuser un flux vidéo en direct via un réseau Wi-Fi local sans avoir besoin d'un accès internet complexe.

Annexe D

Photos du prototype



Photos prototype 1 Réservoir d'air



Photos prototype 2 Partie arrière du sous-marin



Photos prototype 3 Ensemble montrant la partie électrique