

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département de Génie mécanique et Électromécanique



N° Réf :

Projet de Fin d'Étude préparé en vue de l'obtention du diplôme
De **MASTER**
Spécialité : Électromécanique

**Conception et optimisation d'une enceinte étanche
pour drone sous-marin**

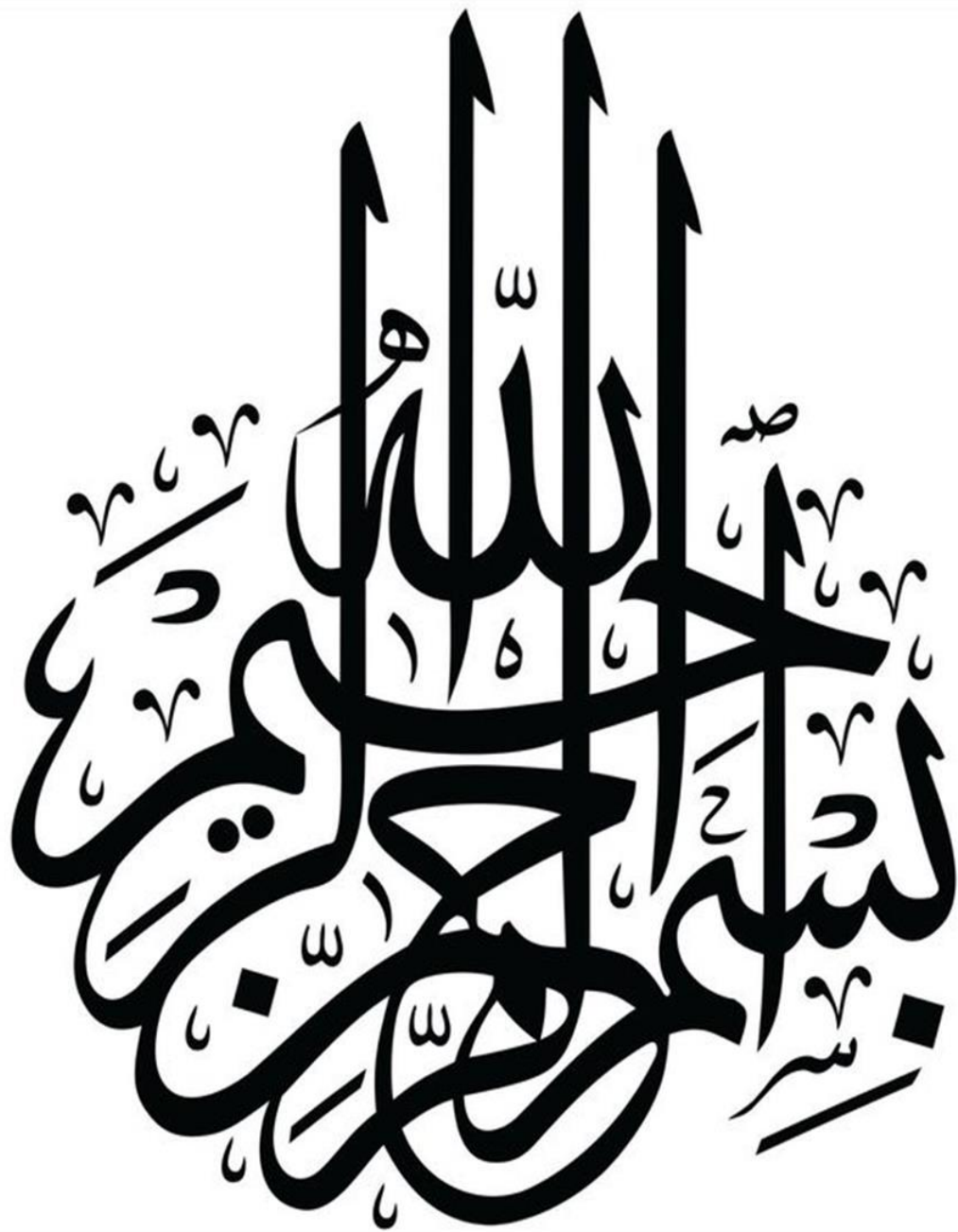
Réalisé par :

- BOUTEBAKH Akram
- GUENDOUZ Yasser
- GUERMICHE Tayeb

Soutenu devant le jury :

- | | |
|----------------------|-----------|
| - Dr. K. HIMOUR | Président |
| - Dr. B. SMAANI | Examineur |
| - Dr. H. BOUCHENITFA | Promoteur |

Année universitaire : 2024/2025



Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos familles, en particulier à nos parents, pour leur amour inconditionnel et leur soutien sans faille.

À ceux qui ont cru en nous, même quand nous doutions.

À nos amis, qui ont su nous faire rire dans les moments de fatigue et de stress.

Aux enseignants qui nous ont transmis leur savoir avec passion et exigence.

À tous ceux qui nous ont inspirés, encouragés ou simplement écoutés. Ce travail est le reflet d'un parcours, parfois difficile, mais toujours enrichissant.

Il est le fruit d'un effort collectif, nourri de confiance, de patience et de volonté.

Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont fait partie de cette aventure.

Yasser, Akram, Tayeb

Remerciements

Avant tout, nous rendons grâce à Dieu, Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la sagesse et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre plus sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.

Un immense merci à notre encadrant, Dr. Hicham BOUCHENITFA, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, sa rigueur scientifique et son soutien constant tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements à l'ensemble de nos enseignants, qui nous ont transmis bien plus que des connaissances : une véritable méthode de réflexion, de recherche et d'apprentissage.

À nos familles, pour leur soutien moral inestimable, leur patience et leur confiance, même dans les moments de doute.

À nos amis, pour leurs discussions stimulantes, leurs encouragements, leurs pauses café revigorantes et pour les moments de motivation partagée.

Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif, façonné par des efforts, des échecs, des ajustements... mais surtout une grande passion.

Enfin, à toutes celles et ceux qui ont croisé notre chemin tout au long de ce parcours, un grand merci.

Nomenclature

AL	: Aluminium
AUV	: Autonomous Underwater Vehicle
Bio	: Biomimétique
CFD	: Computational Fluid Dynamics
DC	: Direct Current
DVL	: Doppler Velocity Log
GPS	: Global Positioning System
HY	: High Yield
INS	: Inertial Navigation System
LED	: Light Emitting Diode
MMC	: Métal Matrix Composite
NBR	: Nitrile Butadiene Rubber
PDB	: Power Distribution Board
PVC	: Polychlorure de vinyle
PWM	: Pulse width modulation
ROV	: Remotely Operated Underwater Vehicle
SAV	: Semi autonomes véhicules
SiC	: Carbure de silicium
UUV	: Unmanned Underwater Vehicle

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Nomenclature

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité sur les drones sous-marins

1.	Introduction.....	3
2.	Définition	3
2.1.	Types et caractéristiques des drones sous-marins.....	3
2.1.1.	Drone sous-marin téléguidé ROV	4
2.1.2.	Drone sous-marin autonomes AUV	7
2.1.3.	Hybride ROV-AUV	9
3.	Domaines d'application	11
3.1.	Le domaine civil	12
3.1.1.	Exploration océanographique	12
3.1.2.	Industrie pétrolière et gazière.....	12
3.1.3.	Loisirs et exploration personnelle	13
3.2.	Le domaine militaire	14
4.	Classification des drones sous-marin.....	14
4.1.	Classification selon le Mode de Contrôle	14
4.2.	Classification selon la Profondeur d'Opération.....	15
4.3.	Classification selon la taille et la capacité	16
4.3.1.	Les mini drones sous-marins	16
4.3.2.	Les drones de taille moyenne.....	17
4.3.3.	Les grands drones sous-marins	17
5.	Les semi autonomes véhicules - SAV	18

5.1.	Introduction.....	18
5.2.	Définition	18
5.3.	Historique et Développement	18
5.4.	Le modèle SAUVIM.....	19
5.5.	Caractéristiques Principales des SAV	20
5.6.	Comparaison des Véhicules Sous-Marins	21
6.	Conclusion	22

Chapitre II : La technologie des drones sous-marins

1.	Introduction.....	23
2.	La conception et les principaux composants	23
3.	La structure	24
3.1.	Les matériaux utilisés	25
3.2.	Le type de structure.....	26
3.2.1.	La structure fermée	26
3.2.2.	La structure ouverte	27
3.3.	La forme géométrique.....	28
3.3.1.	La forme cylindrique.....	28
3.3.2.	La forme cubique	30
3.3.3.	Forme inspirée de la nature	31
4.	La propulsion	34
4.1.	Propulsion par hélices	34
4.1.1.	Le moteur électrique	35
4.1.2.	L'hélice	36
4.1.3.	L'alimentation électrique	37
4.2.	Propulsion biomimétique (Bio-inspirée)	38
4.3.	Propulsion par injection d'eau	38
5.	La partie commande.....	40

5.1.	Introduction.....	40
5.2.	Système de communication	41
5.3.	Système de contrôle	41
5.3.1.	Ordinateur de bord	42
5.3.2.	Le contrôleur de vol	43
5.4.	Système de navigation	43
5.4.1.	Camera et éclairage	43
5.4.2.	Les capteurs	45
6.	La protection des éléments électrique et électronique	47
6.1.	Introduction.....	47
6.2.	Les défis de la protection des circuits électroniques en grande profondeur ..	47
6.2.1.	La pression et son impact sur les composants électroniques	47
6.2.2.	L'exposition des éléments électroniques à l'eau.....	48
6.3.	La protection	50
6.3.1.	Protection des éléments sensibles	50
6.3.2.	Protection des câbles électriques	51
7.	Conclusion	51

Chapitre III : Conception de l'enceinte de protection

1.	Introduction.....	52
2.	Analyse fonctionnelle	52
2.1.	Définition	52
2.2.	Les types d'analyse fonctionnelle.....	52
2.2.1.	L'analyse fonctionnelle externe	52
2.2.2.	L'analyse fonctionnelle interne	54
2.3.	Les fonctions de l'analyse fonctionnelle	54
2.4.	L'utilisation de l'analyse fonctionnelle.....	55
2.5.	Application au cas d'enceinte de protection	56

2.5.1.	Identification des besoins.....	56
2.5.2.	Diagramme pieuvre.....	57
2.6.	Ordre d'importance.....	58
3.	Conception proposée.....	58
3.1.	Introduction.....	58
3.2.	La partie extérieure	58
3.2.1.	La forme choisie	59
3.2.2.	Matériau de fabrication	60
3.2.3.	Système de fermeture et d'étanchéité.....	60
3.2.4.	Système de passage de câble étanche	60
3.3.	La partie intérieure.....	61
3.3.1.	Les composants utilisés.....	62
3.3.2.	Le support interne	64
4.	Modélisation et simulation.....	64
4.1.	Introduction.....	64
4.2.	L'environnement de travail.....	64
4.3.	La modélisation du système.....	65
4.3.1.	Le support interne	66
4.3.2.	Le couvercle droit	67
4.3.3.	Le couvercle gauche	70
4.3.4.	Le tube	72
4.4.	La simulation du système	74
4.4.1.	L'objectif de simulation.....	74
4.4.2.	La méthodologie	74
4.4.3.	Les conditions aux limites et chargements	74
4.4.4.	Les résultats de simulation.....	74
4.4.5.	Conclusion	77
5.	Conclusion générale.....	78

Résumé..... 79

Bibliography 80

Liste des tableaux

Chapitre I.

Tableau I.1 : Classification des drones sous-marin selon la Profondeur d'Opération..... 15

Tableau I.2 : Comparaison des Véhicules Sous-Marins21

Chapitre II.

Tableau II.01 : Propriétés des matériaux des cabines de drones sous-marins. [18]26

Chapitre III.

Tableau III.1 : Fonctions de services d'enceinte de protection du drone sous-marin58

Liste des figures

Chapitre I.

Figure I.01 : Les différents véhicules sous-marins autonomes.....	4
Figure I.02 : Le système ROV	5
Figure I.03 : Certains des ROV actuels	5
Figure I.04 : ROV R7	6
Figure I.05 : Câble de drone sous-marin ROV	7
Figure I.06 : Le système AUV	7
Figure I.07 : Certains des AUV actuels	8
Figure I.08 : REMUS 620.....	9
Figure I.09 : Hybridation des Véhicules Sous-Marins	10
Figure I.10 : HROV Ariane [8].....	10
Figure I.11 : Double Eagle SAROV [9].....	11
Figure I.12 : Robots sous-marins de l'exploration océanographique	12
Figure I.13 : L'inspection des pipelines.....	13
Figure I.14 : Robots sous-marins de l'exploration personnelle	13
Figure I.15 : Drone sous-marin militaire	14
Figure I.16 : Modes de contrôle des Véhicules Sous-Marins	15
Figure I.17 : Les différentes tailles des Véhicules Sous-Marins	16
Figure I.18 : Un mini drone sous-marin	16
Figure I.19 : Drone sous-marin de taille moyenne	17
Figure I.20 : Drone sous-marin de grande taille	17
Figure I.21 : Le modèle SAUVIM [14]	19

Chapitre II.

Figure II.01 : Les différents composants d'un drone sous-marin [15]	23
Figure II.02 : Cadre d'un drone sous-marin [16].....	24
Figure II.03 : Analyse de la Résistance Hydrodynamique à l'aide de la Simulation CFD [17].....	25
Figure II.04 : Robot sous-marin Fifish v6 expert	27
Figure II.05 : PIVOT ROV	27
Figure II.06 : Le robot télécommandé Snoopy [19]	28
Figure II.07 : Le robot REMUS 1994 [19]	29

Figure II.08 : Le modèle Integra AUV/ROV [20]	29
Figure II.09 : Drone Sous-Marin à Structure Cubique [20].....	30
Figure II.10 : Le modèle BlueROV2 [21].....	31
Figure II.11 : Classification des robots bio inspirés selon leur mode de nage	32
Figure II.12 : Le robot dauphin [19]	33
Figure II.13 : Robot sous-marin biomimétique	33
Figure II.14 : Le système (moteur + hélice)	34
Figure II.15 : Le propulseur T200 [22].....	35
Figure II.16 : Moteur à courant-continu [23].....	36
Figure II.17 : Moteur sans balais	36
Figure II.18 : L'hélice.....	37
Figure II.19 : L'alimentation des drones sous-marins	37
Figure II.20 : Fish Robot, PF-550 [24]	38
Figure II.21 : Expulsion de l'eau à travers une buse.	39
Figure II.22 : Drone sous-marin [25].....	39
Figure II.23 : Système de commande d'un drone sous-marin	40
Figure II.24 : Moyen de communication (ROV et AUV).....	41
Figure II.25 : Le système de contrôle	41
Figure II.26 : NVIDIA Jetson Xavier NX. [27].....	42
Figure II.27 : Raspberry	42
Figure II.28 : Pixhawk	43
Figure II.29 : Caméra pour ROV / AUV / USV	44
Figure II.30 : Projecteur pour Chasing M2 ROV. [28].....	44
Figure II.31 : Le capteur	45
Figure II.32 : DVL A125. [29]	45
Figure II.33 : 3D Sonar. [30]	46
Figure II.34 : Variation de la pression en fonction de la profondeur sous l'eau	47
Figure II.35 : Broches dessoudées et déformées. [31].....	48
Figure II.36 : Risque de fuite d'eau.....	48
Figure II.37 : Risque de corrosion. [33].....	49
Figure II.38 : Risque de court-circuit. [33].....	50
Figure II.39 : Coque de protection transparente. [34].....	50
Figure II.40 : Un connecteur étanche pour les drones sous-marin. [35].....	51

Chapitre III.

Figure III.01 : Diagramme bête à cornes d'une analyse externe	53
Figure III.02 : Diagramme de l'analyse fonctionnelle [36]	54
Figure III.03 : Exemple des fonctions analyse fonctionnelle	55
Figure III.04 : Démarche générale de l'analyse fonctionnelle	56
Figure III.06 : Le diagramme pieuvre pour l'enceinte de protection.....	57
Figure III.07 : La forme cylindrique	59
Figure III.08 : L'effet de la pression sur les formes géométriques sous l'eau	59
Figure III.09 : Système de fermeture et d'étanchéité	60
Figure III.10 : Presse-étoupe [38]	61
Figure III.11 : Connexion à travers un presse-étoupe [38]	61
Figure III.12 : Le Pixhawk.....	62
Figure III.13 : Le Raspberry	62
Figure III.14 : Carte de communication.....	63
Figure III.15 : Carte de distribution d'alimentation.....	63
Figure III.16 : Variateur de vitesse	64
Figure III.17 : SolidWorks interface.....	65
Figure III.18 : Vue isométrique avant de l'enceinte de protection	65
Figure III.19 : Vue isométrique arrière de l'enceinte de protection	66
Figure III.20 : La distribution des composants sur le support interne	67
Figure III.21 : Éléments de fixation pour les composants et les câbles.....	67
Figure III.22 : Le couvercle droit.....	68
Figure III.23 : Dimensions du joint torique type NBR 70 Shore A.....	68
Figure III.24 : L'ensemble (couvercle droit – support)	69
Figure III.25 : Couvercle droit avec un joint torique frontal	70
Figure III.26 : L'ensemble (couvercle droit-cache de camera).....	70
Figure III.27 : Le couvercle gauche.....	71
Figure III.28 : L'ensemble couvercle gauche – couvert	71
Figure III.29 : Passage des câbles à travers les presses étoupes + la valve	72
Figure III.30 : Le tube.....	73
Figure III.31 : Fixation de l'enceinte de protection sur le drone	73
Figure III.32 : Analyse de von mise coté avant	75
Figure III.33 : Analyse de von mise coté arrière	75
Figure III.34 : Contrainte principale maximale	76
Figure III.35 : Analyse de déplacement.....	77

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, l'exploration et l'exploitation des environnements sous-marins suscitent un intérêt croissant, tant dans les domaines civils que militaires. Toutefois, les contraintes physiques imposées par le milieu marin : pression, obscurité, accès limité, rendent ces activités particulièrement complexes et coûteuses. C'est dans ce contexte que les drones sous-marins ont émergé comme des outils technologiques innovants et performants.

Ces engins, capables de naviguer et d'intervenir sous l'eau sans pilote humain à bord, révolutionnent les méthodes d'observation, de surveillance, de cartographie ou encore de maintenance dans les profondeurs marines. Ils sont aujourd'hui utilisés dans une grande variété de secteurs : recherche océanographique, exploration des fonds marins, sécurité maritime, détection de mines, inspection d'infrastructures sous-marines ou encore exploitation pétrolière et gazière offshore.

La protection des composants internes, en particulier les circuits électroniques, les capteurs, les modules de communication et les systèmes d'alimentation, devient une priorité absolue. Ces éléments, souvent sensibles et coûteux, sont essentiels au bon fonctionnement du drone. La moindre infiltration d'eau peut provoquer des courts-circuits, une corrosion accélérée, ou une défaillance totale du système embarqué. C'est pourquoi il est indispensable de concevoir des enceintes étanches et robustes capables de garantir une isolation parfaite du milieu extérieur.

Dans ce contexte, la conception d'une enceinte étanche devient un enjeu technique central. Elle vise à isoler les circuits électroniques, batteries, capteurs et autres modules de commande du milieu extérieur, tout en garantissant leur bon refroidissement, leur accessibilité et leur sécurité fonctionnelle. L'enceinte de protection n'est pas une simple boîte étanche : elle doit être conçue en tenant compte de plusieurs facteurs, tels que la résistance mécanique, l'étanchéité, la facilité d'intégration des composants, ainsi que l'optimisation du volume et de la masse. Une mauvaise conception peut entraîner des défaillances critiques, voire la perte totale du drone.

Dans ce mémoire, nous nous sommes concentrés sur la conception et la réalisation d'une enceinte étanche pour un drone sous-marin. Le travail est divisé en plusieurs parties. Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les drones sous-marins, leurs types, leurs domaines d'utilisation, et les systèmes autonomes de véhicules. Le deuxième

chapitre est consacré à l'étude de leur technologie, en détaillant la structure, la propulsion, la commande, et les protections nécessaires pour les éléments électroniques. Ensuite, dans le troisième chapitre, nous décrivons notre propre conception d'une enceinte de protection, à partir d'une analyse fonctionnelle, jusqu'à la modélisation et la simulation. Enfin, nous avons conclu par une conclusion générale. Ce travail vise à proposer une solution simple, efficace et adaptée aux conditions du milieu sous-marin pour assurer la protection des éléments sensibles du drone.

Chapitre I

Généralités sur les drones sous-marins

1. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous allons introduire des généralités sur les drones sous-marins. Nous commencerons par une définition claire de ces véhicules. Puis les principaux domaines d'application dans lesquels ces drones sont utilisés. Ensuite nous examinerons également leur classification en fonction de leurs caractéristiques et de leurs usages. Enfin nous allons explorer les SAV, avant de conclure par un aperçu des perspectives et évolutions futures de cette technologie.

2. Définition

Les drones sous-marins sont des appareils modernes conçus spécifiquement pour fonctionner sous l'eau sans avoir besoin d'un pilote humain à bord. Grâce à l'évolution continue et le développement de moyens et de mécanismes modernes, leur utilisation considérablement développés, et devenant un outil essentiel pour l'exploration et la gestion des océans. Ils permettent d'accéder à des zones inaccessibles ou dangereuses pour l'homme, tout en offrant des solutions rapides et économiques pour des tâches complexes. Grâce à leur petite taille et à leurs équipements sophistiqués, tels que les capteurs intelligents et les caméras haute résolution, les drones sous-marins permettent d'observer les fonds marins avec une grande précision et de fournir des données détaillées. Ils jouent un rôle clé dans la surveillance des changements climatiques en mesurant des paramètres essentiels comme la température, la salinité et la qualité de l'eau, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des impacts environnementaux. Cependant, leur utilisation est confrontée à des défis techniques majeurs, notamment la résistance aux conditions extrêmes (pression, corrosion), les difficultés de communication sous-marine et les limites liées à leur autonomie énergétique.

2.1. Types et caractéristiques des drones sous-marins

Véhicule sous-marin autonome (Unmanned Underwater Vehicle UUV) : il s'agit d'un engin subaquatique non piloté qui possède des mécanismes de navigation et de travail, variant en fonction de son degré d'autonomie. C'est pourquoi le défi majeur réside dans la recherche de moyens pour capter l'énergie nécessaire. [1]

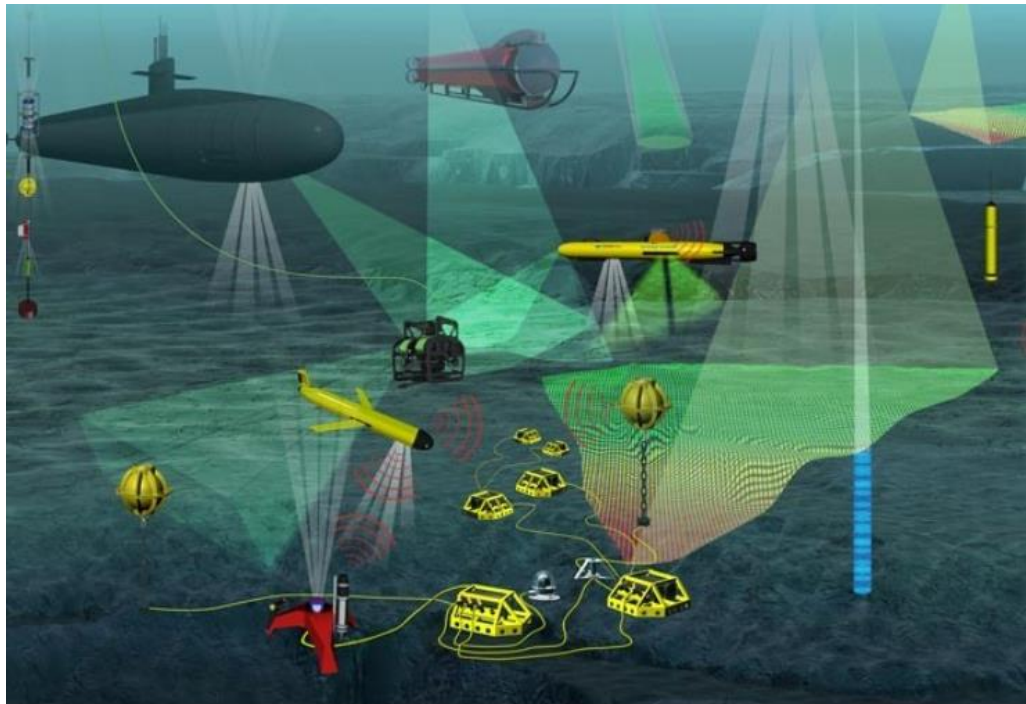


Figure I.01 : Les différents véhicules sous-marins autonomes

On distingue les principaux types suivants :

- Les drones sous-marins téléguidés (Remotely Operated Underwater Vehicle ou ROV).
- Les drones sous-marins autonomes (Autonomous Underwater Vehicle ou AUV).
- La classe hybride AUV-ROV.

Les sections ci-dessous, de 2.1.1 à 2.1.3, exposeront les caractéristiques propres à chaque catégorie.

2.1.1. Drone sous-marin téléguidé ROV

Les drones sous-marins téléguidés (ROV) en anglais Remotely Operated underwater Vehicle sont des machines sous-marines télécommandées conçu pour fonctionner sous l'eau, piloté à distance depuis une station au sol comme illustré dans la figure 2, la communication entre le ROV et l'opérateur se fait à travers un câble électrique cet technologie permet la transmission des données, des commande et d'alimentation électrique.

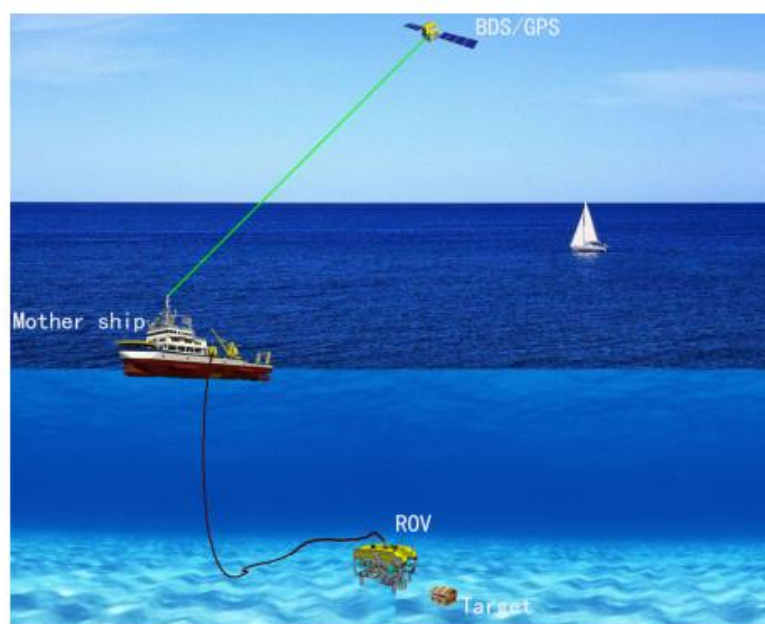
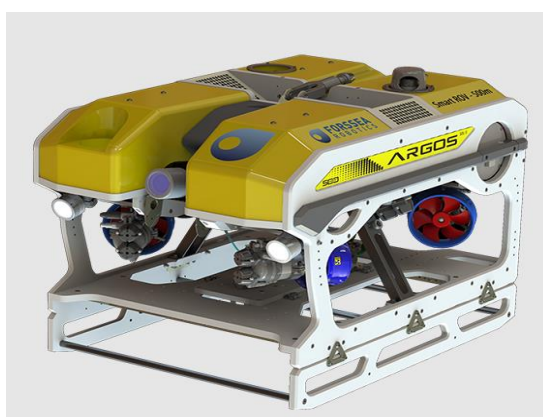


Figure I.02 : Le système ROV

Les ROV sont employés pour des multitude de missions car ils jouant un rôle crucial en explorant des zones sous-marines inaccessibles tout en évitant d'exposer les plongeurs à des risques potentiels. Ces dernières années ils ont connu de grands progrès là où ils ont acquis la capacité de plonger et de descendre à des profondeurs extrêmes jamais atteintes auparavant tout en conservant leur précision, stabilité et efficacité optimale c'est grâce à l'intégration de cartes électroniques sophistiquées, de capteurs de pointe, de caméras haute résolution et de sonars 3D. La figure 3 présente certains des ROV actuels.



(a) : ROV-Argos. [2]



(b) : Mini-ROV Observer. [3]

Figure I.03 : Certains des ROV actuels

La figure 4 présente le modèle ROV R7, conçu par la société Exail Robotics, spécialement dédié aux missions d'identification et de destruction d'engins non explosés (UXO) en milieu marin. Ce ROV, capable de réaliser des levées de doute jusqu'à des profondeurs de 300 mètres. Léger, rapide et facile à manipuler, le ROV R7 est équipé d'une caméra et d'un sonar, offrant une visibilité optimale même en eaux troubles et permettant d'obtenir des images haute définition en temps réel. [4]



Figure I.04 : ROV R7

L'avantage du ROV est dans sa capacité à assurer une communication constante avec la station de contrôle, ils peuvent rester sous l'eau beaucoup plus longtemps qu'un plongeur humain, augmentant ainsi le temps disponible pour l'exploration. D'autres atouts indéniables, la rapidité et la précision dans l'exécution des tâches grâce à son équipement sophistiqué. L'enrouleur de câble des ROV (figure 5) joue un rôle essentiel en matière de sécurité, Dans de telles situations, il devient nécessaire dans l'extraction du ROV de sous l'eau en cas de perte de connexion.



Figure I.05 : Câble de drone sous-marin ROV

L'utilisation du câble présente des inconvénients, d'une part avec l'augmentation de la longueur du câble, il peut y avoir une chute de tension ou un affaiblissement du signal, ce qui affecte le contrôle et les performances du ROV. D'autre part, Le fonctionnement du ROV est limité uniquement par la longueur du câble. Finalement Le câble peut entraver le ROV dans l'exécution de certaines missions sous l'eau en limitant ses mouvements ou en s'emmêlant dans des obstacles.

2.1.2. Drone sous-marin autonomes AUV

Un AUV (Autonomous Underwater Vehicle) est un drone sous-marin autonome conçu pour effectuer des missions sans être relié à un opérateur en surface. Contrairement aux ROV, qui sont contrôlés à distance via un câble.

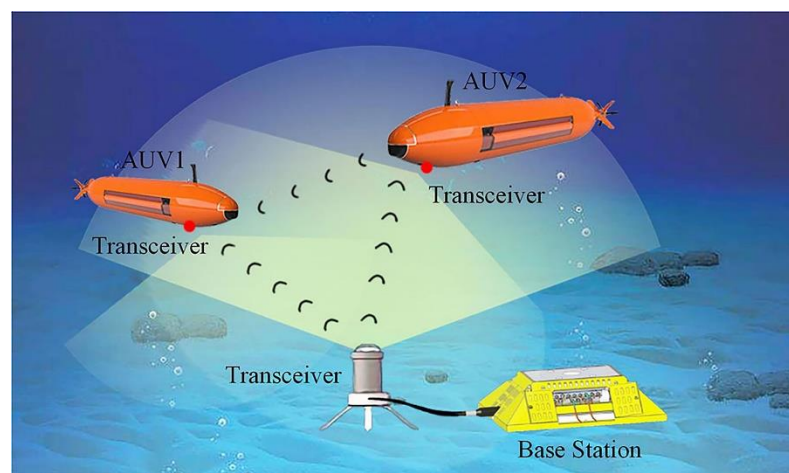


Figure I.06 : Le système AUV

En générale, les AUV adoptent une forme de torpille afin de réduire leur traînée hydrodynamique, ce qui diminue leur consommation d'énergie et augmente leur autonomie. Les modèles les plus petits sont suffisamment légers pour être transportés par une seule personne, tandis que les plus grands peuvent mesurer plusieurs mètres de long. Leur autonomie varie de quelques heures à plusieurs dizaines d'heures. Une trajectoire prédéfinie est programmée en surface, et le drone exécute cette mission de manière autonome sous l'eau. Une fois la mission terminée, il remonte à la surface pour être récupéré. Les communications avec l'AUV pendant la mission sont très limitées en raison des faibles débits des modems acoustiques. Par conséquent, les données collectées ne deviennent accessibles qu'après le retour du drone à la surface, soit par récupération physique, soit par transmission radio. La figure 7 présente deux exemples des AUV actuels.



(a) : HUGIN Endurance AUV [5]



(b) : Iver4 580 AUV [6]

Figure I.07 : Certains des AUV actuels

La figure 8 présente le modèle REMUS 620, initialement développé par la société Hydroid. Les principales caractéristiques de ce modèle incluent des modules de charge utile primaire personnalisables, disponibles en versions sèches ou humides, ainsi que des adaptateurs de cloison universels accessibles de l'extérieur pour des charges utiles secondaires. Des interfaces standards ouvertes facilitent l'intégration entre les modules, tandis qu'une navigation de haute précision assure un contrôle optimal. Par ailleurs, des modules de batterie remplaçables offrent endurance et flexibilité, et le système est entièrement prêt pour le cyberspace. [7]

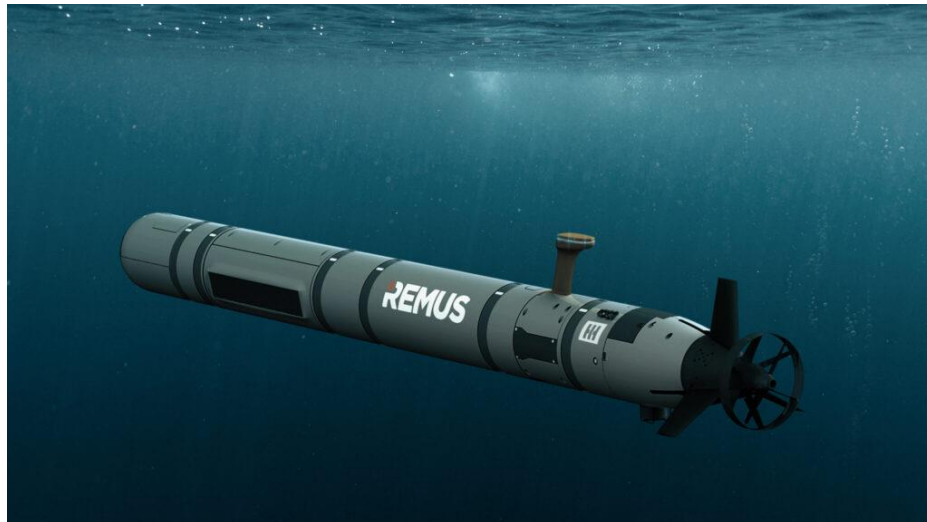


Figure I.08 : REMUS 620

Les véhicules sous-marins autonomes (AUV) présentent de nombreux avantages. Ils permettent d'explorer les fonds marins sans intervention humaine, réduisant ainsi les risques et les coûts des missions sous-marines. Grâce à leurs capteurs avancés et à leur navigation précise, ils offrent une collecte de données détaillée, tout en accédant à des zones profondes inatteignables par d'autres moyens. Leur autonomie et leur modularité les rendent adaptés à diverses applications, allant de la recherche scientifique jusqu'à l'inspection industrielle. Cependant, ils présentent aussi des inconvénients, notamment un coût élevé de développement et de maintenance, ainsi que des limitations en matière de durée de mission en raison de leur autonomie énergétique. De plus, leur fonctionnement peut être affecté par les conditions environnementales sous-marines, comme les courants forts ou la faible visibilité, ce qui peut limiter leur efficacité dans certaines situations.

2.1.3. Hybride ROV-AUV

Un hybride ROV-AUV est la combinaison des fonctionnalités et caractéristiques entre les ROVs et les AUVs. Il peut fonctionner de manière autonome comme un AUV en suivant une mission préprogrammée sans être relié à un opérateur, mais peut aussi être contrôlé à distance comme un ROV lorsqu'une intervention humaine est nécessaire, ils représentent une avancée technologique majeure dans le domaine de la robotique sous-marine, en offrant une solution polyvalente pour des missions complexes nécessitant à la fois autonomie et contrôle humain. Donc on peut dire que l'avantage de cette machine est la possibilité d'opérer en mode autonome (AUV) ou téléopéré (ROV) selon les besoins de la mission.



Figure I.09 : Hybridation des Véhicules Sous-Marins

Pour mieux comprendre le fonctionnement des véhicules hybrides ROV-AUV, nous allons présenter quelques exemples.

La figure 10 représente le modèle HROV Ariane, c'est une véhicule sous-marin hybride développé par l'Ifremer. Ce système innovant peut fonctionner à la fois en mode autonome et en mode téléopéré, lui permettant d'intervenir jusqu'à des profondeurs de 2 500 mètres. Piloté depuis la surface à l'aide d'un joystick, de manettes et de six écrans de contrôle, Ariane est reliée au navire par une simple fibre optique. Autonome en énergie, il est capable de parcourir et de cartographier les fonds marins, ou de se poser pour effectuer des prélèvements à l'aide de ses bras articulés. [8]

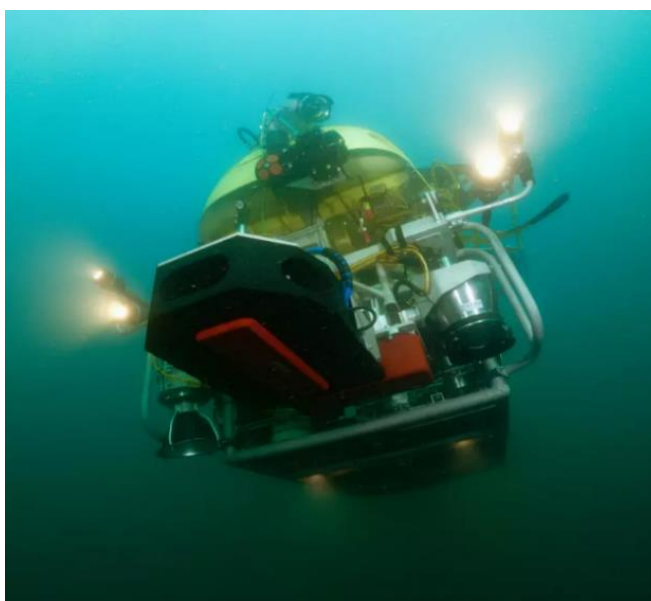


Figure I.10 : HROV Ariane [8]

Une autre véhicule hybride sous-marin, Double Eagle SAROV (la figure 11), développé par Saab.

Le SAROV apporte une capacité autonome à la famille Double Eagle, permettant d'être utilisé à la fois comme un véhicule sous-marin autonome (AUV) pour la détection, la classification et l'identification, et comme un ROV pour la neutralisation des mines. Grâce à sa conception robuste et sa modularité, il offre des performances exceptionnelles et une autonomie prolongée, le rendant adapté à diverses missions, telles que les opérations de recherche, les relevés sous-marins et l'évaluation rapide de l'environnement. En mode ROV, il fonctionne via deux types de câbles : un câble en fibre optique mince pour des missions longue portée (>3 km) avec alimentation par batterie interne, ou un câble combiné (alimentation et communication) de 1 000 m pour les missions nécessitant une endurance accrue. Il peut également opérer sans câble, augmentant ainsi sa portée et confirmant sa véritable capacité hybride. [9]



Figure I.11 : Double Eagle SAROV [9]

3. Domaines d'application

Nous avons précédemment exploré la définition des drones sous-marin et examiné certaines de leurs principales caractéristiques. Afin de mieux comprendre leur utilité et leur impact, il est désormais essentiel d'approfondir l'étude de leurs domaines d'application. Cette analyse nous permettra de mettre en lumière les divers secteurs où ces technologies jouent un rôle clé, en illustrant leurs usages spécifiques et les bénéfices qu'elles apportent dans différents contextes.

De nos jours les drones sous-marins sont utilisés dans divers domaines, et les plus deux importants sont :

3.1. Le domaine civil

On peut distinguer quatre applications principales pour les robots sous-marins nous les citons comme suit :

3.1.1. Exploration océanographique

Les drones sous-marins jouent un rôle essentiel dans la recherche océanographique, permettant aux scientifiques d'explorer les profondeurs marines, de collecter des échantillons et d'observer la faune marine dans son environnement naturel. Par exemple, des drones comme le Deep Discoverer de la NOAA ont contribué à la découverte de nouvelles espèces et à la cartographie de zones auparavant inaccessibles. [10]

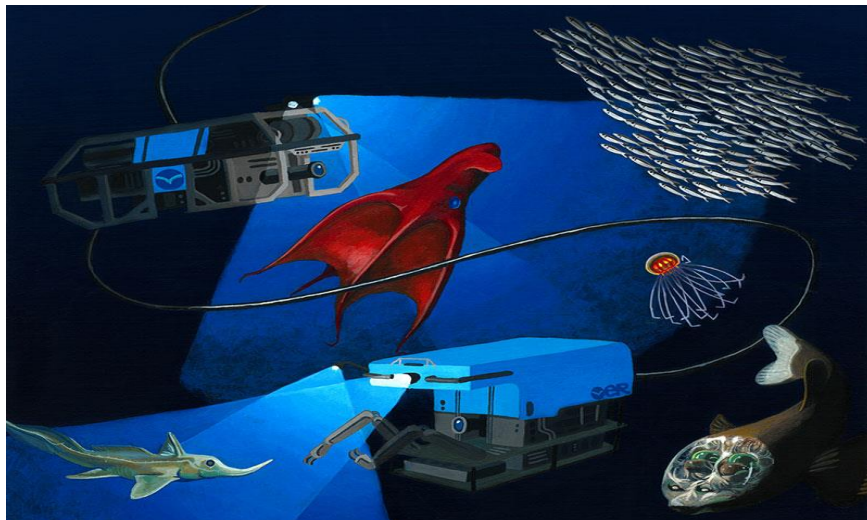


Figure I.12 : Robots sous-marins de l'exploration océanographique

Ces engins sont également utilisés pour étudier les comportements des espèces marines, suivre leurs migrations, surveiller les habitats fragiles et prélever des échantillons d'eau pour des analyses chimiques. Les données recueillies sont d'une grande valeur pour les chercheurs et les défenseurs de l'environnement œuvrant à la préservation des écosystèmes océaniques. [11]

3.1.2. Industrie pétrolière et gazière

Dans l'industrie pétrolière, les drones sous-marins sont largement utilisés pour l'inspection et la maintenance des pipelines et des plateformes sous-marines. Leur capacité

à fonctionner dans des environnements hostiles et difficiles d'accès en fait des outils indispensables pour garantir la sécurité et l'efficacité des opérations offshore. [10]



Figure I.13 : L'inspection des pipelines

3.1.3. Loisirs et exploration personnelle

Les drones sous-marins ne sont plus réservés aux seuls professionnels. Aujourd'hui, de plus en plus de modèles sont accessibles aux amateurs de plongée et aux explorateurs débutants. Par exemple, des drones comme le PowerRay permettent aux utilisateurs de capturer des images impressionnantes des fonds marins et d'explorer des zones habituellement difficiles d'accès, le tout depuis le confort d'un bateau ou du rivage. [10]



Figure I.14 : Robots sous-marins de l'exploration personnelle

3.2. Le domaine militaire

Les drones sous-marins jouent un rôle de plus en plus important dans la surveillance et la protection des plans d'eau. Ils répondent aux besoins croissants dans les domaines du renseignement. Ces engins contribuent également à des missions spécifiques comme la guerre des mines et la lutte anti-sous-marine. Les forces militaires exploitent des drones sous-marins pour des missions stratégiques telles que la surveillance, la détection de mines et d'autres opérations critiques. Ces drones peuvent être équipés de capteurs sophistiqués pour repérer les sous-marins ennemis ou surveiller les frontières maritimes. [10]



Figure I.15 : Drone sous-marin militaire

Du 4 au 7 novembre 2024, le salon Euronaval à Paris mettra en avant des innovations militaires, notamment le drone Marvel de Seaber, spécialisé dans la détection sous-marine. Conçu par Seaber, le Marvel est capable de détecter les mines sous-marines, contribuant ainsi à la protection des navires et des sous-marins dans les zones sensibles. [12]

4. Classification des drones sous-marin

Les drones sous-marins, se classent selon plusieurs critères en fonction de leur mode de fonctionnement, de leur profondeur d'opération et de leur utilisation. À travers cette section, nous examinerons les principales classifications de ces machines.

4.1. Classification selon le Mode de Contrôle

La classification de ces véhicules est liée au degré d'automatisation et d'autonomie de fonctionnement. Selon la littérature, le submersible peut fonctionner selon quatre modes différents :

- **ROV** (Remote Operated Vehicles) : lorsque le submersible est relié au navire de soutien, à la plateforme ou à une autre station fixe ou mobile par un câble ombilical, à travers

lequel les données et l'énergie sont transmises.

- **TETHER** : lorsque seul le transfert de données s'effectue via le câble ombilical.
- **UUV** (Unmanned Untethered Vehicle) : lorsque le câble ombilical est absent, mais qu'il y a une transmission de données par ondes.
- **AUV** (Autonomous Underwater Vehicle) : lorsque aucune transmission de données n'a lieu entre le véhicule et le navire. [13]

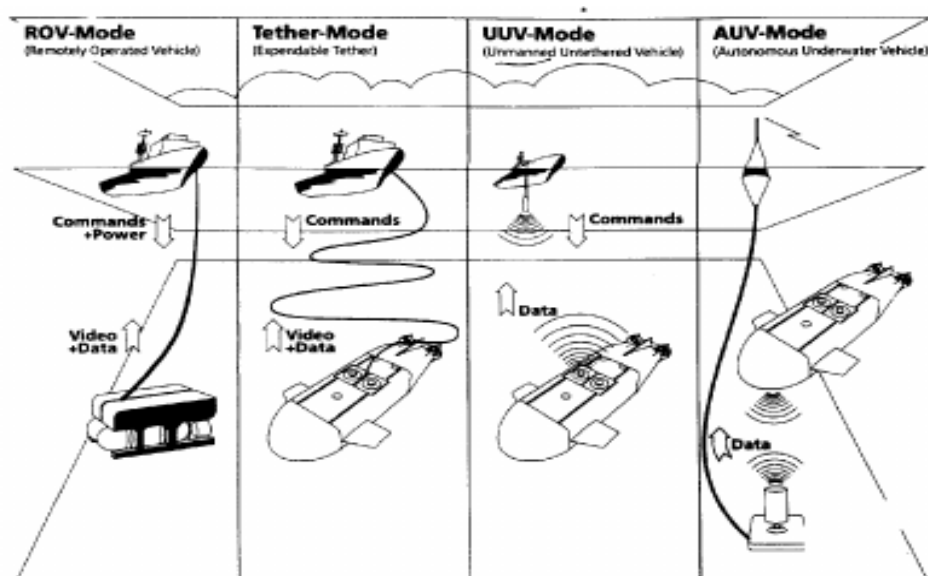


Figure I.16 : Modes de contrôle des Véhicules Sous-Marins

4.2. Classification selon la Profondeur d'Opération

Le Tableau 1 met en évidence la classification des drones sous-marins en fonction de leur capacité à opérer à différentes profondeurs :

Tableau I.1 : Classification des drones sous-marin selon la Profondeur d'Opération

La catégorie De drone sous-marin	Profondeur d'opérations	Description	Exemples
Drones de Faible Profondeur	De 0 jusqu'à 200 m	Utilisés pour l'inspection des ports, des récifs et des infrastructures côtières.	BlueROV2
Drones de Moyenne Profondeur	De 200 jusqu'à 1000 m	Conçus pour l'exploration sous-marine, la surveillance et la cartographie des fonds marins.	REMUS 600, Iver3 AUV
Drones de Grande Profondeur	Plus de 1000 m	Utilisés pour l'exploration scientifique, les missions militaires et la recherche en eaux profondes.	Nereus (10 000 m), ABYSS AUV

4.3. Classification selon la taille et la capacité

Ces drones sont répartis en trois grandes catégories : les mini-drones sous-marins, adaptés aux inspections en eaux peu profondes, les drones de taille moyenne, utilisés pour la recherche océanographique et la surveillance maritime, et les grands drones sous-marins, capables d'explorer les abysses et de mener des missions complexes à des profondeurs extrêmes. Cette classification est essentielle pour choisir le drone le plus adapté à chaque mission, en tenant compte des défis environnementaux et des exigences opérationnelles.

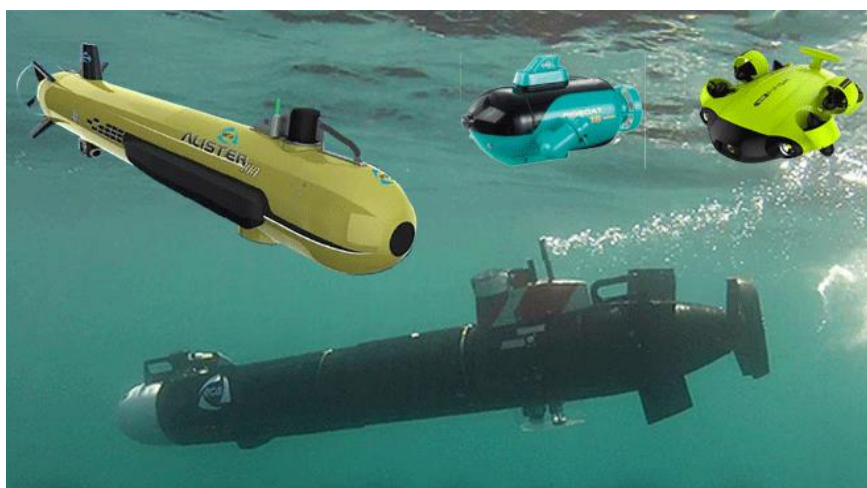


Figure I.17 : Les différentes tailles des Véhicules Sous-Marins

4.3.1. Les mini drones sous-marins

Ce sont des drones de petite taille généralement inférieurs à 2 mètres de long et pesant moins de 100kg. Ils sont conçus pour des missions d'exploration, d'inspection et de surveillance en eaux peu profondes ou difficiles d'accès. La figure ci-dessous montre un mini drone sous-marin



Figure I.18 : Un mini drone sous-marin

4.3.2. Les drones de taille moyenne

Mesurant entre 2 et 5 mètres de long et pesant entre 100 kg et 1 tonne. Ils sont conçus pour des missions plus complexes et en profondeur, avec une autonomie et des capacités accrues par rapport aux petits drones.



Figure I.19 : Drone sous-marin de taille moyenne

4.3.3. Les grands drones sous-marins

Mesurant plus de 5 mètres de long et pesant plus d'une tonne. Conçus pour des missions stratégiques et de longue durée, ils sont capables d'opérer en grande profondeur et sur de vastes distances.



Figure I.20 : Drone sous-marin de grande taille

5. Les semi autonomes véhicules - SAV

5.1. Introduction

Nous avons précédemment mentionné les drones sous-marins puis nous avons découvert certains de leurs types notamment les drones sous-marins autonomes et les drones télécommandés. Chaque type présente des avantages et des inconvénients. Maintenant, nous allons voir un autre type de drone sous-marin, qui ne diffère pas beaucoup des précédents et considéré comme une solution hybride, à savoir les drones sous-marin semi autonomes (SAV). Dans les prochaines parties, nous vous montrerons quelques détails sur cette technologie.

5.2. Définition

Les véhicules sous-marins semi-autonomes (SAV) sont des engins robotisés capables d'exécuter des missions sous-marines tout en intégrant une part d'autonomie et une possibilité d'intervention humaine. Ils constituent une avancée importante pour divers secteurs comme la recherche océanographique, l'industrie offshore et la défense maritime. Ils combinent en quelque sorte les caractéristiques de deux types de véhicules existants : les véhicules télécommandés sous-marins (ROV) et les véhicules autonomes sous-marins (AUV) pour fournir une combinaison de qualité dans un large éventail d'environnements marins. En résumé, les SAV représentent une classe intermédiaire de véhicules sous-marins, offrant une balance entre autonomie et contrôle humain, adaptée à des missions nécessitant à la fois une capacité décisionnelle embarquée et la possibilité d'une intervention directe.

5.3. Historique et Développement

Un projet de future né en 1997 à l'Université d'Hawaï à Manoa. C'est le projet SAUVIM, en 2001

Le modèle a ensuite été restructuré pour augmenter le transfert des technologies et la coopération entre les secteurs. La responsabilité de son développement a été divisée entre trois entités : le Laboratoire des Systèmes Autonomes de l'université, chargé de tout ce qui concerne l'académique et la recherche fondamentale .Marine Autonomous System Engineering, une entreprise locale produisant et opérant des systèmes autonomes sous-marins .Et le Naval Undersea Warfare Center, à Newport, qui a déterminé comment les employeurs ont pu se retirer. [14]

5.4. Le modèle SAUVIM

Les interventions sous-marines se font principalement via des submersibles habités ou des ROV contrôlés à distance. Les AUV, quant à eux, sont surtout utilisés pour la cartographie et l'exploration. Cependant, les limitations des communications acoustiques sous-marines, notamment la faible bande passante et le délai de transmission, compliquent le contrôle à distance des systèmes de manipulation. Cela empêche une réaction rapide des opérateurs en cas de problème, expliquant pourquoi peu d'AUV sont équipés de manipulateurs pour les interventions sous-marines. Le SAUVIM, Semi-Autonomous Underwater Vehicle for Intervention Mission (figure 21), a été développé pour répondre à ce défi technologique. Aujourd'hui, il est l'un des premiers véhicules sous-marins (voire le seul) capable de manipulation autonome. Sans lien physique ni opérateurs humains à bord, SAUVIM permet des interventions dans des zones dangereuses, comme les grands fonds océaniques, les missions de récupération d'objets dangereux, ou les zones classifiées. [14]



Figure I.21 : Le modèle SAUVIM [14]

L'élément clé de l'intervention sous-marine réalisée avec SAUVIM est la manipulation autonome, une avancée technologique majeure. Cela fait référence à la capacité d'un système robotique à effectuer des tâches nécessitant des contacts physiques avec des environnements non structurés, sans supervision humaine continue. [14]

5.5. Caractéristiques Principales des SAV

Les sous-marins semi-autonomes disposent d'une autonomie partielle, leur permettant de réaliser des missions sous-marines sans intervention humaine continue, tout en restant contrôlables à distance si nécessaire. Ils sont dotés de systèmes de navigation avancés, combinant des systèmes de navigation inertielle, des capteurs acoustiques, des sonars multifaisceaux et des caméras haute résolution pour un positionnement précis et une détection efficace des objets sous-marins. La communication et la transmission de données s'effectuent via des modems acoustiques sous-marins, avec la possibilité d'utiliser des liaisons radio ou satellite près de la surface. Ces véhicules intègrent également des capteurs environnementaux (température, salinité, courants...etc.) pour les missions scientifiques, ainsi que des bras robotiques ou des systèmes de manipulation pour des interventions spécifiques, comme l'inspection ou la récupération d'objets. Leur propulsion intelligente, assurée par des propulseurs électriques ou à hydrogène, garantit des mouvements précis et silencieux, soutenus par des algorithmes d'intelligence artificielle pour l'évitement automatique d'obstacles. Enfin, leur conception modulaire permet d'adapter les équipements embarqués en fonction des missions, incluant des capteurs spécialisés, des outils de manipulation et des caméras haute performance.

5.6. Comparaison des Véhicules Sous-Marins

Voici le tableau 2 qui résume quelques différences entre les ROVs, AUVs, ROVs-AUVs hybrides et les SAVs en fonction de plusieurs critères essentiels :

Tableau I.2 : Comparaison des Véhicules Sous-Marins

Critères	ROV (Remotely Operated Vehicle)	AUV (Autonomous Underwater Vehicle)	Hybride ROV-AUV	SAV (Semi- Autonomous Vehicle)
Mode de fonctionnement	Téléopéré en temps réel par un opérateur	100% autonome, exécute une mission préprogrammée	Peut fonctionner en mode ROV ou AUV	Fonctionne de manière autonome avec possibilité d'intervention humaine
Connexion	Relié par un câble ombilical	Pas de connexion physique, navigation indépendante	Mode mixte : avec ou sans câble	Communication sans fil avec possibilité de supervision humaine
Source d'énergie	Alimentation via le câble	Batteries embarquée	Mode hybride	Batteries avec recharge possible
Navigation et positionnement	Guidé manuellement par un opérateur	Utilise GPS (en surface) et INS (sous l'eau)	Peut alterner entre navigation contrôlée et autonome	Navigation autonome avec ajustements manuels possibles
Applications principales	Inspection et maintenance offshore, réparation sous-marine, récupération d'objets	Exploration océanographique, surveillance maritime, cartographie des fonds marins	Missions nécessitant flexibilité entre téléopération et autonomie	Missions nécessitant un équilibre entre autonomie et intervention humaine

6. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons abordé des généralités sur les drones sous-marins. Tout d'abord, nous avons présenté une définition générale afin de donner un aperçu compréhensif sur quelque type avec ces caractéristiques. Ensuite nous avons exploré leurs domaines d'application et leur classification selon plusieurs critères. Enfin, nous avons entamé les systèmes SAV en définissant leur concept, leurs spécificités et leur importance dans le domaine des technologies sous-marines. Nous avons conclu ce chapitre par un aperçu des perspectives et évolutions futures de cette technologie. Dans le chapitre suivant nous allons attribuer la technologie des drones sous-marins.

Chapitre II

La technologie des drones sous-marins

1. Introduction

Les technologies utilisées dans les drones sous-marins ont connu un développement important ces dernières années. A travers ce chapitre, nous allons explorer la technologie des drones sous-marins en abordant leurs principaux aspects techniques. On commence par la présentation de conception globale avec les principaux composants de ces véhicules, ensuite nous analyserons la structure de ces drones en mettant en avant les matériaux utilisés et leur résistance aux conditions sous-marines. On explique le fonctionnement des systèmes de propulsion employés ainsi que la partie commande qui permet de contrôler leurs déplacements et leurs actions. Enfin nous allons voir les mécanismes de protection des éléments électriques et électroniques afin d'assurer leur bon fonctionnement en milieu aquatique.

2. La conception et les principaux composants

Les drones sous-marins sont des robots télécommandés équipées de diverses technologies avancées pour les missions de recherche et de secours et aussi pour l'analyse environnementale et l'échantillonnage. La conception globale de ces appareils repose sur plusieurs éléments qui assurent un équilibre entre la robustesse structurelle, l'efficacité de la propulsion et la capacité de contrôle et de communication dans des environnements aquatiques extrêmes. Cela garantit son fonctionnement avec une efficacité élevée dans des environnements difficiles.

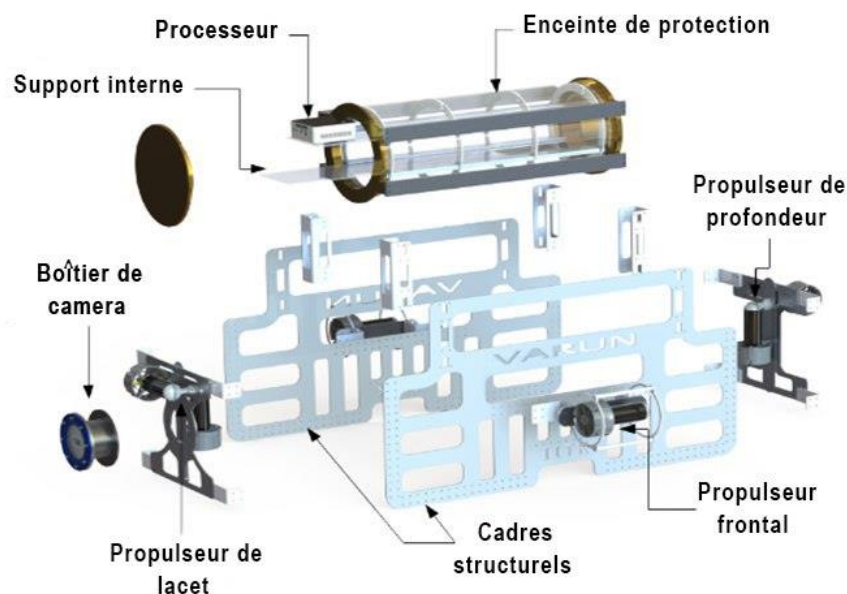


Figure II.01 : Les différents composants d'un drone sous-marin [15]

Les drones sous-marins sont des systèmes complexes dont la conception repose sur plusieurs éléments clés : une structure robuste, un système de propulsion efficace, un système de commande performant et une protection efficace des composants électroniques. Leur développement continu permet d'améliorer leur autonomie, leur précision et leur adaptabilité aux environnements extrêmes. Dans la section suivante, nous présenterons les détails de chaque partie.

3. La structure

La structure des drones sous-marins est le cadre interne et externe (figure 2) qui assure le support mécanique et la protection des composants électrique, électronique et mécanique tels que le système de navigation, de propulsion et de communication.



Figure II.02 : Cadre d'un drone sous-marin [16]

La conception de la structure repose sur plusieurs facteurs importants incluent les pressions hydrostatiques des environnements sous-marins où ils peuvent dépasser 100 Mpa, De plus, le facteur de température doit être pris en compte car il peut atteindre des profondeurs où les températures sont extrêmement basses. Aussi la résistance à la corrosion, et le volume des éléments qu'elle contiendra. Un autre élément essentiel à considérer est la résistance hydrodynamique induite par le déplacement du drone.

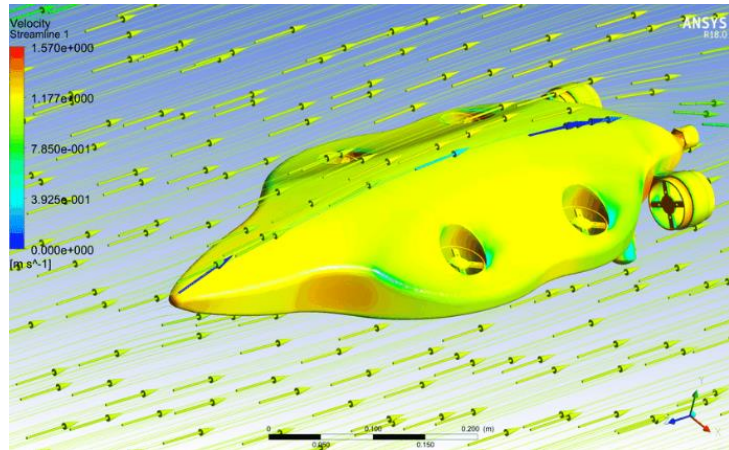


Figure II.03 : Analyse de la Résistance Hydrodynamique à l'aide de la Simulation CFD
[17]

Cette résistance est proportionnelle au carré de sa vitesse. Lorsque le drone sous-marin évolue à une vitesse constante, la poussée générée par le propulseur compense exactement cette résistance. Ainsi, une réduction de la traînée entraîne une diminution de la consommation énergétique durant la navigation. La force de traînée dépend largement de la géométrie de la corp. [18]

3.1. Les matériaux utilisés

Un élément essentiel dans la conception des coques de drones sous-marins est le choix des matériaux. Plusieurs types de matériaux sont couramment utilisés, comme les métaux, les composites et les plastiques. Le tableau II.01 présente les propriétés de certains de ces matériaux employés pour fabriquer les coques. Les matériaux choisis doivent combiner une résistance élevée et une légèreté optimale. D'après le tableau II.01, les matériaux composites se démarquent par leurs performances supérieures comparées à celles des métaux et des plastiques. [18]

Tableau II.01 : Propriétés des matériaux des cabines de drones sous-marins. [18]

Matériau	Densité (kg/dm ³)	Limite d'élasticité (MPa)	Module de traction (GPa)	Résistance spécifique (kNm/kg)
Acier à haute résistance (HY 80)	7.86	550	207	70
Alliage d'aluminium (7075-6)	1.73	503	70	173
Alliage de titane	1.84	830	120	184
GFRP (époxy/s-lass)	2.1	1200	65	571
MMC (6061 AL/Sic)	1.7	1200	210	706
Acrylique	1.2	103	3.1	86
PVC	1.4	48	35	34

3.2. Le type de structure

La coque d'un drone sous-marin joue un rôle essentiel en assurant la protection des composants internes, la résistance aux pressions sous-marines et l'optimisation de l'hydrodynamisme. Il existe deux principaux types de coques utilisées en fonction de l'application du drone et de l'environnement dans lequel il évolue.

3.2.1. La structure fermée

C'est une structure parfaitement étanche qui protège l'ensemble des composants internes du drone (électronique, batteries, capteurs, etc.). Ce type de coque est souvent privilégié pour les applications en eaux profondes, telles que l'exploration océanographique, l'inspection des infrastructures sous-marines et les opérations de sauvetage. Bien que leur

conception limite l'accès direct aux composants internes, elle offre une protection optimale et réduit les besoins en maintenance fréquente, rendant ces drones plus adaptés aux missions critiques et de longue durée. La figure 4 présente le modèle Fifish V6 expert c'est un exemple sur une drone sous-marin avec un structure fermée.



Figure II.04 : Robot sous-marin Fifish v6 expert

3.2.2. La structure ouverte

Les drones sous-marins à structure ouverte sont caractérisée par un cadre rigide qui expose plusieurs composants internes .Ce type de structure est souvent utilisé pour les opérations en faible profondeur, où la pression de l'eau reste modérée et ne nécessite pas une protection hermétique complète. Toutefois, la structure ouverte peut offrir une protection moindre contre les particules et courants marins, contrairement aux modèles à coque fermée qui assurent une meilleure isolation des composants internes. La figure 5 présente PIVOT ROV c'est un exemple sur une drone sous-marin avec un structure ouvert.



Figure II.05 : PIVOT ROV

3.3. La forme géométrique

Le choix de la bonne forme géométrique est crucial pour améliorer les performances des drones sous-marins. Cela permet de réduire la consommation d'énergie, d'augmenter leur robustesse et d'optimiser leur maniabilité, ce qui en fait un élément clé de leur conception.

3.3.1. La forme cylindrique

La forme cylindrique est très utilisée dans la conception des drones sous-marins, grâce à ses nombreux avantages en termes de performance et d'adaptation aux environnements sous-marins. La conception en forme de torpille permet à ces robots sous-marins d'atteindre une grande vitesse en ligne droite et de s'incliner pour descendre grâce à leurs ailettes.

Cette forme a été adoptée dès 1972 lors de la conception d'un ROV (véhicule sous-marin télécommandé), qui ressemblait à une torpille, comme le montre la figure II.06. [19]



Figure II.06 : Le robot télécommandé Snoopy [19]

L'inspiration pour ce type de conception vient directement des avancées technologiques militaires. Plus particulièrement, son modèle est issu des torpilles utilisées sur les navires de guerre, notamment le modèle MK-38. C'est dans le laboratoire de physique appliquée de l'université de Washington qu'une torpille a été modifiée, la figure 7 représente un robot REMUS qui est issu de modifications apportées à une torpille à l'Université de Washington en 1994. [19]

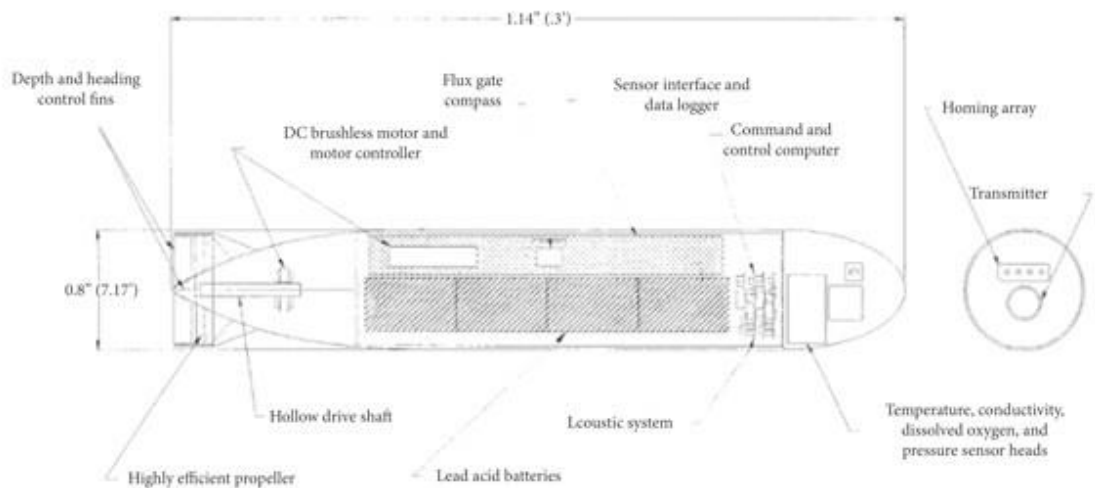


Figure II.07 : Le robot REMUS 1994 [19]

Le robot, conçu dans un format cylindrique pour maximiser son hydrodynamisme, affichait des dimensions de 114 cm de longueur pour 18 cm de diamètre et un poids de 40 kg. Il se déplaçait grâce à une seule hélice positionnée à l'arrière, assurant sa propulsion dans l'eau. [19]

La figure 8 montre le modèle Integra AUV/ROV Conçu pour des missions dans plusieurs secteurs, notamment, la recherche, l'évaluation environnementale et la défense. La structure de cette véhicule sous-marine adopte une forme cylindrique. [20]



Figure II.08 : Le modèle Integra AUV/ROV [20]

3.3.2. La forme cubique

Une nouvelle structure a été développée. Les drones sous-marins à structure cubique sont conçus pour offrir un accès facile à leurs composants internes et améliorer leur stabilité sous l'eau.

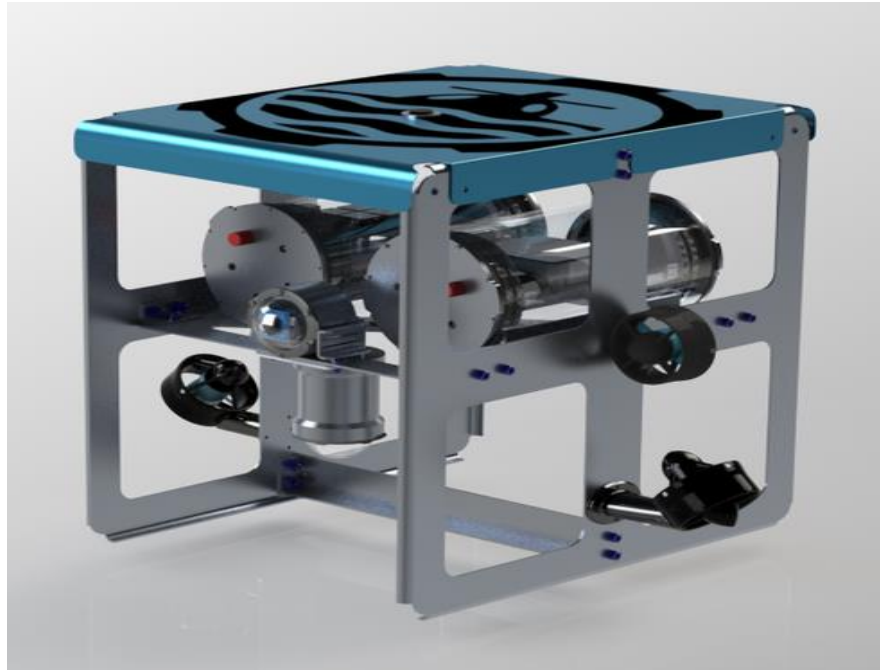


Figure II.09 : Drone Sous-Marin à Structure Cubique [20]

De plus, cette forme fournit un espace bien organisé pour intégrer divers équipements, comme des caméras, des capteurs et des boîtes étanches. Enfin, cette conception facilite le transport et le déploiement du drone, notamment grâce à des systèmes de fixation adaptés aux missions d'exploration, de récupération ou d'inspection sous-marine.

La figure 10 représente le modèle BlueROV2 destiné aux travaux sous-marins ou à la recherche, le BlueROV2 dispose d'un cadre ouvert qui supporte les boîtiers électroniques et de batterie, les propulseurs, la mousse de flottabilité et les poids de ballast. Son design simple, à la fois robuste et modulaire, permet d'ajouter facilement divers accessoires. [21]



Figure II.10 : Le modèle BlueROV2 [21]

Ce modèle a été largement adopté dans divers domaines, permettant l'intégration d'instruments scientifiques, d'accessoires de nettoyeurs haute pression et de batteries supplémentaires. Le BlueROV2 se distingue par sa conception entièrement personnalisable, offrant aux utilisateurs la possibilité d'apporter des modifications significatives selon leurs besoins spécifiques. Grâce à la possibilité de remplacer son cadre standard par une structure personnalisée, il est possible de concevoir un robot sous-marin adapté à différentes exigences et applications. [21]

3.3.3. Forme inspirée de la nature

En 2012, une étude portant sur plusieurs modèles de robots sous-marins bio-inspirés a identifié un défi majeur garantir un déplacement efficace dans un environnement réel. Cette recherche a conduit à une classification des robots en fonction de leur mode de nage, comme illustré dans la figure II.11 [19]

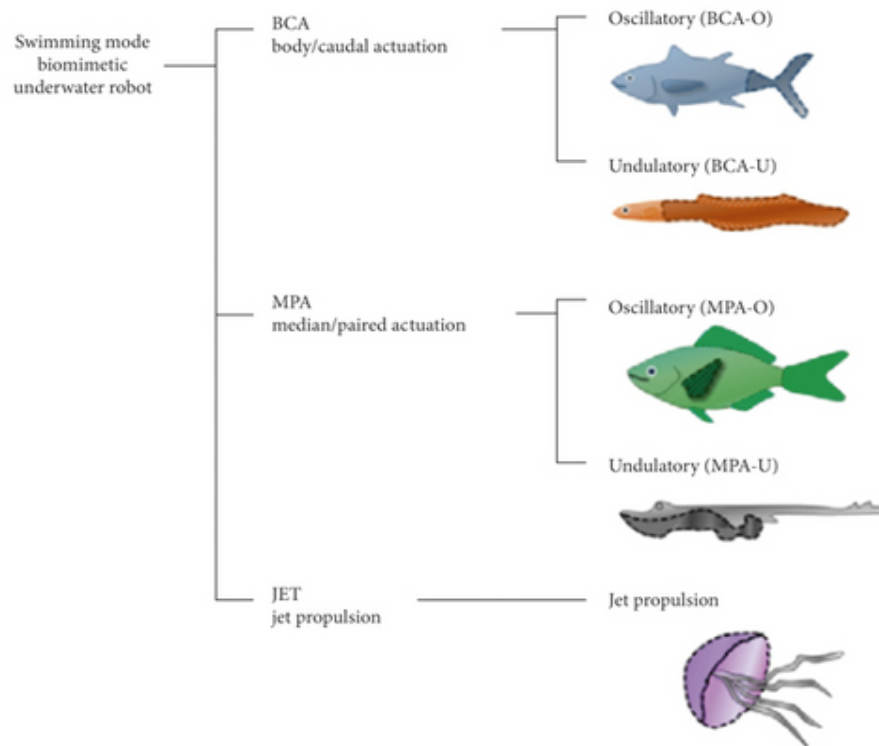


Figure II.11 : Classification des robots bio inspirés selon leur mode de nage

L'amélioration des performances des robots sous-marins a suscité un intérêt croissant ces dernières décennies. L'adoption d'une approche bio-inspirée a permis d'optimiser leur conception en s'appuyant sur les caractéristiques des créatures aquatiques. Ces dernières, après des millions d'années d'évolution et de sélection naturelle, ont développé une morphologie et des capacités physiques parfaitement adaptées à leur habitat, offrant ainsi une source d'inspiration précieuse pour la robotique sous-marine. [19]

Un robot inspiré de l'orque a été conçu pour reproduire ses hautes performances hydrodynamiques et sa grande stabilité. Ce projet visait à créer un véhicule sous-marin autonome (AUV) capable de mesurer la qualité de l'eau en utilisant un système biomimétique. Grâce à sa conception innovante, le robot dauphin pouvait se déplacer efficacement dans des environnements difficiles et les surveiller. Le prototype de ce robot est illustré dans la figure II.12, mettant en évidence certaines des caractéristiques essentielles de l'orque, ce qui en fait un outil performant pour l'exploration marine. [19]

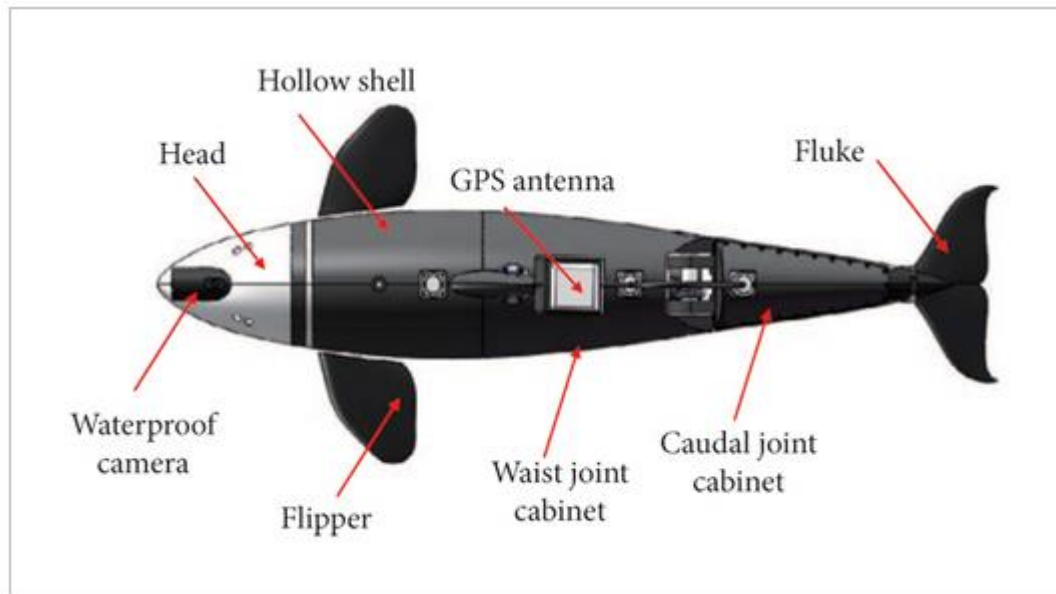


Figure II.12 : Le robot dauphin [19]

SoFi est un exemple parfait de drone sous-marin biomimétique (figure II.13), Il s'agit d'un robot bio-inspiré qui imite la nage des poissons, ce qui lui permet de se déplacer naturellement sans perturber la faune marine.

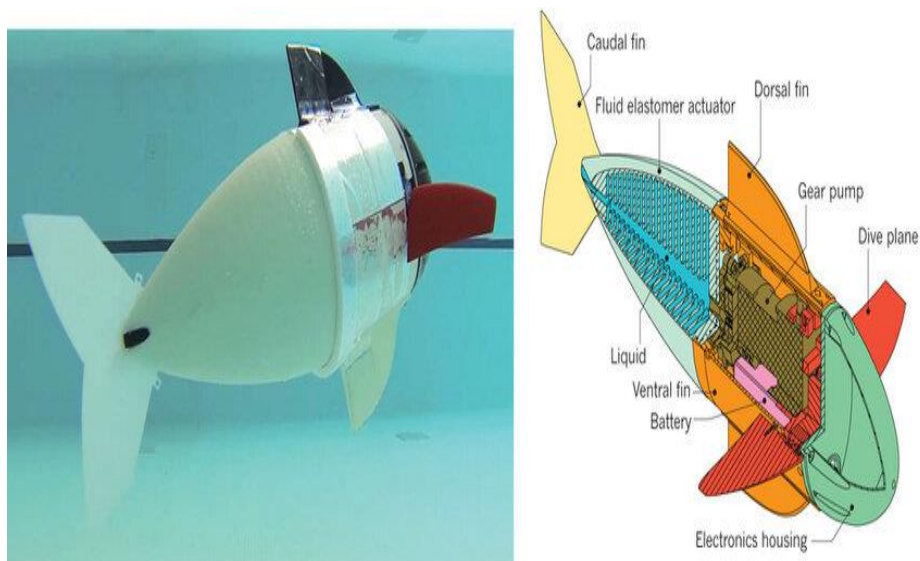


Figure II.13 : Robot sous-marin biomimétique

4. La propulsion

La propulsion est un élément essentiel utilisés sur les véhicules sous-marins télécommandés (ROV), les véhicules sous-marins autonomes (AUV) leur permettant de se déplacer efficacement dans l'environnement aquatique ce système comprend à la fois les éléments qui génèrent les forces et ceux qui contrôlent la direction de ces forces. Il existe trois principaux systèmes de propulsion des drones sous-marins notamment : Propulsion par hélices, propulsion injection d'eau, et propulsion biomimétique (Bio-inspirée).

4.1. Propulsion par hélices

C'est le système le plus courant, il repose sur un moteur électrique relié à une hélice (Figure II.14), utilisent ce système de propulsion pour générer une force de poussée en déplaçant l'eau. Lorsque l'hélice tourne, elle crée une différence de pression entre l'avant et l'arrière du robot, entraînant ainsi son déplacement.



Figure II.14 : Le système (moteur + hélice)

La vitesse et la direction du mouvement sont contrôlées en ajustant la puissance fournie au moteur, ce qui modifie la vitesse de rotation de l'hélice. Pour améliorer la maniabilité, certains robots sous-marins sont équipés de plusieurs hélices orientées

différemment, permettant des déplacements dans plusieurs directions (avant, arrière, haut, bas, rotation).

Pour illustrer les composants de la propulsion par hélice dans les robots sous-marins, prenons l'exemple du propulseur T200 de Blue Robotics (figure II.15). Ce modèle est le plus populaire au monde.

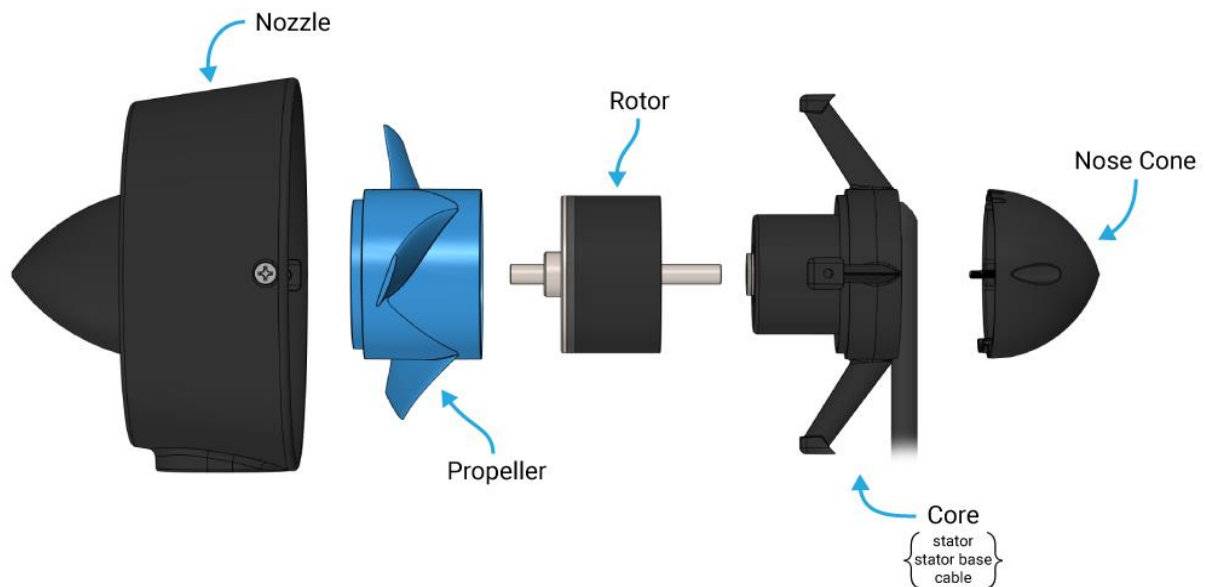


Figure II.15 : Le propulseur T200 [22]

4.1.1. Le moteur électrique

Les moteurs électriques existent sous différentes formes, tailles et technologies, chacun étant conçu pour des fonctions spécifiques.

- **Moteur DC :**

Les moteurs à courant continu (figure II.16), sont largement utilisés dans les systèmes de propulsion, ils convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à une rotation angulaire continue. Ils sont faciles à connecter et à utiliser, mais consomment un courant élevé, nécessitant ainsi un contrôle via la modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour garantir un fonctionnement plus précis et efficace. [23]

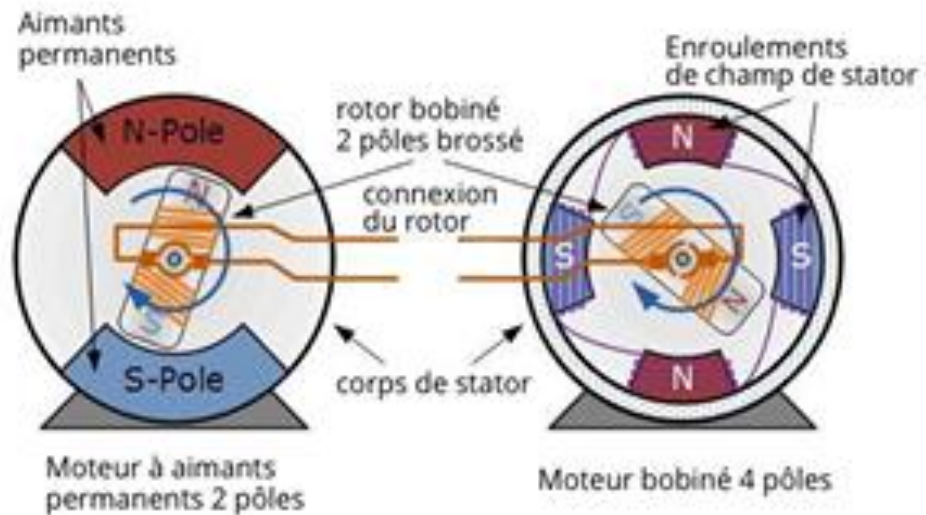


Figure II.16 : Moteur à courant continu [23]

- **Moteur sans balais (Brushless Motor) :**

Le moteur sans balais utilise des aimants permanents sur le rotor, tandis que la commutation est effectuée électroniquement via des capteurs à effet Hall dans le stator. Ce type de moteur se distingue par sa haute efficacité, un bon couple par rapport à la vitesse, ainsi qu'une durée de vie plus longue que les moteurs à balais, bien qu'il soit plus coûteux. [23]



Figure II.17 : Moteur sans balais

4.1.2. L'hélice

C'est un élément essentiel de propulsion, qui convertit l'énergie fournie par le moteur en poussée pour déplacer le drone dans l'eau. Elle crée une différence de pression entre l'avant et l'arrière des pales, générant ainsi une force qui propulse le drone.



Figure II.18 : L'hélice

4.1.3. L'alimentation électrique

L'alimentation électrique des drones sous-marins est un élément crucial qui influence leur autonomie, leur performance et leur champ d'application. Elle peut être assurée par un câble ombilical relié à une source en surface, garantissant une alimentation continue mais limitant la mobilité, ou par des batteries embarquées, offrant plus de liberté mais avec une autonomie restreinte. Certains modèles hybrides combinent ces deux approches pour optimiser leur efficacité.

Le choix de la source d'énergie dépend de la mission, de la profondeur et de l'autonomie requise pour chaque véhicule sous-marin.

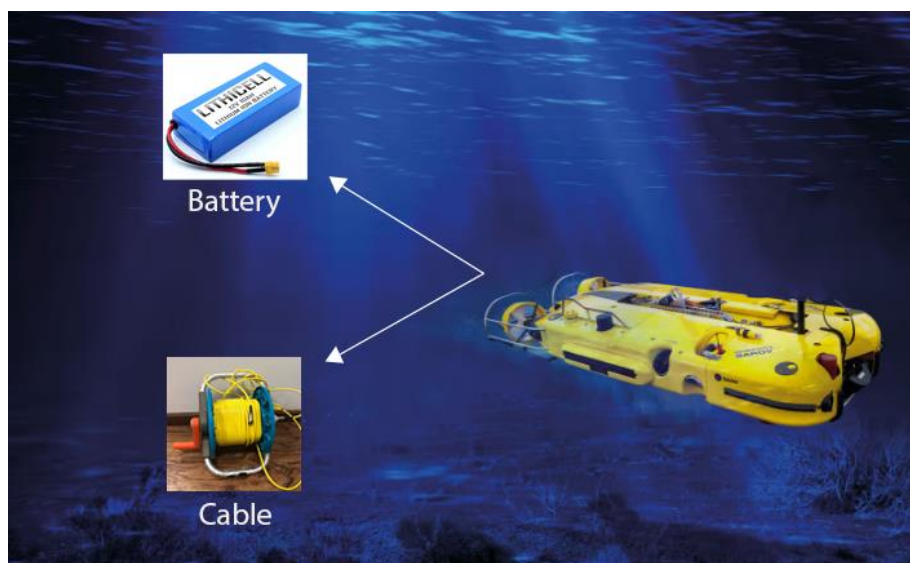


Figure II.19 : l'alimentation des drones sous-marins

4.2. Propulsion biomimétique (Bio-inspirée)

La propulsion biomimétique, repose sur l'imitation des mouvements naturels des animaux marins comme les anguilles, les raies, les méduses et les dauphins. Contrairement aux hélices traditionnelles, cette technologie utilise des membranes souples ou des segments articulés pour générer un mouvement ondulatoire. L'une des formes les plus simples de cette technologie utilise sur une seule nageoire, fixée soit horizontalement soit verticalement à l'arrière du véhicule. En oscillant de façon périodique et perpendiculaire à son plan, elle génère des ondes dans l'eau qui produisent une poussée propulsant le robot vers l'avant. [18]

La figure II.20 montre le modèle Fish Robot PF-550, c'est l'un des robots sous-marins avec un système de propulsion inspiré de la nature (les poissons). Il utilise un système de propulsion basé sur le mouvement oscillatoire de son corps et de son pédoncule caudal, imitant ainsi la nage des poissons réels. [24]

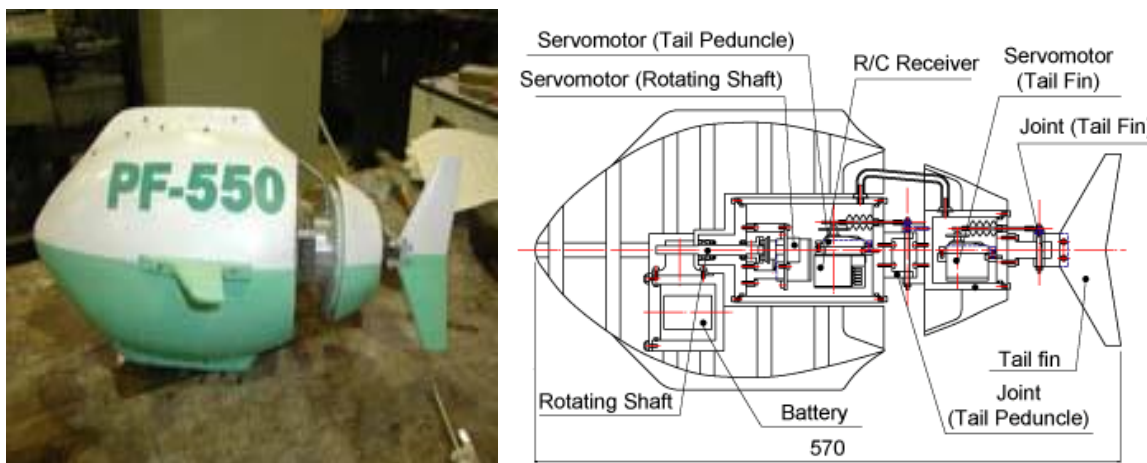


Figure II.20 : Fish Robot, PF-550 [24]

4.3. Propulsion par injection d'eau

La propulsion par injection se base sur l'aspiration et le stockage de l'eau, puis son expulsion sous pression à travers une buse à l'aide d'une pompe comme illustré dans la figure II.21, générant ainsi une force de poussée pour accélérer le véhicule. En contrôlant l'orientation de la buse, il est possible d'orienter la poussée et d'améliorer la maniabilité. Ce système est considéré comme une alternative non conventionnelle aux hélices, offrant des vitesses élevées tout en réduisant les risques de blessures pour les êtres aquatiques. [18]

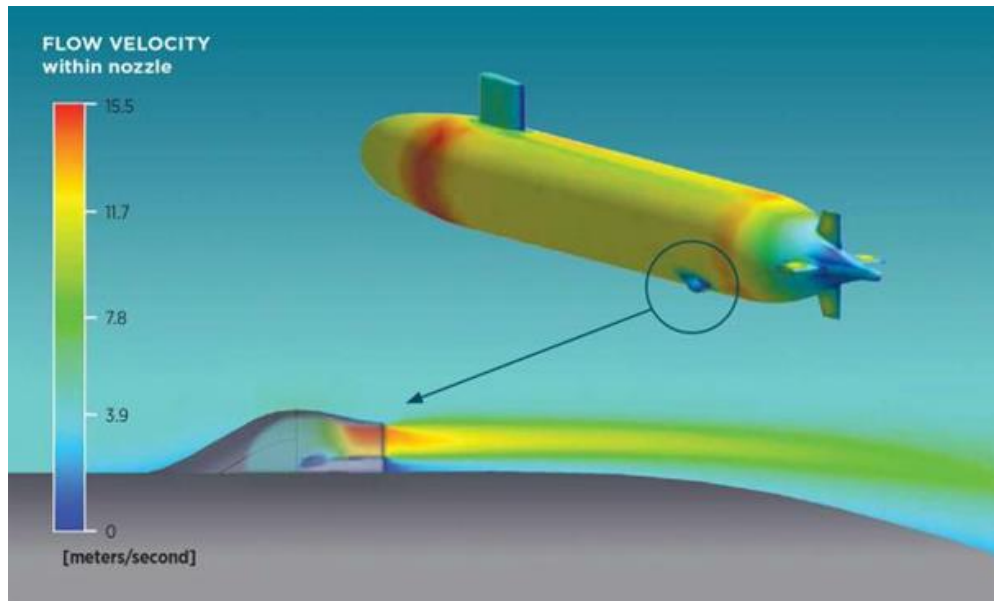


Figure II.21 : Expulsion de l'eau à travers une buse.

D'autre part, il y a un inventeur qui possède une chaîne sur la plateforme YouTube sous le nom de DIY Perks. Il présente un drone sous-marin autonome utilisant un système de propulsion par jet d'eau (figure II.22). Contrairement aux hélices classiques, ce système fonctionne en aspirant de l'eau puis en l'expulsant à haute pression à travers une buse, générant ainsi une poussée permettant au drone de se déplacer sous l'eau. [25]

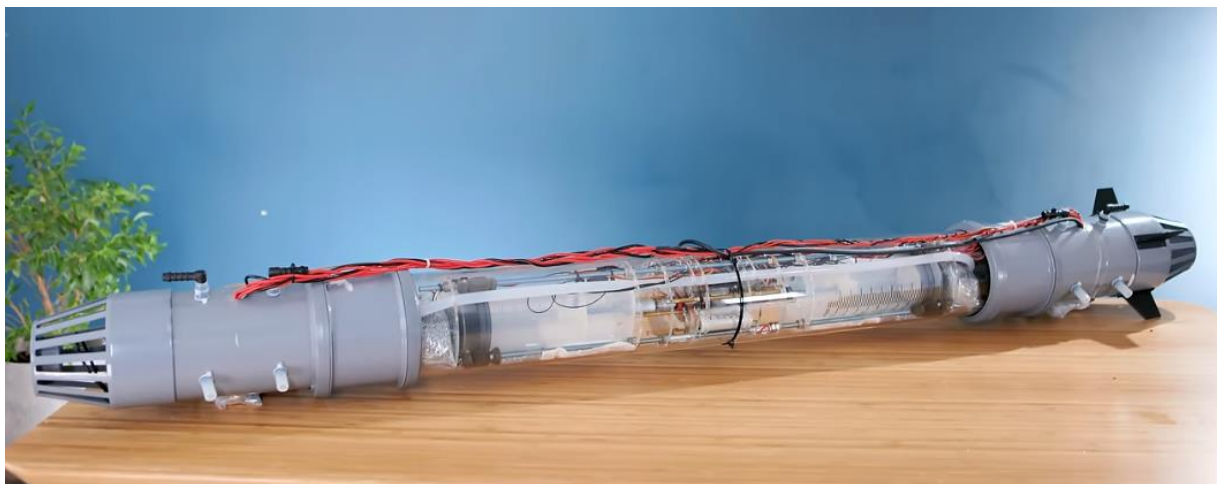


Figure II.22 : Drone sous-marin [25]

Une fois l'eau aspirée, elle est stockée temporairement dans une chambre interne, où elle est comprimée à l'aide d'une pompe puissante et la remontée du drone à la surface se fait en expulsant à nouveau l'eau à travers les mêmes pompes. Pour contrôler la direction du véhicule, plusieurs méthodes sont utilisées :

- Orienter les buses pour diriger la poussée dans différentes directions.
- Réguler le débit d'eau pour ajuster la vitesse du drone.
- Utiliser plusieurs buses réparties sur le corps du véhicule pour permettre une meilleure maniabilité et la possibilité de pivoter. [25]

5. La partie commande

5.1. Introduction

Les systèmes de commande sont très importants pour faire fonctionner les véhicules sous-marins en gérant diverses fonctions, allant du contrôle du système de propulsion à l'activation des caméras et des lumières. Ces systèmes ont beaucoup évolué, passant des relais électriques classiques à des technologies numériques avancées utilisant la fibre optique, ce qui a amélioré leur efficacité grâce à l'ajout d'ordinateurs et d'interfaces de contrôle. Le rôle principal de ce système est de transformer les commandes de l'opérateur en actions réalisables sous l'eau. [26]

On divise le système de commande en trois sections principales : le système de communication, le système de contrôle et le système de navigation.

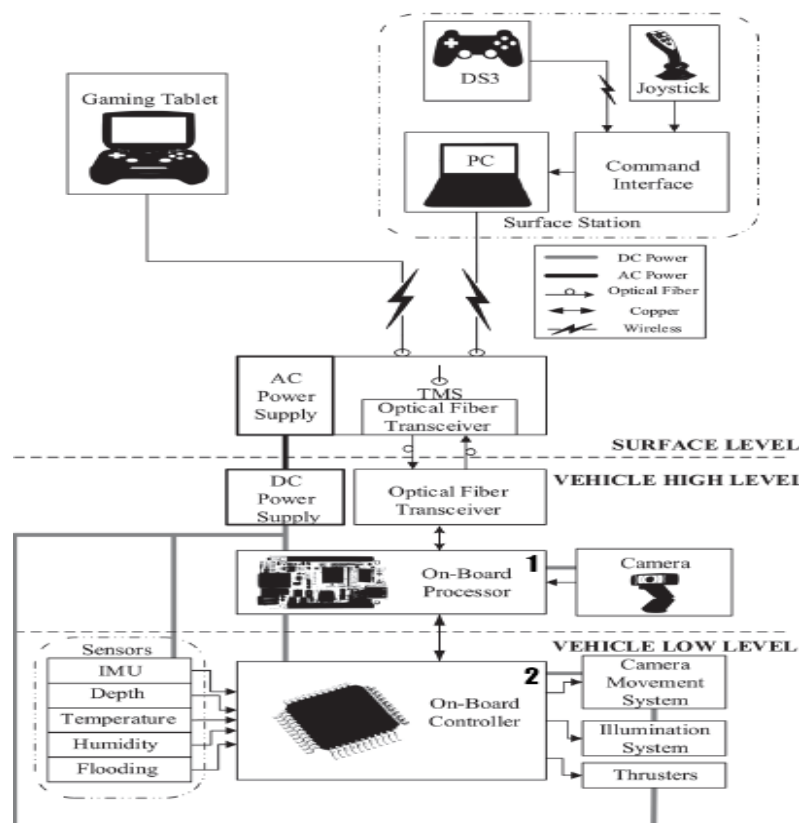


Figure II.23 : Système de commande d'un drone sous-marin

5.2. Système de communication

Le système de communication repose sur plusieurs composants essentiels garantissant le bon fonctionnement et l'efficacité des opérations sous-marines. Selon le type de drone, les moyens de communication varient (figure II.24). Pour les ROV, un câble ombilical est utilisé pour la transmission des données et l'alimentation électrique, souvent en fibre optique afin de garantir une latence minimale et un débit élevé. En revanche, les AUV, étant autonomes, utilisent des systèmes de communication sans fil basés sur des ondes acoustiques ou un système satellite lors des missions en surface.

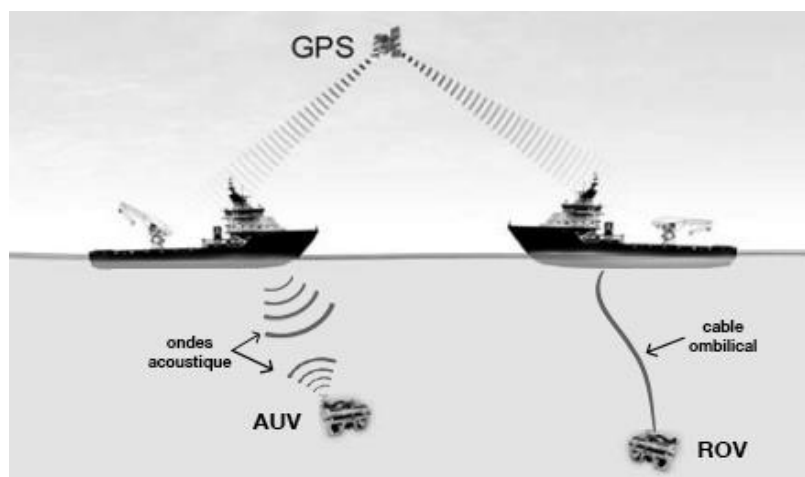


Figure II.24 : Moyen de communication (ROV et AUV)

5.3. Système de contrôle

Il comprend l'ordinateur de bord et les algorithmes qui gèrent la prise de décision, le traitement des données des capteurs et l'exécution des missions en mode télécommandé ou autonome, optimisant ainsi les performances du drone sous-marin.



Figure II.25 : Le système de contrôle

5.3.1. Ordinateur de bord

Ce système est repose surtout sur un processeur qui assure le traitement des données et l'exécution des commandes. Il reçoit et analyse en temps réel les informations des capteurs pour évaluer la position, l'orientation et l'environnement du drone.

Un exemple d'un Ordinateur de bord couramment utilisé dans les drones sous-marins est le NVIDIA Jetson Xavier NX (figure II.26). Ce processeur est particulièrement adapté aux applications d'intelligence artificielle, grâce à ses capacités de calcul avancées et son efficacité énergétique. [27]



Figure II.26 : NVIDIA Jetson Xavier NX. [27]

Un autre exemple très populaire est le Raspberry (indiqué par le chiffre 1 dans la figure II.23) il est utilisé dans des projets académiques ou semi professionnels.



Figure II.27 : Raspberry

5.3.2. Le contrôleur de vol

Le contrôleur est l'élément qui assure la coordination efficace des fonctions essentielles au bon fonctionnement du drone.

Le Pixhawk (indiqué par le chiffre 2 dans la figure II.23) est un contrôleur de vol open-source largement utilisé dans les systèmes embarqués de drones, y compris les drones sous-marins.

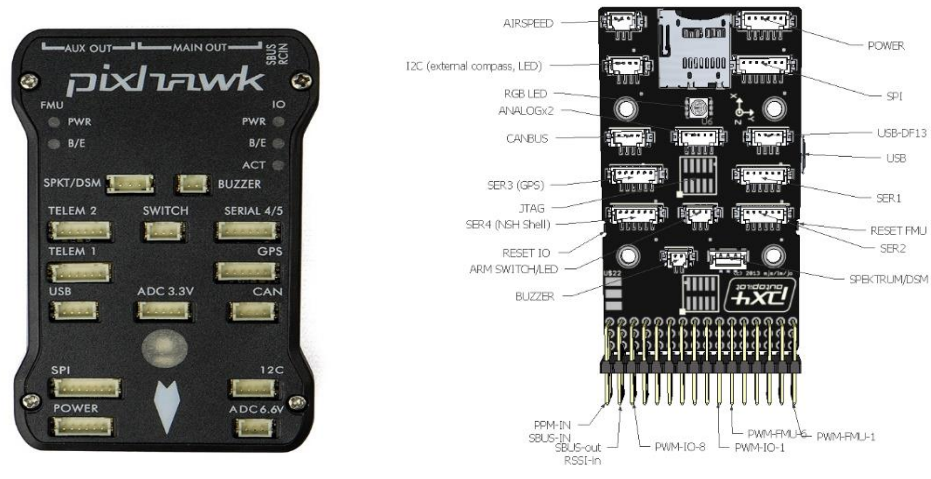


Figure II.28 : Pixhawk

5.4. Système de navigation

Un système de navigation pour drone sous-marin doit faire face à des défis spécifiques liés au milieu sous-marin, comme l'absence de signaux GPS et la forte atténuation des ondes électromagnétiques. Voici les principales technologies utilisées :

5.4.1. Camera et éclairage

Une caméra sous-marine est un appareil photo ou une caméra vidéo spécialement conçue pour résister les hautes pressions des environnements aquatiques et empêcher toute infiltration d'eau, garantissant ainsi une performance fiable et une longue durée de vie. Dotées d'objectifs avancés et de capteurs haute résolution, ces caméras permettent de capturer des images nettes et des vidéos de qualité exceptionnelle.



Figure II.29 : Caméra pour ROV / AUV / USV

En raison de la dispersion et de l'absorption rapide de la lumière naturelle sous l'eau, l'éclairage artificiel devient essentiel pour assurer une vision claire et une perception fidèle des couleurs des objets. Cet éclairage repose sur des lampes spéciales capables de convertir l'énergie électrique en lumière efficace sous l'eau. Cette technologie a connu un grand développement récemment.

Le figure II.29 présente un projecteur pour Chasing M2 ROV qui offre une lumière puissante et légère, idéale pour capturer des photos et des vidéos sous-marines de haute qualité. La LED blanc chaud rehausse l'apparence des objets en révélant leurs couleurs authentiques, tout en offrant une luminosité pouvant atteindre 12 000 lumens pour une visibilité optimale dans les environnements faiblement éclairés. Équipé de LED CREE, ce projecteur garantit une efficacité lumineuse élevée et une dissipation thermique optimale. [28]



Figure II.30 : Projecteur pour Chasing M2 ROV. [28]

5.4.2. Les capteurs

Le capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique en une grandeur exploitable, souvent de nature électrique. Le choix de l'énergie électrique vient du fait qu'un signal électrique se prête facilement à de nombreuses transformations difficiles à réaliser avec d'autres types de signaux.

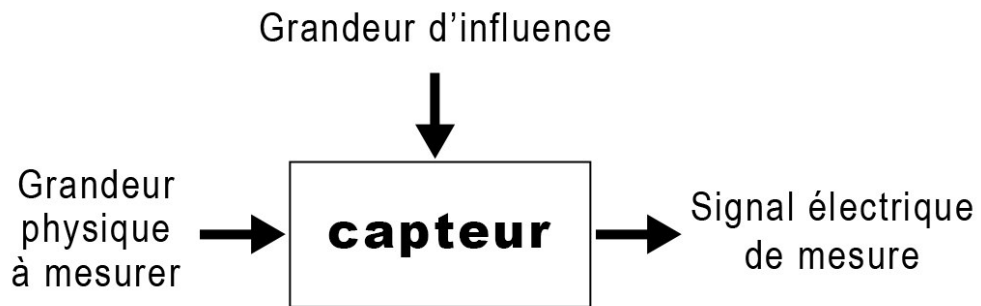


Figure II.31 : Le capteur

Les drones sous-marins (AUVs ou ROVs) sont équipés de plusieurs types de capteurs pour assurer la navigation.

- **DVL (Doppler Velocity Log)**

Est un capteur acoustique utilisé pour mesurer la vitesse et le déplacement d'un drone sous-marin par rapport au fond marin ou à la colonne d'eau. Le DVL A125 (figure II.32), fournit des données de vitesse de haute précision par rapport au fond marin, ce qui aide les véhicules sous-marins et les plongeurs à naviguer avec une stabilité et une précision accrue, même dans des environnements difficiles tels que les courants forts ou des terrains complexes. [29]



- **Sonar**

Le sonar est une technologie acoustique utilisée pour la navigation, la détection d'objets et la cartographie sous-marine. Il fonctionne en émettant des ondes sonores qui se propagent dans l'eau et rebondissent sur les objets avant d'être captées par un récepteur. Cette technologie a connu un développement récent, et l'exemple le plus marquant est le Sonar 3D (figure II.35).

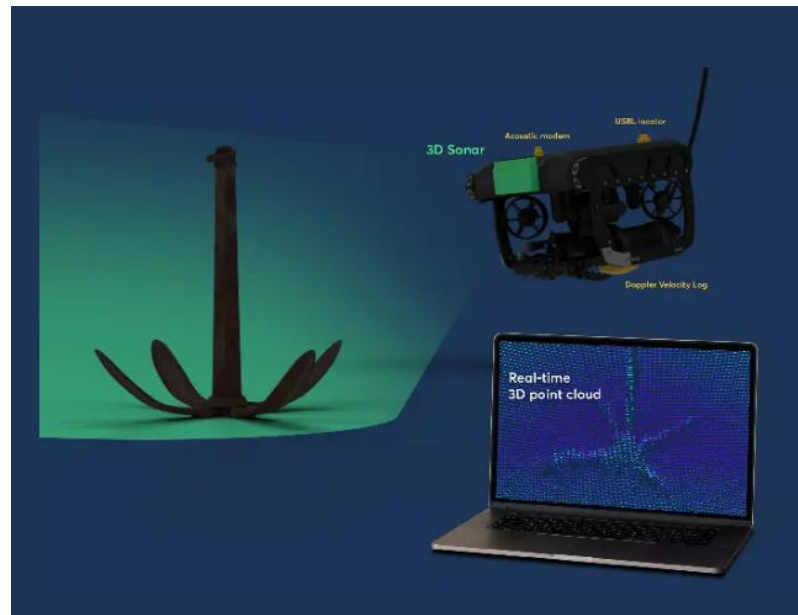


Figure II.33 : 3D Sonar. [30]

Le sonar 3D est une technologie avancée qui utilise des ondes sonores pour créer des images tridimensionnelles précises des objets et des environnements sous-marins. Contrairement au sonar traditionnel qui génère des images 2D à partir d'une seule rangée de faisceaux acoustiques, le sonar 3D forme simultanément plusieurs rangées de faisceaux, permettant ainsi une représentation plus claire et réaliste du monde sous-marin. [30]

Il y a aussi les capteurs qui permettant d'analyser et de surveiller les conditions de l'environnement aquatique. On distingue :

- Capteur de pression
- Capteur de profondeur
- Capteur de température
- Capteur de salinité

6. La protection des éléments électrique et électronique

6.1. Introduction

Les drones sous-marins contiennent un système intégré composé de circuits électroniques et de câbles électriques c'est pour ça la protection de ce système est très importante étant donné que ces drones opèrent à différentes profondeurs, ils sont exposés à une pression élevée, une forte humidité et de puissants courants marins, les rendant ainsi vulnérables à la corrosion, aux fuites électriques et aux dommages causés par les variations soudaines de température et de salinité. Par conséquent, la conception des drones sous-marins nécessite des systèmes de protection avancés afin d'assurer des performances stables et fiables des équipements électroniques qu'ils contiennent. Pour garantir leur fonctionnement avec une grande efficacité et sans erreurs.

6.2. Les défis de la protection des circuits électroniques en grande profondeur

La protection des circuits électroniques à l'intérieur du drone sous-marin est soumise à plusieurs défis qui influencent son efficacité de fonctionnement sous l'eau. Parmi les défis les plus importants, on trouve :

6.2.1. La pression et son impact sur les composants électroniques

Le drone possède plusieurs composants, qui sont souvent sensibles à toute force sous-marine, notamment la pression, qui augmente la probabilité de leur défaillance et la diversité des pannes sous l'eau. Lorsque la pression augmente avec la profondeur, elle exerce une force considérable sur les circuits, et les soudures électroniques, pouvant entraîner plusieurs problèmes.

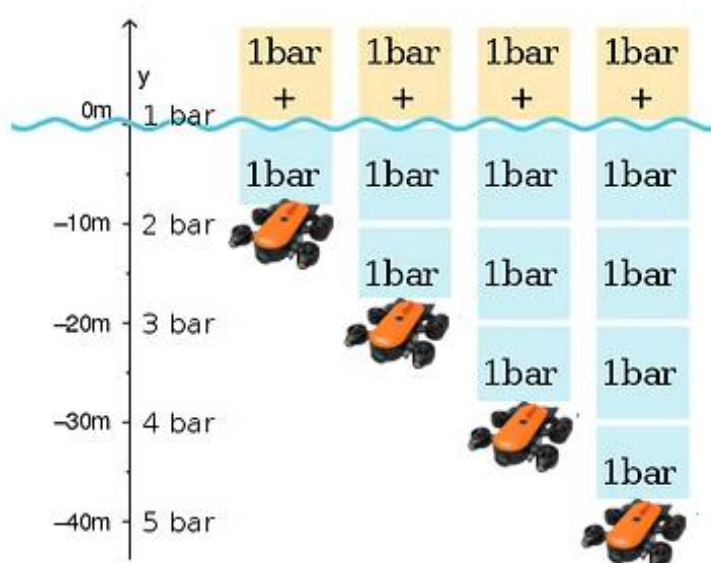


Figure II.34 : Variation de la pression en fonction de la profondeur sous l'eau

Les hautes pressions peuvent modifier le comportement des matériaux semi-conducteurs et des condensateurs, affectant ainsi leur conductivité et leur stabilité thermique. Ces changements peuvent entraîner des erreurs de signal, une augmentation de la dissipation thermique et une réduction de la durée de vie des composants.

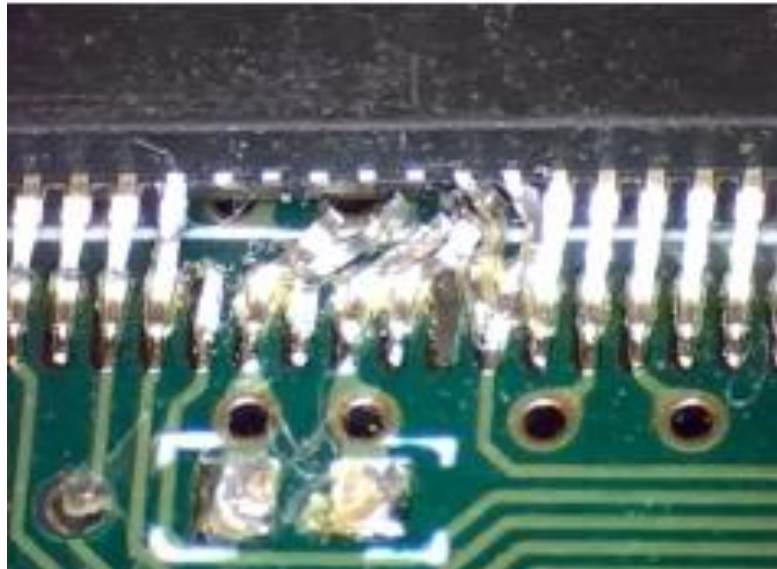


Figure II.35 : Broches dessoudées et déformées. [31]

6.2.2. L'exposition des éléments électroniques à l'eau

L'exposition des composants électroniques à l'eau provoque des dommages irréversibles, affectant leurs performances et leur durée de vie. L'eau, surtout si elle est salée ou chargée d'impuretés, peut provoquer des courts-circuits, de la corrosion et endommager ses composants internes.



Figure II.36 : Risque de fuite d'eau

- **Corrosion due à l'eau salée**

L'humidité et les sels provoquent des réactions chimiques avec les métaux utilisés dans les circuits électroniques, entraînant la formation d'oxydes métalliques comme la rouille. Cette corrosion affaiblit la conductivité électrique des composants électroniques, réduisant ainsi leur efficacité opérationnelle au fil du temps. De plus, les accumulations résultant de ces réactions peuvent entraîner la séparation de certaines pistes en cuivre. [32]

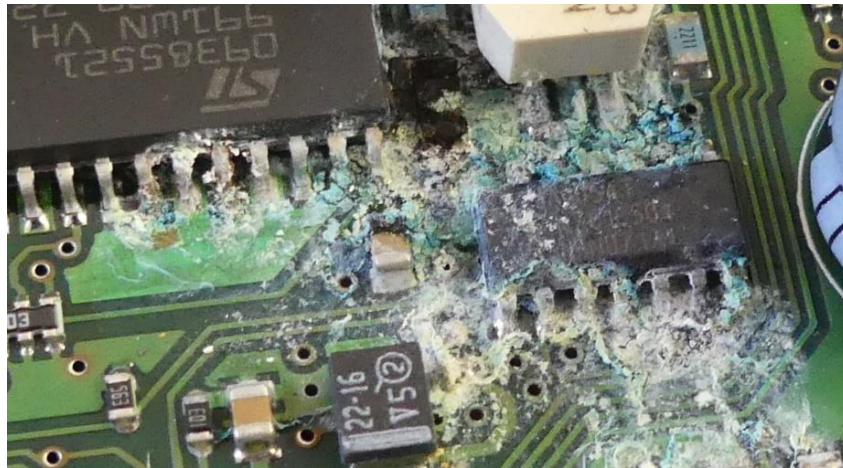


Figure II.37 : Risque de corrosion. [33]

- **Courts-circuits électriques**

L'eau, en particulier lorsqu'elle est riche en sels et en impuretés, contient des ions libres capables de conduire l'électricité avec une grande efficacité. Lorsqu'elle s'infiltre dans les circuits électroniques, ces ions peuvent créer des chemins indésirables pour le courant électrique, augmentant ainsi le risque de courts-circuits. Cela entraîne une élévation de la température des composants, ce qui peut provoquer la combustion ou la destruction complète de certaines pièces sensibles. De plus, les courts-circuits peuvent causer des dommages irréversibles aux processeurs et aux puces électroniques, rendant la réparation de l'appareil difficile, voire impossible dans certains cas. [32]



Figure II.38 : Risque de court-circuit. [33]

6.3. La protection

Pour un bon fonctionnement du drone sous-marin, il est essentiel de protéger ses éléments électriques et électroniques contre divers facteurs environnementaux hostiles.

6.3.1. Protection des éléments sensibles

Les éléments sensibles du drone sous-marin comme le système électronique et informatique doit être protégé contre tous les défis sous-marins.

En général, des boîtiers hermétiques sont utilisés pour offrir une protection contre les infiltrations d'eau et sont fabriqués à partir de matériaux résistants afin de supporter les variations de pression et la salinité de l'eau. Le figure II.39 est un exemple d'une boîte étanche utiliser pour la protection des éléments sensible sous-marin.



Figure II.39 : Coque de protection transparente. [34]

6.3.2. Protection des câbles électriques

Il faut assurer que toutes les connexions électriques (câbles, connecteurs) sont étanches et résistantes à la corrosion, souvent grâce à des joints en caoutchouc ou des gaines protectrices. Ceci permet d'éviter que l'eau ne pénètre dans les fils électriques et ainsi d'éviter des problèmes dans le circuit.



Figure II.40 : Un connecteur étanche pour les drones sous-marin. [35]

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les technologies des drones sous-marins. Tout d'abord, nous avons présenté une définition générale des dernières technologies et leurs principaux aspects techniques. Ensuite nous avons expliqué les conceptions globales et les principaux composants utilisées dans la majorité de ces appareils. Puis nous avons fait une explication des types de structures et des matériaux dont elles sont constituées passons après au système de pulsation utilisé et la partie commande de ces drones. Enfin, nous avons expliqué comment protéger les différents éléments électriques et électronique intérieur.

Chapitre III

Conception de l'enceinte de protection

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons remarqué que le fonctionnement de tous les drones sous-marins dépend des cartes électroniques, des circuits électriques et des pièces sensibles. Ces derniers ne doivent pas être en contact avec l'eau pour éviter l'endommager (en cas de court-circuit), ce qui entraîne des pertes financières indésirables (remplacement des pièces endommagées et faire des maintenances...), car plus le drone plonge en profondeur, plus la pression appliquée augmente, ce qui provoque le déplacement de l'eau à l'intérieur, rendant l'isolation plus difficile. Aussi la disponibilité de l'humidité au fil du temps entraîne des corrosions des composants, ce qui fait de la protection de ces éléments une tâche très nécessaire pour assurer le succès de ces véhicules.

Notre projet se concentre précisément sur cette partie, comment assurer la protection de ces composants lors d'une plongée, notamment en grande profondeur où la pression devient très élevée ?

2. Analyse fonctionnelle

2.1. Définition

L'analyse fonctionnelle est une approche employée dans le cadre de la gestion de projet visant à identifier et à traduire les attentes et les besoins du client en fonctions que le produit ou service doit remplir. Il s'agit essentiellement de reformuler les exigences du client en spécifications techniques et fonctionnalités concrètes, qui seront ensuite intégrées aux composants de l'offre. Cette méthode permet de s'assurer que le produit final répond précisément aux attentes du client tout en structurant le développement autour des objectifs clés.

L'analyse fonctionnelle consiste à recenser, caractériser, organiser, hiérarchiser et évaluer les fonctions d'utilisation d'un produit dans un cahier des charges, sans se focaliser sur les solutions techniques qui seront explorées ultérieurement lors d'une étude spécifique. Pour faciliter cette démarche, l'équipe projet utilise des représentations graphiques afin d'illustrer les fonctions et de documenter les avancées, offrant ainsi une vision claire et structurée des attentes et des besoins à satisfaire.

2.2. Les types d'analyse fonctionnelle

2.2.1. L'analyse fonctionnelle externe

Analyse fonctionnelle externe ou également appelée L'analyse fonctionnelle du besoin permet de déterminer les éléments du cahier des charges fonctionnelles et identifie

les fonctions principales et les fonctions contraintes du produit ou du système. Cet outil sert de base de dialogue avec l'utilisateur, permettant de recueillir les informations essentielles pour la conception et d'élaborer un cahier des charges fonctionnel qui doit être validé par le client ou l'utilisateur final.

Le produit est considéré comme au cœur de son environnement et dans ses interactions avec son milieu extérieur. Cependant, il n'est question que de projet et non de solution. L'analyse fonctionnelle externe repose sur trois principes, la connaissance du besoin, sa compréhension et son expression en termes de fonctions.

Pour un produit, il faut répondre à trois questions. Ces questions sont généralement combinées et appelées « bête à cornes »

- A qui ?
- Sur quoi agit-il ?
- Dans quel but ?

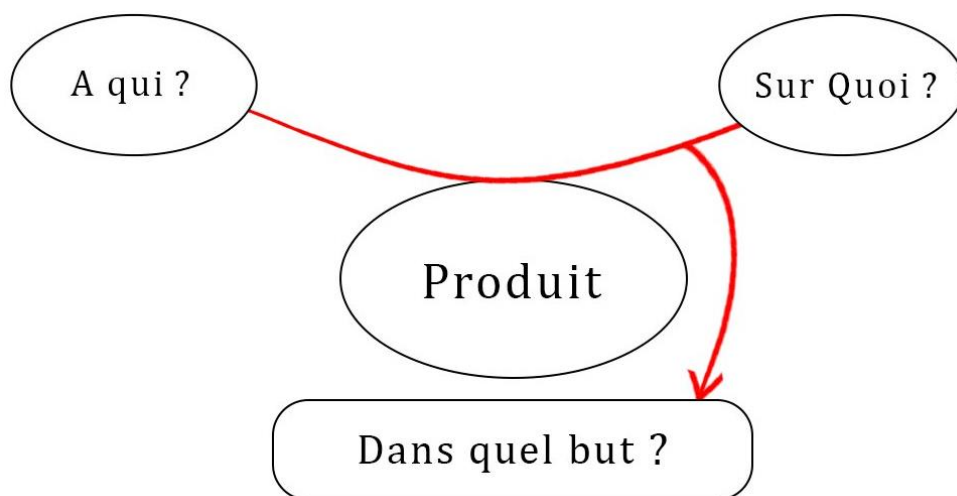


Figure III.01 : Diagramme bête à cornes d'une analyse externe

La question de l'utilité et de la finalité du produit se pose alors. Cette étape permet de prendre du recul sur les besoins exprimés par les utilisateurs. Il est essentiel d'identifier les éléments externes en interaction avec le produit afin de déterminer ses fonctions principales et secondaires ainsi que les contraintes associées. Ces éléments sont ensuite analysés et classés en fonction de leur impact sur la qualité du service rendu par le produit.

2.2.2. L'analyse fonctionnelle interne

L'analyse fonctionnelle interne ou l'analyse fonctionnelle du produit vise à étudier le fonctionnement détaillé d'un produit en identifiant ses composants, leurs interactions et leur contribution aux fonctions globales et elle intervient après l'analyse fonctionnelle externe. En explorant en détail la solution existante, elle propose un examen approfondi de sa configuration et de chacun de ses composants. Cette démarche permet de remettre en question l'ensemble du produit, de représenter ses différents éléments de manière graphique et d'identifier d'éventuelles améliorations.

Cette analyse dégage, après validation du besoin, chaque fonction technique principale et complémentaire et permet la matérialisation des concepts de solutions techniques.

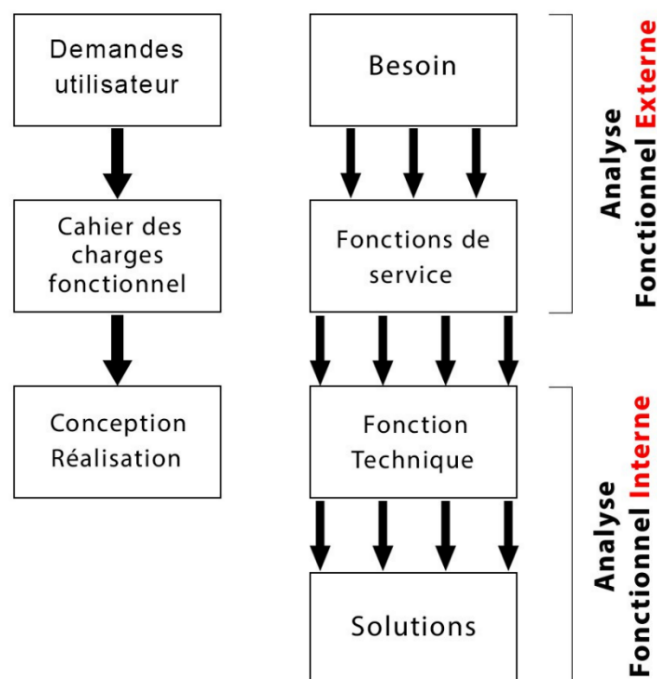


Figure III.02 : Diagramme de l'analyse fonctionnelle [36]

2.3. Les fonctions de l'analyse fonctionnelle

Pour réaliser une analyse fonctionnelle on utilise une fonction de service qui est l'action d'un produit ou de l'un de ses constituants, exprimée exclusivement en termes de finalité, indépendamment des moyens matériels utilisés. Il y a 2 types de fonctions :

- ❖ Fonctions principales (ou fonctions d'usage). Ce sont les fonctions qui satisfont le besoin. Elles assurent la prestation du service rendu. Ce sont les raisons pour lesquelles le produit a été créé. [36]

- ❖ Fonctions contraintes et / ou complémentaires qui recensent les conditions qui doivent être impérativement vérifiées par le produit, mais qui ne sont pas sa raison d'être. Ces fonctions facilitent, améliorent, ou complètent le service rendu. Ce type de fonction ne résulte pas obligatoirement de la demande explicite du client. Il s'agit de proposer au client des améliorations pour son produit et / ou de respecter des contraintes de conception par exemple. [36]

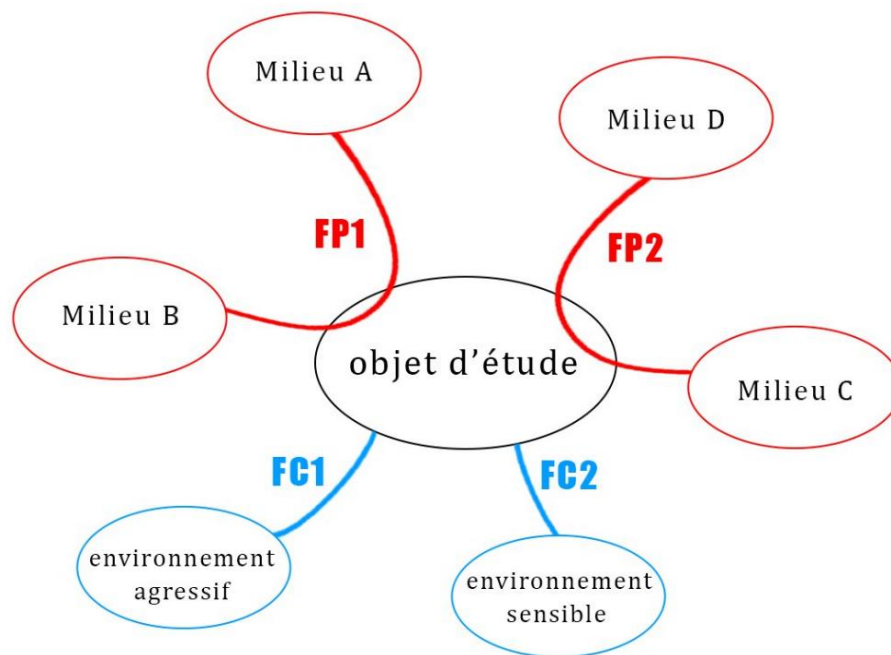


Figure III.03 : Exemple des fonctions analyse fonctionnelle

2.4. L'utilisation de l'analyse fonctionnelle

Autrefois, les inventeurs lançaient la fabrication du produit immédiatement après avoir présenté leur idée. Puis, en cours de fabrication, ils rencontraient plusieurs obstacles qu'ils n'avaient pas pris en compte, tels que des erreurs dimensionnelles, un mauvais choix de matériaux ou l'insatisfaction des clients... ce qui les obligeait à refaire la production depuis le début et à perdre beaucoup de temps, d'efforts et d'argent.

L'analyse fonctionnelle permet d'éviter certains pièges classiques de la conception (aveuglement, manque d'objectivité, mauvaise gestion des priorités). Dans les faits, les premières étapes de l'analyse sont générales et concernent tous les acteurs d'un même projet. C'est seulement dans un deuxième temps que l'analyse devient technique, et oriente les concepteurs vers des solutions techniques. [37]

L'analyse fonctionnelle rend ainsi possible un dialogue entre tous les intervenants d'un projet (quels que soient leurs domaines de compétence). C'est un gage d'objectivité et de créativité dans la conduite du projet. [37]

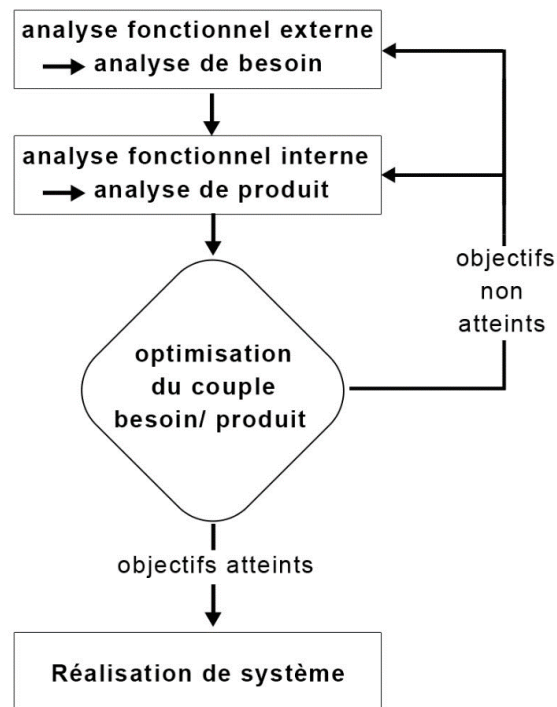


Figure III.04 : Démarche générale de l'analyse fonctionnelle

2.5. Application au cas d'enceinte de protection

Dans notre cas, nous avons effectué l'analyse fonctionnelle suivante :

2.5.1. Identification des besoins

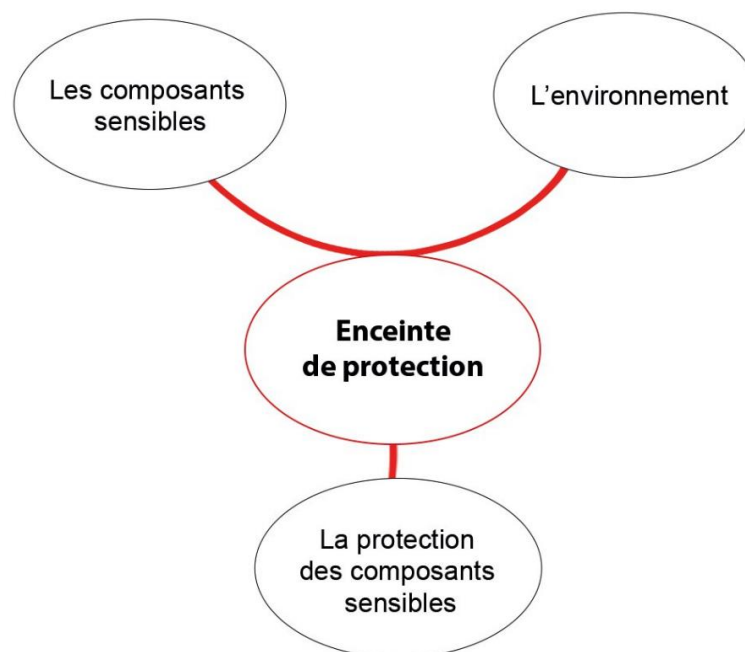


Figure III.05 : Diagramme bête à cornes pour l'enceinte de protection

- ✓ L'objectif de notre idée est de réaliser une enceinte de protection qui sera utilisée dans les entreprises ou par les professionnels de stockage et de transport pour protéger les composants électriques, électroniques et informatiques ou les objets fragiles de l'eau, la salinité et la pression.

2.5.2. Diagramme pieuvre

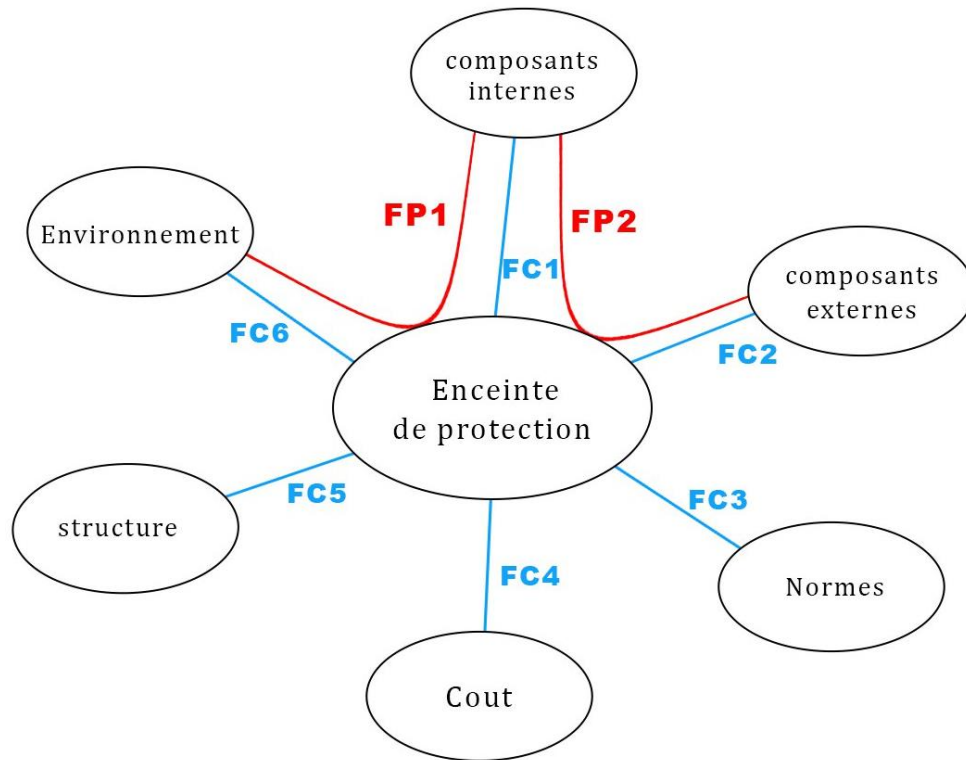


Figure III.06 : Le diagramme pieuvre pour l'enceinte de protection.

Les fonctions principales :

- ❖ FP1 : Protéger le contenu interne contre les effets externes (la pression, l'eau ...).
- ❖ FP2 : Assurer la connexion fiable entre les composants internes et externes.

Les fonctions contraintes :

- ❖ FC1 : Assurer un bon agencement des composants internes et une gestion organisée des câbles.
- ❖ FC2 : Garantir la facilité de connexion et l'étanchéité entre les composants externes et l'enceinte.
- ❖ FC3 : Respecter les normes de sécurité électrique et d'étanchéité sous-marine.
- ❖ FC4 : Maintenir un coût de fabrication et de commercialisation compétitif.
- ❖ FC5 : Offrir une structure interne optimisée pour un positionnement efficace des composants.

- ❖ FC6 : Protéger le contenu contre les agressions de l'environnement sans altération ni pollution.

2.6. Ordre d'importance

Tableau III.1 : Fonctions de services d'enceinte de protection du drone sous-marin

Code	Fonction
FP1	Protéger le contenu interne contre les effets externes (la pression et l'eau à une profondeur de 200 mètres).
FC3	Respecter les normes de sécurité électrique et d'étanchéité sous-marine.
FP2	Assurer la connexion fiable entre les composants interne et externe.
FC6	Protéger le contenu contre les agressions de l'environnement sans altération ni pollution (utilisation de matériaux non polluants, tels que l'aluminium, afin de réduire l'impact environnemental).
FC2	Garantir la facilité de connexion et l'étanchéité entre les composants externes et l'enceinte.
FC1	Assurer un bon agencement des composants internes et une gestion organisée des câbles.
FC5	Offrir une structure interne optimisée pour un positionnement efficace des composants.
FC4	Maintenir un coût de fabrication et de commercialisation compétitif.

3. Conception proposée

3.1. Introduction

À partir des exigences identifiées dans l'analyse fonctionnelle, l'enceinte de protection a été divisée en deux parties principales : une **partie extérieure**, assurant l'isolation mécanique et l'étanchéité vis-à-vis du milieu marin, et une **partie intérieure**, destinée à la fixation, à l'organisation et à la protection des composants internes du drone sous-marin.

3.2. La partie extérieure

La partie extérieure constitue l'enveloppe principale de l'enceinte. Elle est conçue sous forme de tube afin de garantir la résistance mécanique, assurer l'étanchéité du système et permettre une intégration fonctionnelle dans la structure du drone.

3.2.1. La forme choisie

Dans le cadre de la conception de notre enceinte de protection, la forme cylindrique a été choisie comme forme géométrique principale. Mécaniquement, la forme cylindrique permet une meilleure répartition de la pression hydrostatique exercée par l'eau, réduisant ainsi les risques de déformation.

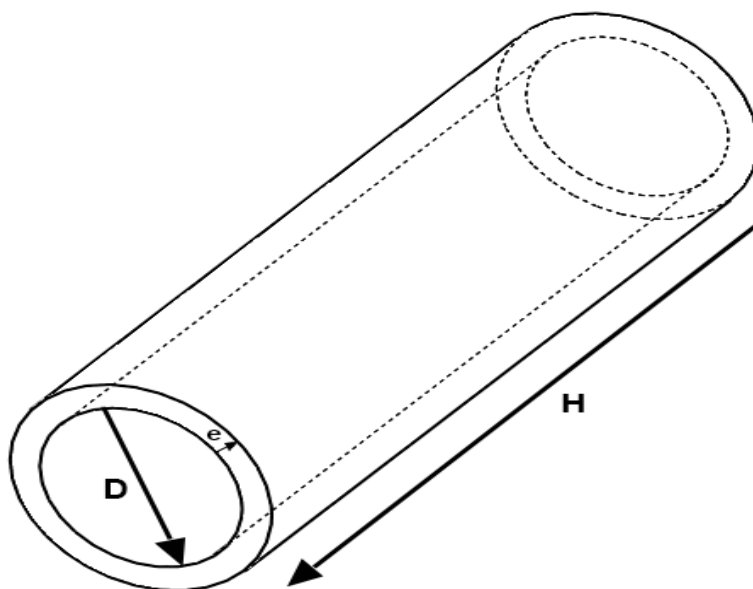


Figure III.07 : La forme cylindrique

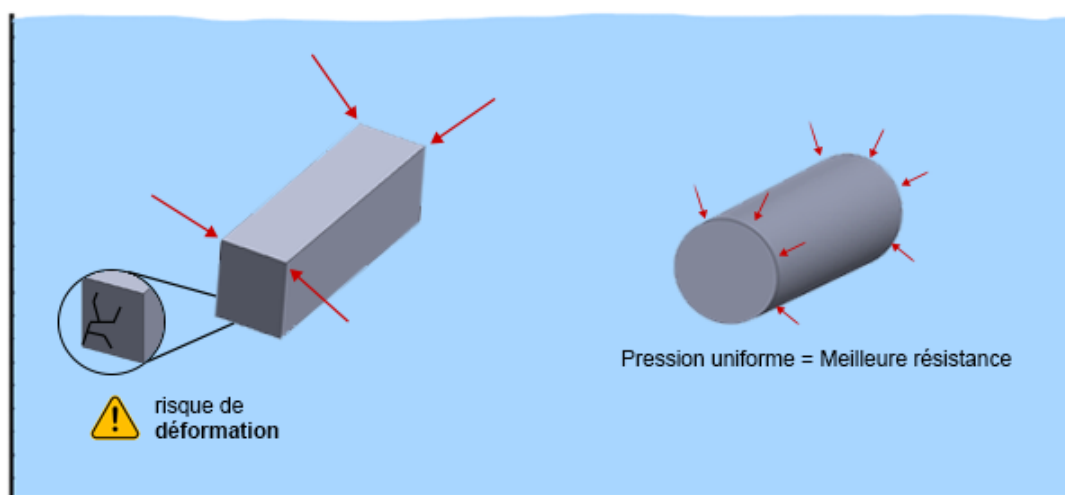


Figure III.08 : L'effet de la pression sur les formes géométriques sous l'eau

3.2.2. Matériau de fabrication

Nous avons choisi l'aluminium comme matériau de fabrication de tube pour plusieurs raisons :

- L'aluminium tel que l'alliage 6061-T6 offre une bonne résistance à la corrosion.
- Il est facile à usiner, souder et former.
- Il dissipe bien la chaleur, ce qui aide à éviter la surchauffe des composants électroniques internes.
- Il supporte bien les chocs et les contraintes mécaniques.

3.2.3. Système de fermeture et d'étanchéité

Dans notre conception, nous avons opté pour un couvercle vissé, permettant une fermeture mécanique sécurisée de l'enceinte. En utilisant des joints toriques pour assurer une étanchéité efficace. Les joints toriques insérés dans des gorges usinées avec précision entre le tube et le couvercle comme illustré dans la figure ci-dessous.

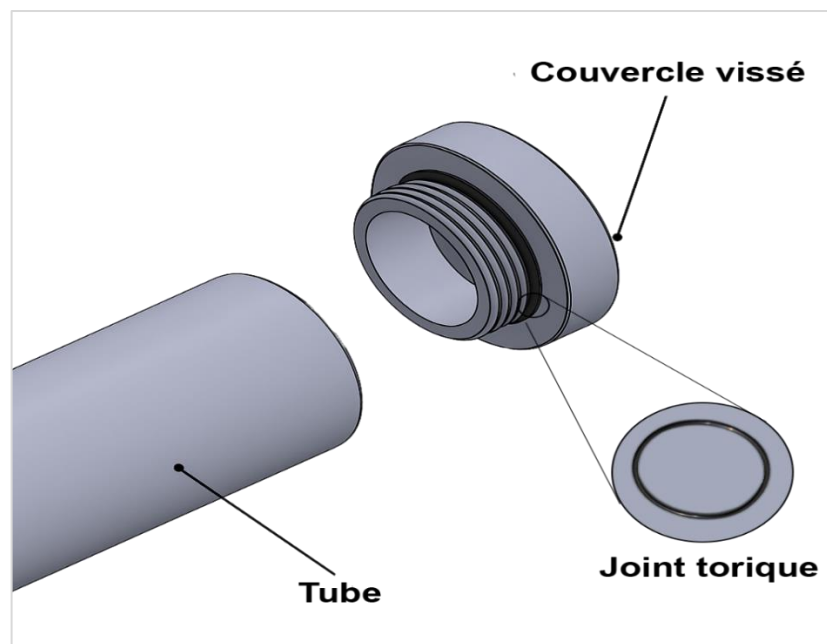


Figure III.09 : Système de fermeture et d'étanchéité

3.2.4. Système de passage de câble étanche

Pour assurer l'alimentation électrique ou la communication entre l'extérieur et l'intérieur de l'enceinte, tout en maintenant une parfaite étanchéité, un presse-étoupe a été intégré au niveau du couvercle de l'enceinte.



Figure III.10 : Presse-étoupe [38]

Le presse-étoupe fonctionne selon un principe mécanique simple. Une première extrémité du corps principal est insérée à travers la paroi de l'enceinte, puis fixée solidement à l'aide d'un contre-écrou qui maintient l'ensemble en position. De l'autre côté, un filetage permet de visser un élément conique. Lors du serrage, cette bague applique une pression sur le corps du presse-étoupe, ce qui provoque un resserrement progressif autour du câble, assurant ainsi un bon maintien mécanique. [38]



Figure III.11 : Connexion à travers un presse-étoupe [38]

3.3. La partie intérieure

L'organisation et la fixation des composants interne du drone sous-marin nécessitent une partie conçue d'une manière à assurer la stabilité et la sécurité de ces composants. Cette partie comprend plusieurs éléments fonctionnels. Dont chacun joue un rôle déterminant dans le bon fonctionnement global du système.

3.3.1. Les composants utilisés

- **Pixhawk**

Le Pixhawk est utilisé comme unité centrale de commande pour le drone sous-marin. Installé à l'intérieur de l'enceinte de protection, son rôle principal est d'assurer le pilotage des moteurs, la stabilisation du véhicule, ainsi que la gestion des capteurs.



Figure III.12 : Le Pixhawk

- **Raspberry**

Le Raspberry joue le rôle d'un ordinateur de bord chargé de gérer les traitements à plus haut niveau. Il est responsable de l'exécution de scripts, et la gestion des interfaces utilisateur, et de la communication avec la station en surface.



Figure III.13 : Le Raspberry

- **Carte de communication**

Ce composant est pour assurer la communication entre le drone sous-marin et la station de contrôle vers un câble qui transmette les données et l'énergie au même temps.



Figure III.14 : Carte de communication

- **Carte de distribution d'alimentation (PDB)**

Cette carte permet de répartir efficacement l'alimentation électrique provenant de la batterie vers les différents composants du drone, tels que les contrôleurs de vol, les ESC (contrôleurs de vitesse). Équipée de deux régulateurs de tension intégrés, elle fournit des sorties stables en 5V et 12V, essentielles pour alimenter des dispositifs sensibles à des tensions précises.

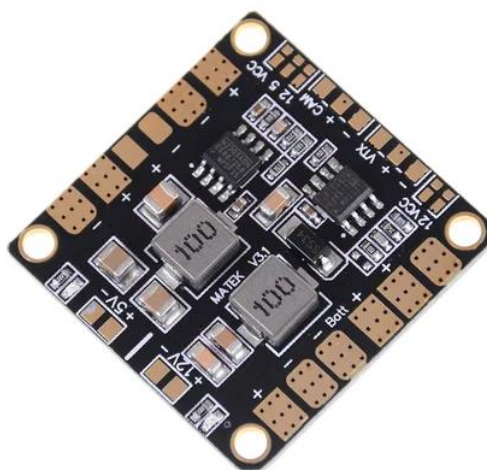


Figure III.15 : Carte de distribution d'alimentation

- **Les variateurs de vitesse**

Le rôle principal est de contrôler la vitesse de rotation des moteurs brushless utilisés pour la propulsion du drone sous-marin. Dans ce travail, nous avons décidé d'utiliser huit (08) variateurs de vitesse, qui est l'étendue maximale utilisée dans les dernières versions des drones sous-marines.



Figure III.16 : Variateur de vitesse

3.3.2. Le support interne

La partie intérieure contient un support sous forme de plaque qui permette de fixer l'ensemble des composants du drone sous-marin de manière stable et ordonné. Lors de la conception du support interne, il est impératif de déterminer ses dimensions en fonction des composants électroniques à intégrer à l'intérieur du drone. Chaque élément doit être positionné de manière organisée et accessible, tout en respectant des espacements suffisants pour le passage des câbles.

4. Modélisation et simulation

4.1. Introduction

À la suite de la phase de conception proposée, nous entrons maintenant dans la phase de mise en œuvre du projet de manière plus réaliste. L'objectif principal de cette étape a traduit la conception théorique en un modèle 3D détaillé. Cette étape permet de valider ou d'ajuster la conception finale avant la fabrication, ce qui évite les erreurs coûteuses et garantit une meilleure fiabilité du système en conditions réelles.

4.2. L'environnement de travail

Pour réaliser la modélisation 3D et les simulations mécaniques de notre enceinte de protection, nous avons utilisé le logiciel SolidWorks. C'est un outil de conception assistée par ordinateur (CAO) largement reconnu dans le domaine de l'ingénierie mécanique.

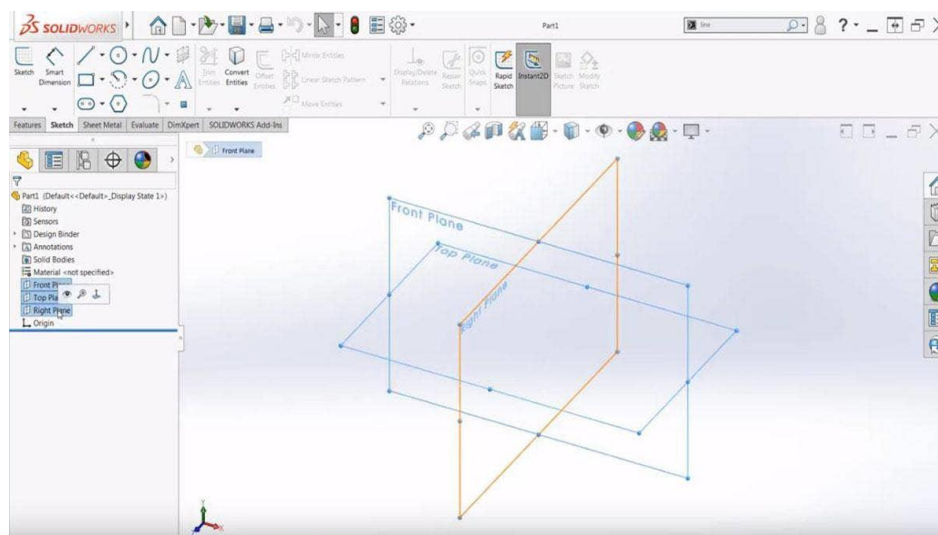


Figure III.17 : SolidWorks interface

L'utilisation de ce logiciel s'est révélée particulièrement adaptée à notre projet, grâce à son interface intuitive, sa bibliothèque de matériaux et ses modules de simulation intégrés, facilitant ainsi la validation de la conception avant la fabrication.

4.3. La modélisation du système

La modélisation du système consiste à transformer les idées développées durant la phase de conception proposée en un assemblage 3D complet, intégrant tous les composants mécaniques, électroniques et de fixation. Cette modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks, L'objectif principal de cette modélisation est de visualiser l'agencement global du système avant le passage à la fabrication, de vérifier la compatibilité dimensionnelle entre les différentes pièces, et d'anticiper les éventuelles interférences.

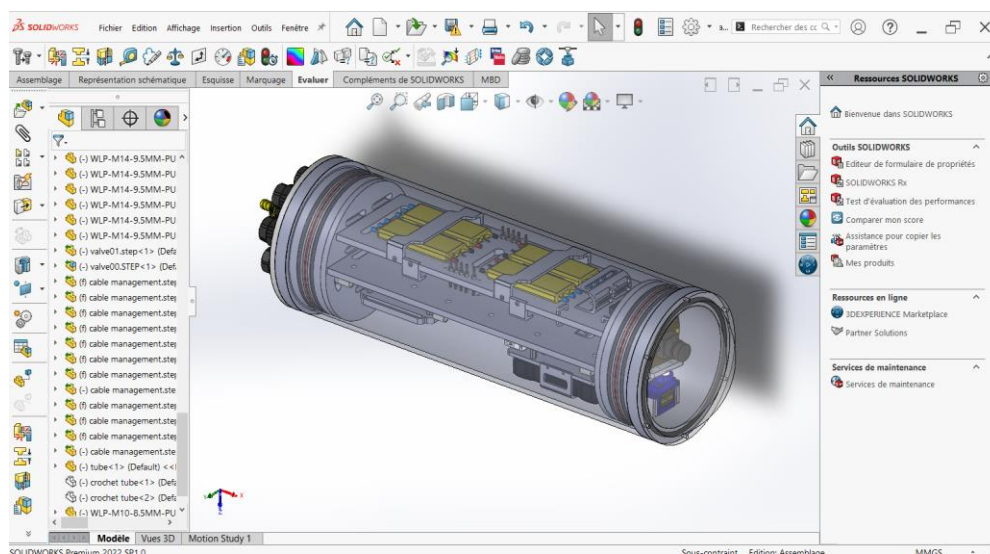


Figure III.18 : Vue isométrique avant de l'enceinte de protection

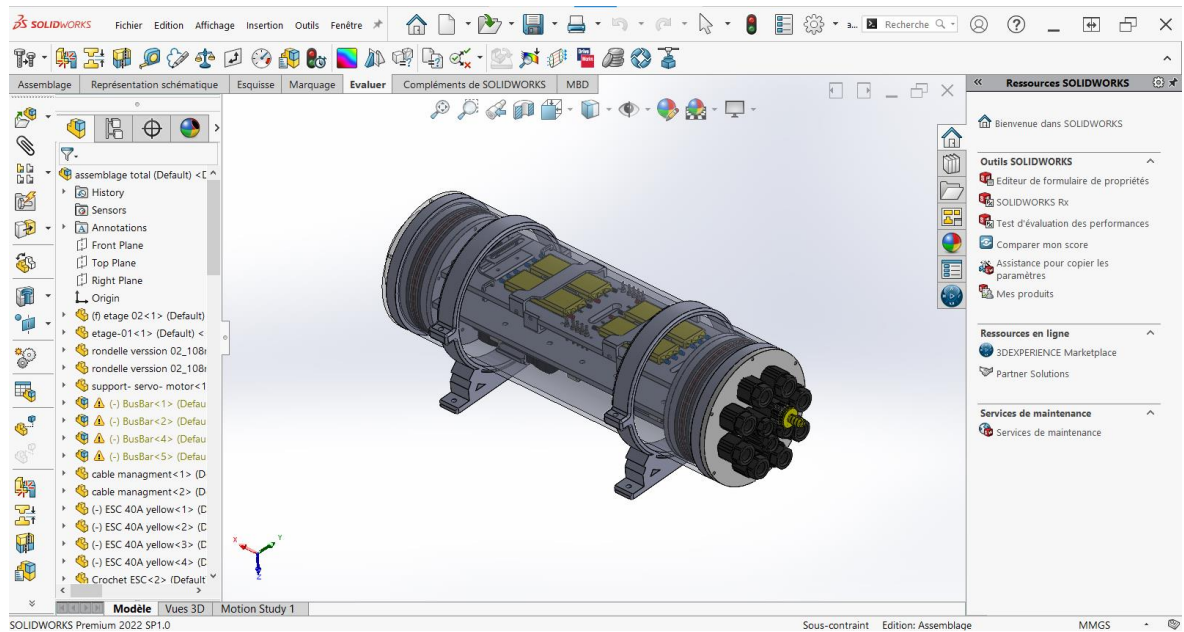


Figure III.19 : Vue isométrique arrière de l'enceinte de protection

4.3.1. Le support interne

La figure suivante montre la modélisation du support interne de notre enceinte de protection. Le support composé de **deux plaques rectangulaires situé horizontalement**, la plaque en haut avait les diamètres 260mm× 104mm et la plaque en bas avait les diamètres 260mm× 82mm solidement reliées entre elles par **deux roues** de diamètre 108 mm et une épaisseur de 5mm fixées à chaque extrémité.

L'objectif principal était d'optimiser l'espace intérieur du tube en réduisant le volume total du support au strict minimum, sans compromettre la fonctionnalité ni l'accessibilité des éléments. Une attention particulière a été accordée aux distances entre les composants, afin de permettre le passage sécurisé des câbles. La figure suivante montre la distribution des composant sur le support interne.

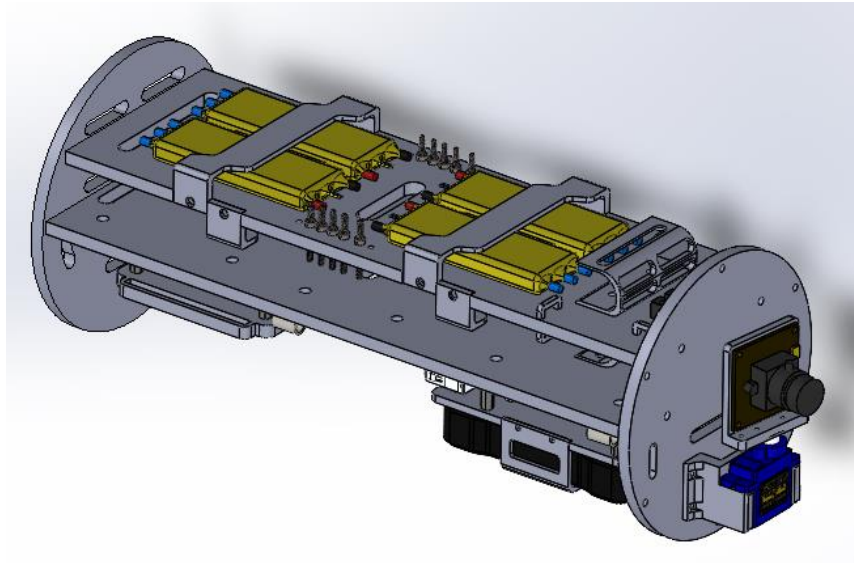


Figure III.20 : La distribution des composants sur le support interne

Les composants électroniques tels que la carte PDB et le Pixhawk sont fixés à l'aide d'entretoises, vissées pour créer des niveaux séparés et assurer l'isolation électrique et mécanique. Pour l'organisation des câbles, plusieurs clips de câbles sont utilisés, ils sont fixés sur les plaques pour guider les câbles et éviter qu'ils ne bougent ou n'entrent en contact avec d'autres composants sensibles. Des ouvertures et passages sont prévus dans les plaques pour permettre le passage ordonné des câbles.

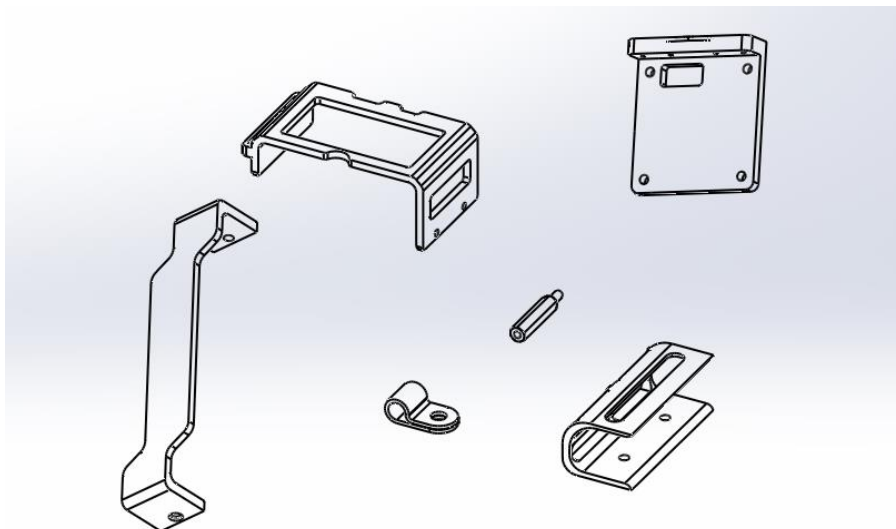


Figure III.21 : Éléments de fixation pour les composants et les câbles

4.3.2. Le couvercle droit

Ce couvercle est conçu pour assurer principalement la fermeture hermétique de l'enceinte. Il est inséré axialement à l'intérieur du tube.

L'étanchéité entre le couvercle et le tube est assurée par deux joints toriques, situés dans des gorges usinées sur la surface périphérique du couvercle. Ces joints se compriment légèrement contre la paroi interne du tube, assurant une barrière étanche contre l'eau.

L'assemblage du couvercle droit avec la roue est permanent et se fait à l'aide des vis, assurant une tenue mécanique solide et durable.

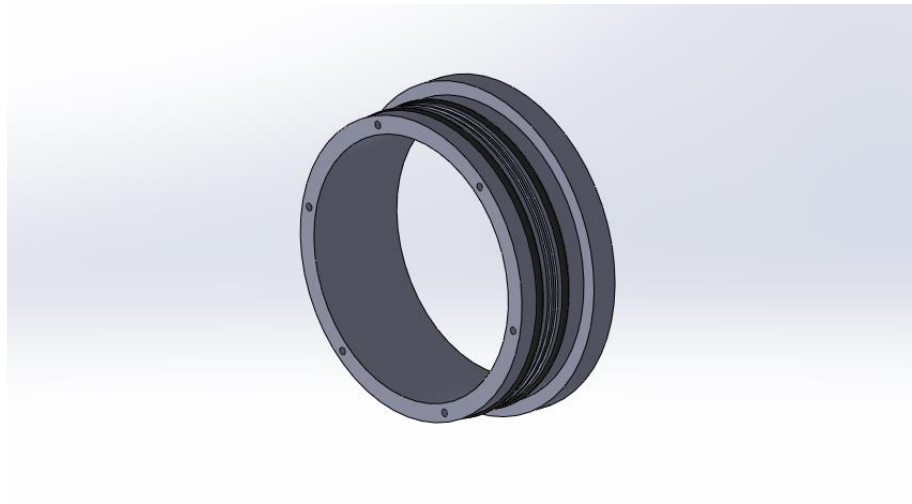


Figure III.22 : Le couvercle droit

- **Le choix de joint torique**

- Le couvercle a un diamètre extérieur de 108 mm.
- Il contient deux gorges de 106 mm de diamètre.
- Résiste à la pression jusqu'à 200 m sous-marin.

D'après les conditions précédentes nous avons choisi le modèle NBR O-ring 106 x 3mm (OD 112mm) 70 Shore A comme illustré dans la figure suivante :

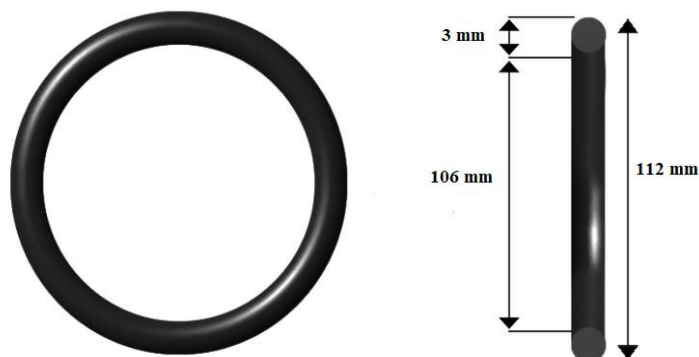


Figure III.23 : Dimensions du joint torique type NBR 70 Shore A

Le choix d'un joint torique en NBR avec une dureté de 70 Shore A repose sur ses excellentes propriétés d'étanchéité dans les environnements à pression, comme les applications sous-marines. Ce type de joint offre un bon équilibre entre souplesse et résistance mécanique, lui permettant de s'écraser légèrement sous compression pour assurer une étanchéité fiable.

- **Système de détection des fuites**

Dans le but de renforcer la sécurité du système et de permettre la détection précoce d'éventuelles infiltrations.

Ce système permet, en cas de contact avec l'eau entre les deux anneaux, de fermer un circuit électrique signalant ainsi la présence immédiate d'une fuite à l'intérieur de l'enceinte.

Le couvercle est mécaniquement lié à la roue latérale du support interne figure (III.24), ce qui garantit son positionnement fixe et sa stabilité structurelle pendant le fonctionnement. Cette liaison est renforcée par des vis, assurant une connexion robuste.

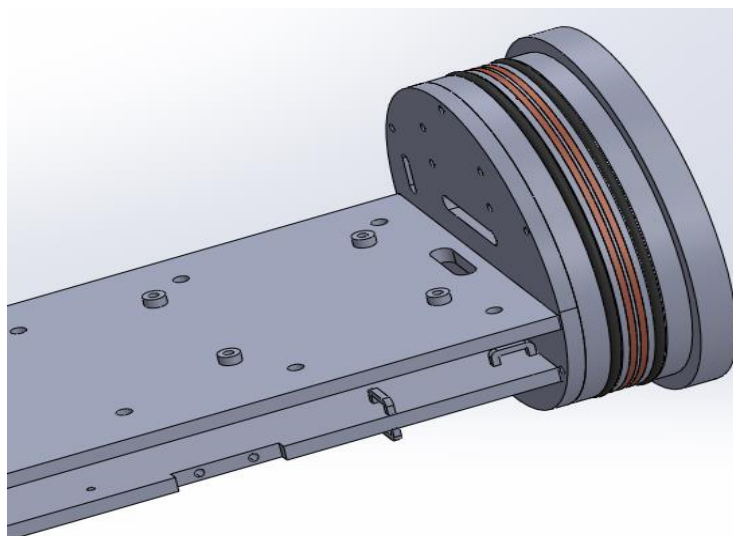


Figure III.24 : L'ensemble (couvercle droit – support)

Un troisième joint torique NBR O-ring 100 x 3mm (OD 106mm) 70 Shore A, a été intégrée à l'avant du couvercle droit, dans le but d'assurer une étanchéité supplémentaire lors de l'ajout d'un couvert transparent qui permet d'isoler efficacement l'intérieur du système extérieur et permette une vision directe pour la caméra.

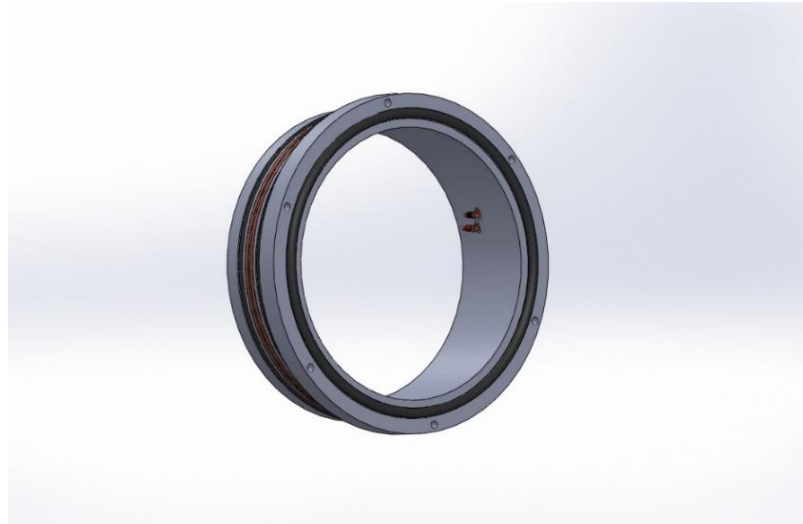


Figure III.25 : Couvercle droit avec un joint torique frontal

Étant donné l'intégration d'un joint torique supplémentaire au niveau du couvercle pour renforcer l'étanchéité frontale, il est nécessaire d'ajouter également deux anneaux en cuivre au niveau du couvrt. Ce choix permet d'assurer la détection immédiate d'un éventuel défaut d'étanchéité au niveau de ce joint, en signalant toute présence d'eau entre les deux anneaux.

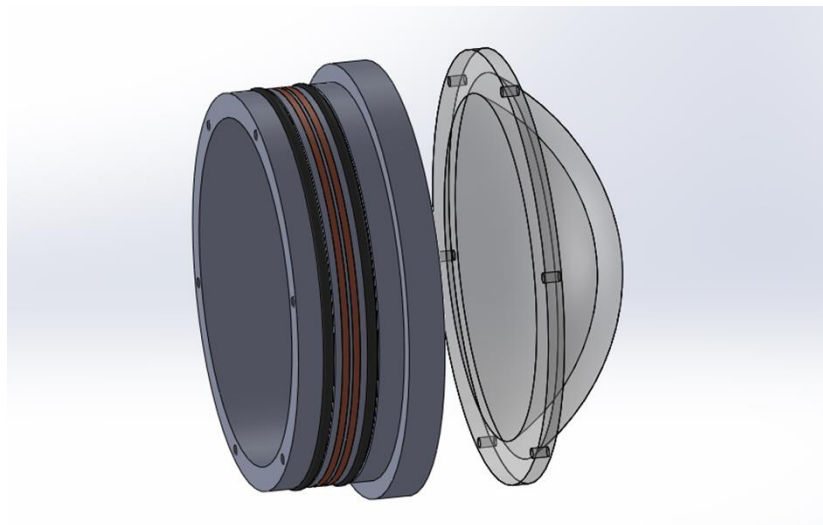


Figure III.26 : L'ensemble (couvercle droit-cache de camera)

4.3.3. Le couvercle gauche

Le couvercle gauche reprend la même géométrie de base que le couvercle droit, notamment en ce qui concerne toutes les gorges d'étanchéité pour les joints toriques, ainsi que les deux anneaux de cuivre pour le système de détection de fuite.

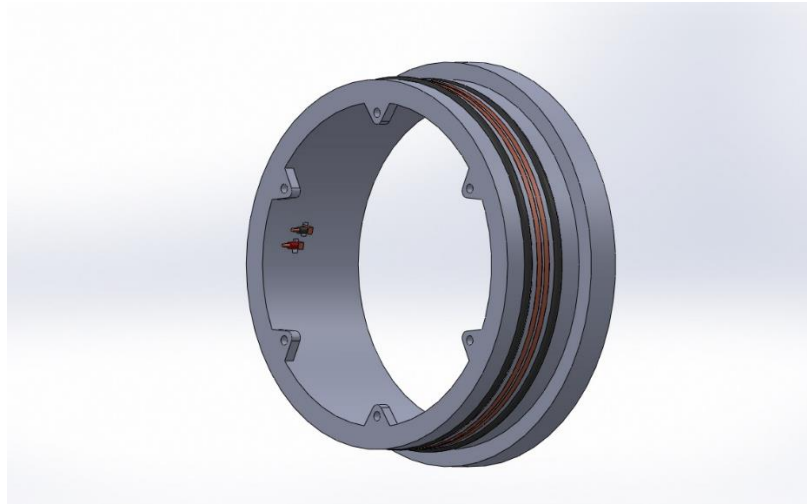


Figure III.27 : Le couvercle gauche

Contrairement au couvercle droit qui est vissé directement à la roue, le couvercle gauche est conçu pour pouvoir être monté et démonté facilitant ainsi l'accès à l'intérieur de l'enceinte pour les opérations de maintenance, de câblage ou de remplacement de composants. Il est maintenu à la roue par des vis.

- **Passage des câbles par presse-étoupe**

Comme illustré sur la figure ci-dessous, le couver du couvercle gauche a été percé avec plusieurs ouvertures circulaires permettant l'intégration de plusieurs presse-étoupes de diamètre 12mm. Cette configuration modulaire permet un passage organisé des différents câbles du drone.

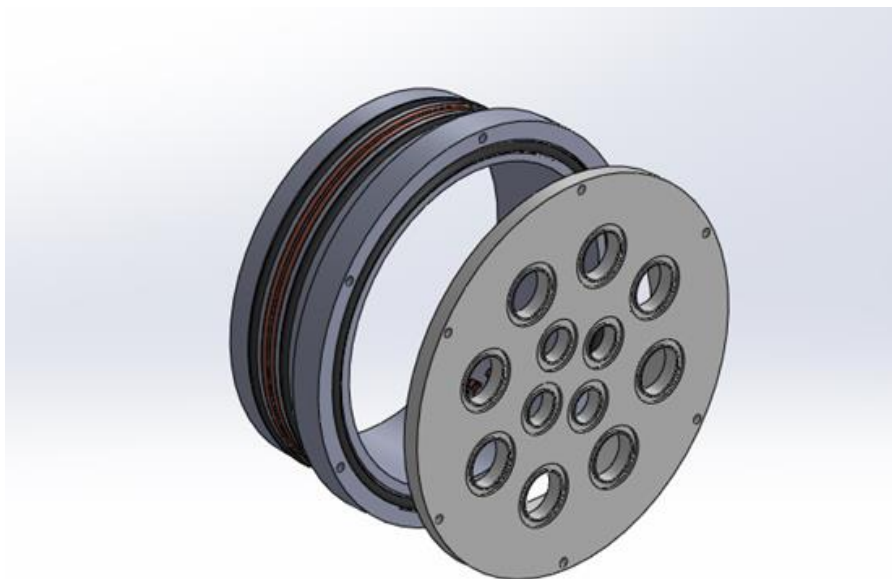


Figure III.28 : L'ensemble couvercle gauche – couvert

Les presse-étoupes sont vissés mécaniquement dans le couvercle à l'aide d'un écrou de serrage, assurant une compression uniforme autour du câble et une étanchéité complète selon le standard IP68. L'agencement radial des presse-étoupes permet également de conserver un bon équilibre structurel et facilite l'accès aux câbles pour la maintenance. Cette solution est inspirée des pratiques industrielles en environnement marin et sous-marin. Une valve a été ajoutée afin de permettre la purge de l'air lors de l'assemblage, cette valve est installée à proximité des presse-étoupes, du côté de la sortie des câbles, afin de garantir une mise en pression correcte et d'éviter toute accumulation d'air à l'intérieur de l'enceinte.

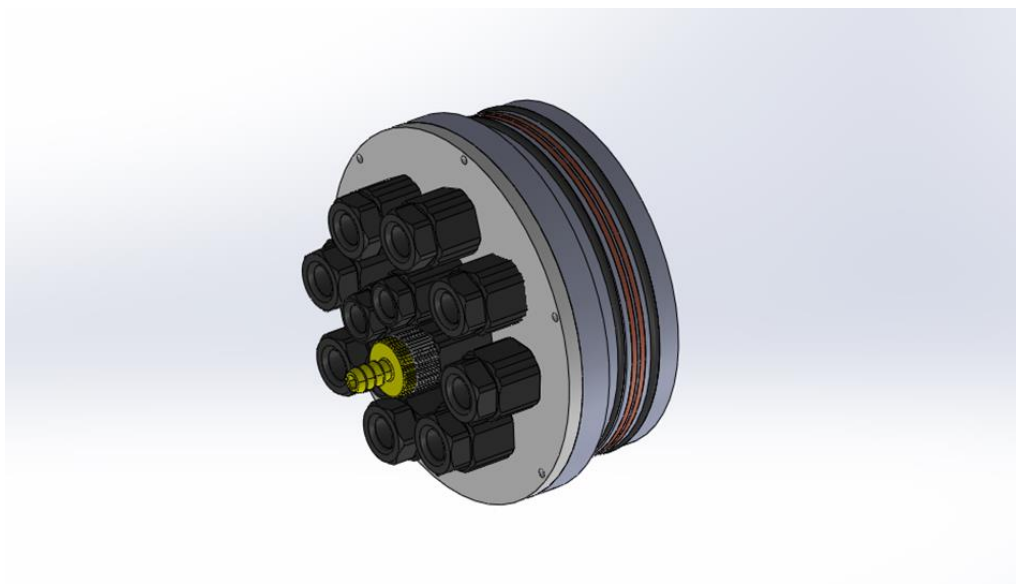


Figure III.29 : Passage des câbles à travers les presses étoupes + la valve

4.3.4. Le tube

Le tube principal constitue l'élément central de l'enceinte de protection du drone sous-marin. Il a été conçu avec un diamètre intérieur de 111 mm, spécifiquement choisi pour garantir un contact optimal avec les joints toriques de section 3 mm, permettant ainsi une compression radiale maîtrisée et assurant l'étanchéité parfaite du système.

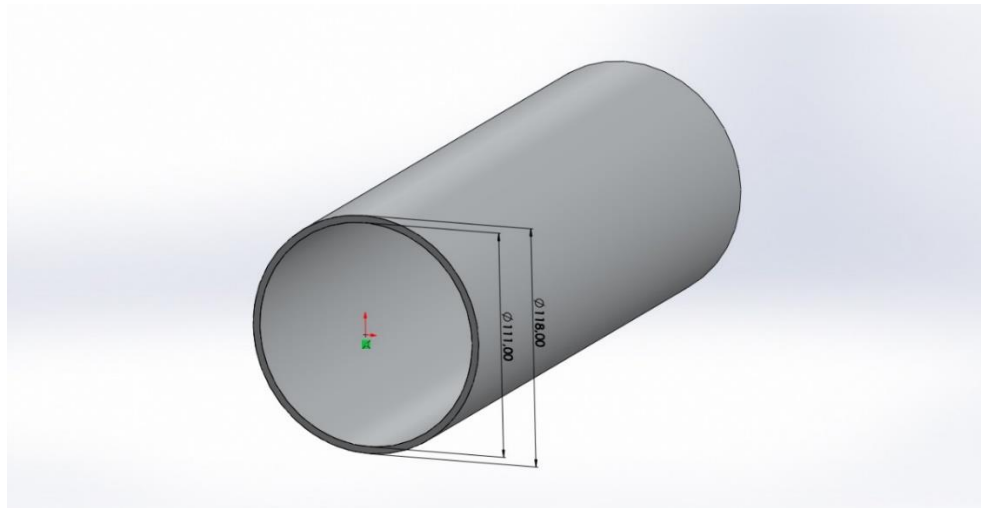


Figure III.30 : Le tube

Le diamètre extérieur du tube est de 118 mm, ce qui correspond à une épaisseur de paroi de 3.5 mm. Ce choix d'épaisseur a été fait en tenant compte du compromis entre la résistance à la pression hydrostatique (jusqu'à 21 bars à 200 mètres de profondeur). Le tube a une longueur totale de 325 mm, suffisante pour accueillir l'ensemble des composants internes.

- **Fixation de l'enceinte de protection sur le drone**

Pour assurer la stabilité mécanique de notre enceinte de protection, un système de fixation externe a été conçu, comme illustré sur la figure ci-dessus. Ce système repose sur deux colliers semi-circulaires entourant fermement le tube. Ces colliers sont solidement fixés à deux plaques de support supérieures, qui permettent le montage sur le châssis du drone.

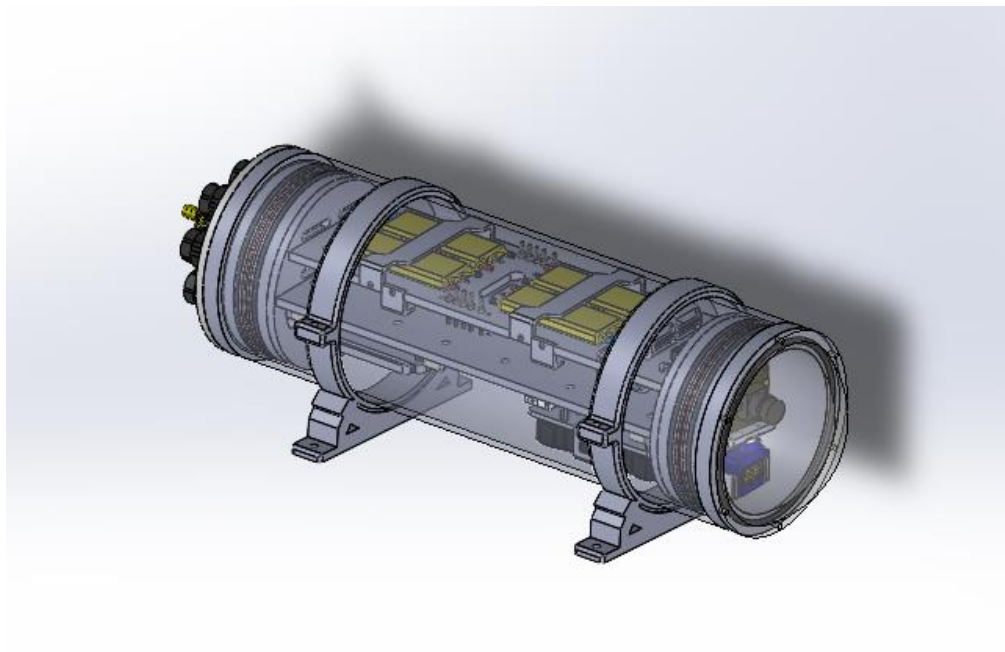


Figure III.31 : Fixation de l'enceinte de protection sur le drone

4.4. La simulation du système

4.4.1. L'objectif de simulation

L'objectif de cette partie est l'étude de résistance mécanique de l'ensemble qui représente la structure extérieure de notre enceinte de protection lorsqu'elle est soumise à la pression hydrostatique équivalent à la profondeur de 200 m sous l'eau, soit environ 2.1 MPa. Grâce à cette étude on peut connaître la résistance des matériaux dans ces conditions sans dépasser la limite d'élasticité ni présente des déformations excessives.

4.4.2. La méthodologie

L'étude a été réalisée à travers le logiciel SolidWorks avec une analyse statique linéaire en supposant que toutes les forces sont constantes. Le modèle 3D complet a été importé depuis l'assemblage principal incluant :

- Le tube
- Les couvercles
- Le couver droit
- Le cache caméra

4.4.3. Les conditions aux limites et chargements

Nous avons d'abord choisi les matériaux à partir desquels les pièces sont fabriquées

- Le tube (aluminium 6061 T6)
- Les couvercles (aluminium 6061 T6)
- Le couver droit (aluminium 6061 T6)
- Le cache caméra (verre)

Après on définit tous les contacts entre les pièces comme liés (bonded) afin de simplifier la simulation et représenter un assemblage parfaitement rigide et étanche. Puis on applique une pression uniforme de 2.1 MPa sur tous les surfaces extérieures. Enfin on choisit un standard mesh qu'il s'agit de processus de division du corps en grand nombre petits éléments puis résoudre l'équation de chaque partie avec précision, le choix de standard mesh est adapté à une analyse générale.

4.4.4. Les résultats de simulation

- Analyse de stress (von Mises)

L'analyse de stress consiste à calculer et visualiser la distribution des contraintes internes dans une pièce soumise à des charges, afin de vérifier si le matériau peut résister sans dépasser sa limite élastique ni se rompre.

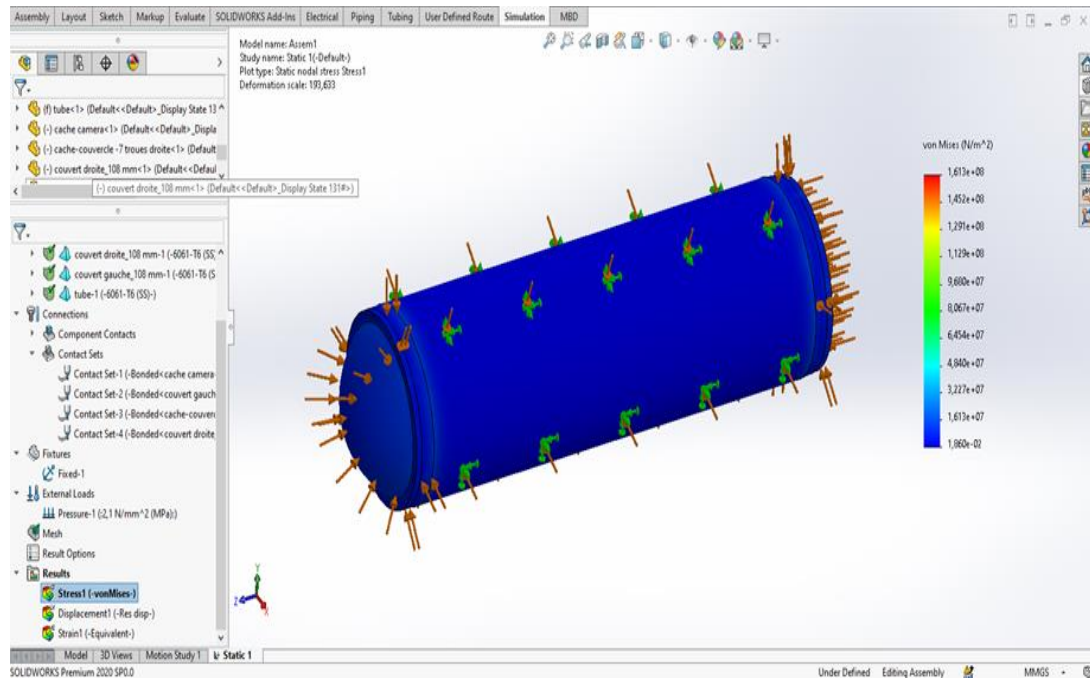


Figure III.32 : Analyse de von mise coté avant

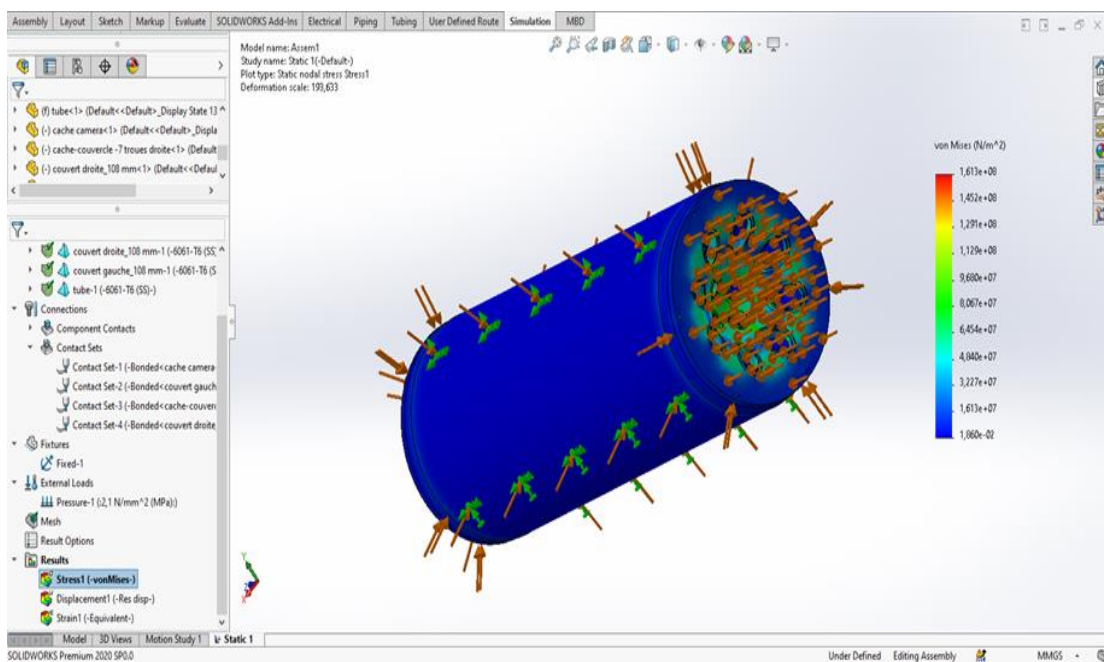


Figure III.33 : Analyse de von mise coté arrière

Les figures III.32- III.33 présente une analyse de von mise coté avant, où l'on remarque dans la barre des couleurs à droite :

- Valeur de contrainte minimale (bleu) : presque nulle
- Valeur de contrainte maximale (rouge) : presque $1,61 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, soit 161 MPa

La barre des couleurs indique que la concentration de contrainte sur le tube et les deux couvercles est faible, soit $1,86 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$, (figure 36), donc on peut dire que l'analyse

des contraintes (stress) montre que la structure de l'enclosure (le tube –les deux couvercles gauche) supporte bien la pression hydrostatique de 2,1 MPa appliquée à l'extérieur. La carte de Von Mises indique que la contrainte maximale atteint environ 161 MPa, Cette valeur reste inférieure à la limite d'élasticité de l'aluminium (environ 276 MPa), et même le ce qui garantit un fonctionnement sûr sans plastification pour les pièces métalliques. Toutefois, une attention particulière doit être portée au couvert droit pour éviter tout risque de rupture, notamment au niveau du joint de la fenêtre bombée. On peut régler ce problème dans la phase de réalisation.

Dans les matériaux fragiles comme le verre, la rupture se produit à la contrainte de traction directe la plus élevée, et non sous l'effet de contraintes composées comme dans les métaux. Il est donc nécessaire de déterminer où et quand se situe la contrainte la plus élevée. Pour ce faire, il faut analyser la contrainte principale maximale. La figure si dessus montre la contrainte principale maximale, Après avoir sélectionné la plus grande contrainte de traction directe.

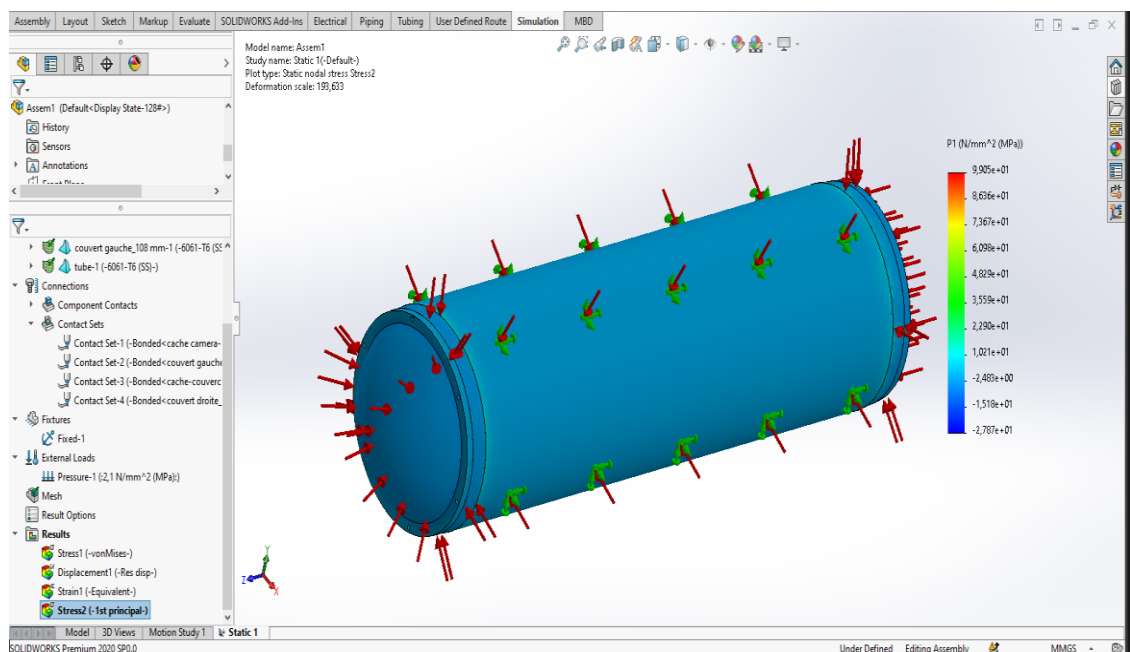


Figure III.34 : Contrainte principale maximale

Suite à l'analyse de la contrainte principale maximale, il a été constaté que le niveau de traction dans le couvercle en verre atteint une valeur maximale d'environ 10 MPa. En comparaison, un verre ordinaire présente généralement une résistance à la rupture en traction comprise entre 30 et 50 MPa, ce qui signifie que la contrainte reste nettement inférieure à la limite de rupture, mais sans grand facteur de sécurité pour un usage sous pression externe. En revanche, si le verre utilisé est un verre trempé (ou renforcé thermiquement), sa résistance

peut atteindre 90 à 120 MPa ce qui garantit un facteur de sécurité confortable. Ainsi, la faible contrainte mesurée (10 MPa) confirme la sécurité du composant, à condition de privilégier un verre trempé pour assurer une robustesse accrue en environnement sous-marin.

- Analyse de déplacement (displacement)

L'analyse de déplacement permet d'évaluer l'amplitude des déplacements et des déformations globales que subit la structure sous l'effet des charges appliquées, afin de s'assurer que la forme reste fonctionnelle et sûre.

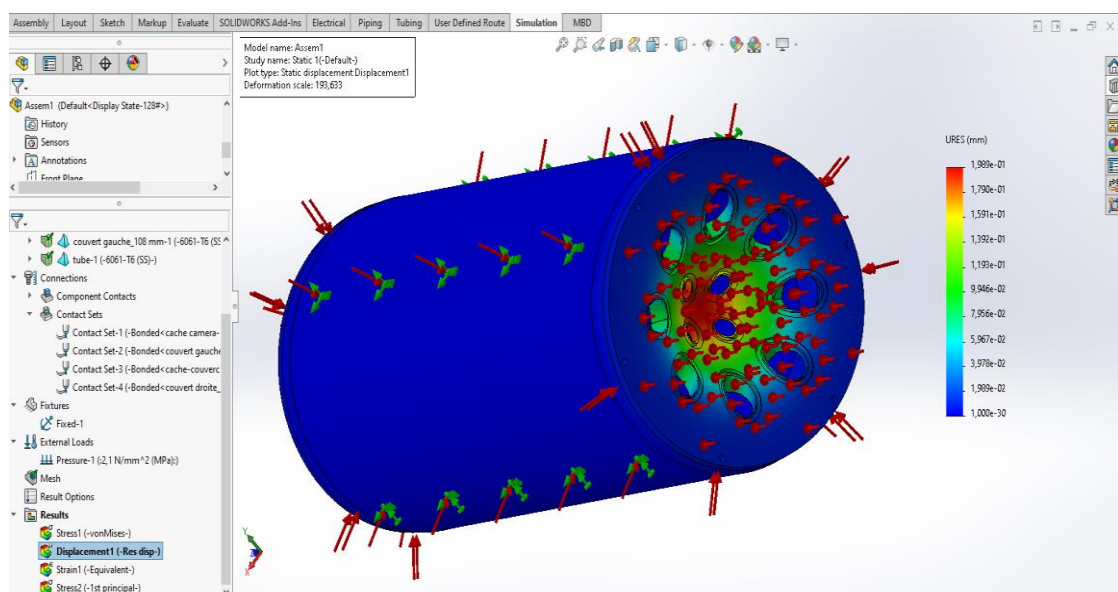


Figure III.35 : Analyse de déplacement

D'après la figure précédente L'analyse du déplacement (displacement) indique que la déformation maximale sous l'effet de la pression est très faible et reste dans une plage acceptable pour une structure rigide. La valeur maximale observée sur le couvert est de l'ordre de 0,2 mm. Cette faible déformation confirme que la rigidité globale de l'enceinte est suffisante pour résister à la pression externe.

4.4.5. Conclusion

D'après l'analyse statique linéaire précédente sur l'ensemble étudié est mécaniquement sûr pour résister à la pression sous-marine aux profondeurs de 200 m sous l'eau .Ces résultats ne sont valables que d'un point de vue théorique pour plusieurs raisons (structure stricte, matériaux homogènes, conditions restrictives idéales). Par conséquent, les résultats obtenus doivent être considérés comme indicatifs et nécessitent une validation expérimentale sur le prototype réel pour confirmer le bon fonctionnement de l'enceinte sous la pression réelle.

5. Conclusion générale

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans la conception et l'optimisation d'une enceinte étanche destinée à protéger les composants électroniques sensibles d'un drone sous-marin. À travers une approche méthodique et multidisciplinaire, nous avons analysé les différents types de drones sous-marins, leurs domaines d'application, ainsi que les contraintes techniques et environnementales auxquelles ils sont exposés.

Nous avons tout d'abord exploré les fondements théoriques relatifs à la structure, la propulsion, les systèmes de commande et la protection des systèmes embarqués. Ensuite, nous avons mené une analyse fonctionnelle rigoureuse, aboutissant à une conception optimisée de l'enceinte de protection répondant aux exigences de fiabilité, d'étanchéité, de résistance mécanique et d'organisation.

La modélisation assistée par ordinateur, suivie de simulations numériques, nous a permis d'évaluer les performances structurelles et hydrodynamiques de notre solution. Les résultats obtenus ont confirmé la validité du concept proposé, tout en mettant en évidence les axes d'amélioration potentiels, notamment en matière de gestion thermique et de maintenance.

Ce projet nous a permis de développer non seulement des compétences techniques dans le domaine de l'électromécanique et de la conception assistée par ordinateur, mais aussi des aptitudes en gestion de projet, en travail collaboratif et en résolution de problèmes complexes.

En perspective, ce travail pourrait être poursuivi par la réalisation d'un prototype physique, des tests en conditions réelles, ainsi que par l'intégration de technologies embarquées avancées (capteurs intelligents, systèmes de communication sans fil, etc.), afin d'évoluer vers des drones plus autonomes, robustes et adaptables aux missions les plus exigeantes.

في البيئة البحرية يعد حماية المكونات الإلكترونية أمراً مهماً وفي نفس الوقت معقداً والذي يضمن استقرار أداء المركبات المسيرة تحت الماء، دون التأثير بالعوامل الخارجية مثل تسربات الماء، الضغوطات العالية. ركز هذا العمل على تصميم علبة حماية متقدمة توفر مستوى عالي من العزل والثبات الميكانيكي. تم الاعتماد على دراسة دقيقة لنظام العزل وتوزيع وتثبيت المكونات الداخلية إضافة إلى إدارة الأسلاك والتوصيلات داخل العلبة حيث تم تطوير نظام يحد من التشابك، يساعد على توزيع وتثبيت المكونات ويسهل أعمال الصيانة. اعتمد التصميم على مواد مقاومة للتآكل مع قابلية التصنيع السريع والتركيب العملي في البيئات المختلفة.

Résumé

Dans les environnements marins, la protection des composants électroniques représente un enjeu crucial, complexe et indispensable pour assurer la stabilité et la fiabilité des performances des véhicules sous-marins autonomes, en dépit de conditions extrêmes telles que les infiltrations d'eau et les fortes pressions. Cette étude porte sur la conception d'une enceinte de protection offrant un niveau élevé d'isolation et de robustesse mécanique. Une attention particulière a été portée à l'étude du système d'étanchéité, à l'agencement et à la fixation des composants internes, ainsi qu'à la gestion optimisée du câblage. Un système de gestion des câbles a été développé afin de minimiser l'enchevêtrement, améliorer la circulation interne, et simplifier les interventions de maintenance. Le choix des matériaux s'est orienté vers des solutions résistantes à la corrosion, compatibles avec une fabrication rapide et une installation efficace dans divers environnements marins.

Abstract

In marine environments, protecting electronic components is both critical and technically challenging, as it ensures the reliable operation of underwater vehicles despite external threats such as water leakage and high pressure. This project focuses on designing a robust protection enclosure that provides high insulation and mechanical stability. Special attention was given to the sealing system, the layout and securing of internal components, and efficient cable management. A custom wiring solution was developed to minimize entanglement, facilitate internal organization, and simplify maintenance. Corrosion-resistant materials were selected to allow for quick manufacturing and practical deployment across various marine conditions.

Bibliography

- [1] **P. Van Rei.** (2005/2006). "Les Sous-Marins Autonomes".
- [2] **FORSSEA ROBOTICS.** "Smart ROV – Argos Standard Kit". (<https://forssea-robotics.fr/smart-rov#argos-standard-kit>). [Consulté le 10 mars 2025].
- [3] **Subsea Tech.** "Mini ROV Observer". (<https://www.subsea-tech.com/mini-rov-observer>). [Consulté le 11 mars 2025].
- [4] **Géomines.** (2024, 15 février). "Démonstration du ROV R7 – Exail Robotics". (<https://www.geomines.fr/demonstration-du-rovr7-exail-robotics>). [Consulté le 11 mars 2025].
- [5] **Kongsberg.** "Autonomous Underwater Vehicle – HUGIN Endurance". (<https://www.kongsberg.com/discovery/autonomous-and-uncrewed-solutions/auv/autonomous-underwater-vehicle-hugin-endurance>). [Consulté le 11 mars 2025].
- [6] **L3Harris.** "IVER4 580 Autonomous Underwater Vehicle". (<https://www.l3harris.com/all-capabilities/iver4-580>). [Consulté le 12 mars 2025].
- [7] **HII.** "REMUS Unmanned Underwater Vehicles (UUVs)". (<https://hii.com/what-we-do/capabilities/unmanned-systems/remus-uuv>s). [Consulté le 12 mars 2025].
- [8] **Ifremer.** "Ariane – Navire de la flotte océanographique française". (<https://www.ifremer.fr/fr/flotte-oceanographique-francaise/decouvrez-les-navires-de-la-flotte-oceanographique-francaise/ariane>). [Consulté le 12 mars 2025].
- [9] **Saab Group.** "The Double Eagle family". (<https://www.saab.com/products/double-eagle>). [Consulté le 15 mars 2025].
- [10] **Matériel.** (2024, 1 septembre). "Drones sous-marins : l'avenir de l'exploration sous-marine". *Sous la Mer*. (<https://www.sous-la-mer.com/drones-sous-marins-l-avenir-de-l-exploration-sous-marine-1147-article.html>). [Consulté le 15 mars 2025].
- [11] **Laurent.** (2023, 25 mai). "L'exploration des fonds sous-marins grâce aux drones". France Drone. (<https://france-drone.com/exploration-fonds-marins-drone>). [Consulté le 22 mars 2025].
- [12] **A. Ducarre.** (2024, 8 novembre). "Défense sous-marine : voici Marvel, un drone miniature autonome capable de scanner les fonds marins à la recherche de potentielles menaces". Science et Vie. (<https://www.science-et-vie.com/technos-et>

- futur/defense/defense-sous-marine-voici-marvel-un-drone-miniature-autonome-capable-de-scanner-les-fonds-marins-a-la-recherche-de-potentielles-menaces-183631.html). [Consulté le 22 mars 2025].
- [13] **A. E. A. Amorim.** (2015). "Comparison of different underwater vehicle communication/control modes". (<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1127.1122>).
- [14] **University of Hawaii at Manoa.** "Expo21XX". (https://www.expo21xx.com/automation21xx/16220_st3_university/default.htm). [Consulté le 24 mars 2025].
- [15] **Tuomall1999,** "Product Information: Underwater Drone". https://www.tuomall1999.co/?product_id=85904152_38. [Consulté le 24 mars 2025].
- [16] **I. Prashant, V. Sneha ... et al.** "System Design and Implementation of Matsya 2.0, a Technology Demonstrating Autonomous Underwater Vehicle". Indian Institute of Technology, Bombay. (<https://www.auv-iitb.org/images/TDRs/Matsya2.pdf>). [Consulté le 25 mars 2025].
- [17] **A. Amory et M. Erik.** (2018). "Modelling and CFD Simulation of a Micro Autonomous Underwater Vehicle SEMBIO". (<http://dx.doi.org/10.1109/OCEANS.2018.8604768>).
- [18] **F. R. Ali, M. H. Rabee, M. K. AbdulSattar et S. H. Omar.** (2024). "Underwater Robotics: Principles, Components, Modeling, and Control". *Al-Rafidain Engineering Journal*, 29(1), 154–176.
- [19] **J. Neira, C. Sequeiros, R. Huamani ...et al.** (2021). "Design and Development of a Low-Cost Autonomous Underwater Vehicle (AUV)." *Journal of Robotics*. (<https://doi.org/10.1155/2021/5542920>).
- [20] **Water Online.** (2017, 11 décembre). "Aquabotix Introduces Integra AUV/ROV for Underwater Missions." UUV Aquabotix Limited. (<https://www.wateronline.com/doc/aquabotix-introduces-integra-auv-rov-for-underwater-missions-0001>). [Consulté le 29 mars 2025].
- [21] **Blue Robotics.** "BlueROV2 – Affordable and Capable Underwater ROV." (<https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2>). [Consulté le 2 avril 2025].
- [22] **Blue Robotics.** "What is a Thruster?" (<https://bluerobotics.com/thruster-basics>). [Consulté le 2 avril 2025].

- [23] **C. Djedir.** (2020). "Étude et Commande d'un Robot Sous-Marin Semi-Autonyme." Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, Département d'Ingénierie des Systèmes Électriques.
- [24] **K. Hirata et K. Sakurai.** "Biomimetic propulsion test using PF-550 fish robot model." National Maritime Research Institute, Japan.
(https://www.nmri.go.jp/archives/eng/khirata/fish/experiment/pf550/index_e.html). [Consulté le 5 avril 2025].
- [25] **D. Perks,** (2020, 21 août). "Bluerov2 full test in deep water - 3 km - 2020" [Vidéo]. (<https://www.youtube.com/watch?v=pUba126uzvU>). [Consulté le 6 avril 2025].
- [26] **D. C. ROBERT et L. W. S. ROBERT.** (2007). *The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles*. Butterworth-Heinemann, Elsevier.
- [27] **NVIDIA Corporation.** « Jetson Xavier NX pour systèmes embarqués et Edge ». (<https://www.nvidia.com/fr-fr/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-xavier-nx/>). [Consulté le 7 avril 2025].
- [28] **Chasing Innovation.** "Projecteur pour Chasing M2 ROV". (<https://www.abot.fr/projecteur-pour-chasing-m2-rov-chasing-innovation-25428.html>). [Consulté le 10 avril 2025].
- [29] **Water Linked AS.** "Doppler Velocity Log (DVL)". (<https://waterlinked.com/dvl?hsLang=en&utm>). [Consulté le 10 avril 2025].
- [30] **Water Linked AS.** "Doppler Velocity Log (DVL)" . (https://waterlinked.com/3dsonar?utm_term). [Consulté le 10 avril 2025].
- [31] **M. Denis.** (2017, 10 juillet). "Cas désespéré : réparer un boîtier QFP gravement endommagé ?" Elektor Magazine. (<https://www.elektormagazine.fr/news/est-il-possible-de-reparer-un-tel-desastre>). [Consulté le 15 avril 2025].
- [32] **M. Ali Alshams.** "Water Effect on Electronics". (https://electricengg.com/water_effect/). [Consulté le 22 avril 2025].
- [33] **Greasley Electronics.** (2021, 14 août). "Water Damaged Circuit Boards". (<https://www.greasley.co.uk/water-damaged-circuit-boards-2/>). [Consulté le 22 avril 2025].
- [34] **LICHIFIT.** "Boîtier invisible pour Insta360 X3". (<https://www.amazon.com.be/LICHIFIT-Bo%C3%AEtier-invisible-Insta360->

- X3/dp/B0CL1Y1HGT). [Consulté le 22 avril 2025].
- [35] **LEAKA**. "Connecteur d'alimentation du robot sous-marin sous-marin". (<https://fr.kbs-connector.com/underwater-connector/micro-connectors/subsea-robot-power-connector-underwater.html>). [Consulté le 22 avril 2025].
- [36] **G. Moïso**. (2017). "Analyse Fonctionnelle - Méthodologies Appliquées". (<https://pressbooks.pub/methodes/chapter/analyse-fonctionnelle/>). [Consulté le 3 mai 2025].
- [37] **A. Fabien et T. Philippe**. (2010). "La démarche d'Analyse Fonctionnelle". chez *Analyse fonctionnelle – Guide pour le professeur*, Versailles, France.
- [38] **NPI Matériel Électrique**. "Quelle est la différence entre presse-étoupe ISO et PG?". (<https://www.npi-materiel-electrique.fr/quelle-difference-entre-presse-etoupe-iso-et-pg/>). [Consulté le 2 mai 2025].