



Date de rendu final : 16/05/25.

Table des matières

1	INTRODUCTION	4
2	MISE EN SITUATION.....	5
2.1	<i>OBJECTIF GENERAL DE L'ETUDE.....</i>	5
2.2	<i>NIVEAU DE L'ETUDE : AVANT-PROJET SOMMAIRE</i>	5
2.3	<i>PRESENTATION DES PARTIES PRENANTES.....</i>	5
2.4	<i>CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL FOURNI PAR LE COMMANDITAIRE</i>	6
2.5	<i>ENVIRONNEMENT DU PRODUIT A CONCEVOIR.....</i>	6
2.6	<i>PRODUITS CONCURRENTS.....</i>	8
2.7	<i>TRAVAUX DEJA REALISES SUR LE SUJET.....</i>	9
3	ORGANISATION DE L'AVANT-PROJET.....	10
3.1	<i>DEFINITION DE LA MATRICE SWOT.....</i>	10
3.2	<i>DEFINITION DU PLANNING PREVISIONNEL</i>	10
4	DEFINITION DE L'ENVIRONNEMENT DU PRODUIT.....	13
4.1	<i>PRODUITS CONCURRENTS.....</i>	13
4.1.1	<i>OpenROV.....</i>	13
4.1.2	<i>Ulyx.....</i>	13
4.1.3	<i>DEPTHX.....</i>	13
4.1.4	<i>REMUS.....</i>	13
4.1.5	<i>Forssea</i>	13
4.1.6	<i>Conclusion</i>	13
4.2	<i>BREVETS SUR LE PRODUIT.....</i>	14
4.2.1	<i>Méthodologie</i>	14
4.2.2	<i>Résultats.....</i>	15
4.2.3	<i>Conclusion</i>	16
4.3	<i>NORMES SUR LE PRODUIT.....</i>	16
4.4	<i>REGLEMENTATIONS ET LEGISLATIONS SUR LE PRODUIT.....</i>	17
4.5	<i>RESSOURCES LIBRES DE DROIT</i>	18
4.6	<i>ENVIRONNEMENT DU PRODUIT.....</i>	18
4.6.1	<i>Facteurs environnementaux influençant le drone sous-marin</i>	18
4.6.2	<i>Phases de vie du produit et impact environnemental.....</i>	19
4.6.3	<i>Public visé et utilisateurs potentiels du drone sous-marin scientifique</i>	21
4.6.4	<i>Conclusion</i>	22
5	DEFINITION DU PERIMETRE DU PRODUIT.....	23
5.1	<i>CONSOLIDATION DU CAHIER DES CHARGE FONCTIONNEL</i>	23

5.1.1	<i>Redéfinition de la fonction de service</i>	23
5.1.2	<i>Recherche de contraintes supplémentaires</i>	24
5.1.3	<i>Cahier des charges consolidé</i>	24
5.2	<i>DEFINITION DES EXCLUSIONS.....</i>	26
6	<i>CONCEPTION PRELIMINAIRE EN AVANT-PROJET</i>	28
6.1	<i>DETERMINATION DES SOLUTIONS ELEMENTAIRES</i>	28
6.1.1	<i>Détermination des fonctions techniques</i>	28
6.1.2	<i>Recherche de l'existant</i>	30
6.1.3	<i>Choix des solutions.....</i>	31
6.2	<i>DEFINITION DE L'ARCHITECTURE GENERALE.....</i>	34
6.3	<i>PREDIMENTONNEMENT DU COMPOSANT PRINCIPAL.....</i>	36
6.3.1	<i>Définition des méthodes de choix et de prédimensionnement (avec son modèle associé)</i>	36
6.3.2	<i>Recherche des données.....</i>	37
6.3.3	<i>Calcul de prédimensionnement.....</i>	37
6.3.4	<i>Conclusion</i>	37
7	<i>ORGANISATION DE LA SUITE DE L'AVANT-PROJET</i>	38
7.1	<i>OBJECTIF GENERAL DE LA NOUVELLE ETUDE.....</i>	38
7.2	<i>DEFINITION DES TACHES A EFFECTUER</i>	38
7.3	<i>DEFINITION DE LA MATRICE SWOT ET DES PLANS D'ACTIONS</i>	38
7.4	<i>DEFINITION DU PLANNING PREVISIONNEL</i>	42
8	<i>CONCLUSION.....</i>	44

Annexe 1 : Documents annexe

1 *Introduction*

L'exploration et l'exploitation des fonds marins représentent un enjeu majeur, ceci en raison de l'immensité des ressources encore inexplorées, tant sur le plan scientifique qu'économique. Les abysses recèlent une biodiversité unique, susceptible de fournir de nouvelles découvertes médicales et biotechnologiques. Par ailleurs, les fonds marins abritent des gisements de métaux rares essentiels à l'industrie technologique et énergétique. Enfin, avec l'essor des infrastructures offshore (éoliennes, câbles de communication sous-marins, plateformes pétrolières), leur surveillance et leur maintenance deviennent cruciales pour garantir leur durabilité et réduire les risques environnementaux.

L'objectif de cette étude est de concevoir un robot capable d'explorer les fonds marins et d'effectuer des interventions telles que la collecte de ressources. Cet avant-projet vise à répondre aux défis techniques liés aux environnements extrêmes sous-marins, notamment en matière de navigation et de communication.

Cette étude se situe au niveau de l'avant-projet sommaire. Ce travail permettra d'identifier les principaux défis techniques, d'estimer les coûts et dimensions des différentes solutions, et de déterminer la faisabilité globale du projet. Le commanditaire de l'opération est M. Salomon. De même, en tant qu'enseignant à l'ENSAM de Châlons, M. Salomon est le responsable du bureau d'étude, tandis que la maîtrise d'œuvre est constituée par l'équipe de conception en charge de ce rapport.

Une fois les composants principaux du système définis et les solutions technologiques sélectionnées en accord avec le cahier des charges, l'architecture générale et la structure du dispositif seront établies.

La date du rendu final du rapport a été convenue pour le jeudi 14 mai 2025.

2 Mise en situation

2.1 Objectif général de l'étude

L'objectif général de cette étude est donc la conception d'un robot d'exploration et d'exploitation de fonds sous-marin. Il se découpera en plusieurs sous-catégories telles que :

Le prédimensionnement des différents composants relatifs à la transmission de puissance du robot

La détermination des capteurs à utiliser pour répondre aux différentes exigences du cahier des charges

Le choix d'une solution pour que le robot puisse se mouvoir de la manière la plus fluide possible

2.2 Niveau de l'étude : avant-projet sommaire

Comme indiqué dans le titre, il y a trois niveaux d'étude différents : avant-projet sommaire, avant-projet détaillé et projet.

L'avant-projet sommaire se distingue par sa simplicité. En effet, le but est seulement de déterminer l'architecture du robot sans pour autant se soucier des potentiels coûts de fabrication. Il permet de rapidement mettre en lumière les difficultés qui seront rencontrées.

L'avant-projet détaillé est plus complet car il prend en compte la dimension financière. En ayant conscience du budget, les plans du robot seront plus réalistes.

Le projet est plus poussé car tout est attentivement regardé et optimisé. L'architecture ainsi que les prédimensionnements du système, sans oublier le processus de fabrication finale, sont soigneusement étudiés.

Du fait du temps alloué à cette conception ainsi que l'objectif général qui est de proposer une architecture globale, le niveau d'étude choisi est donc celui d'avant-projet sommaire.

2.3 Présentation des parties prenantes

Ce projet est conçu pour des entreprises consacrant une partie de leurs activités dans l'exploration sous-marine comme FORSSEA ou Abyssa ; des fondations et des associations telles que la fondation OCTOPUS qui dédie entièrement ses actions à la recherche sous-marine ou le GECC (Groupe d'Étude des Cétacés du Cotentin) qui étudie le comportement et l'environnement des cétacés.

Ce projet est mené par cinq étudiants :

COMBES Guilhem

PERRUCHON Thomas

ROUSSEAU JEREMY

TRIDENT Colin

MRANI Youssef

Enfin, ce projet est encadré par M. Salomon, commanditaire de cet avant-projet, responsable du BE en tant qu'enseignant à l'ENSA de Châlons-En-Champagne et expert dans les différents domaines. Les clients finaux de cet avant-projet sont les entreprises citées ci-dessus et celles possèdent un secteur d'activité lié aux fonctions de ce robot. L'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers fondée en 1780 par le duc de La Rochefoucauld-Liancourt est une école d'ingénieurs française aujourd'hui dirigée par Laurent Champaney. Avec plus de 6000 élèves issus de toutes les filières de prépa scientifiques (MP, PC, PSI, PT et TSI), une multitude de collaborateurs et de nombreux doubles diplômes comme l'École navale, l'École polytechnique ou l'AgroParisTech, cette école possède 11 instituts en France et un à Rabat, elle est reconnue comme l'une des plus prestigieuses écoles pour former ses élèves à devenir des ingénieurs généralistes dans le domaine industriel.



Figure 1 : Carte des campus de l'ENSA en France métropolitaine

Elle possède également de nombreux doubles diplômes à l'étranger sur tous les continents avec des grandes universités comme en Australie, au Maroc, au Canada, au Mexique ou en Chine.

De plus elle est mêlée à la « SOCE », la plus vieille association d'ancien élèves de France avec plus de 30.000 adhérents. Ses anciens élèves sont connues pour avoir créés ou développé des entreprises comme Sanofi, Safran et Schneider Electric.

2.4 Cahier des charges fonctionnel fourni par le commanditaire

Le cahier des charges fonctionnel du système fourni par le client est le suivant :

- Etanchéité sous l'eau
- Fonctionnel pendant 10 000h
- Résistants à la pression et la température
- Maintenance facile
- Capable de descendre à 200m de profondeur
- Taille réduite (maximum 50cm de longueur)
- Qualité de vidéo satisfaisante
- Ne pas perturber l'écosystème marin
- Autonomie de 8h
- Capable de se déplacer malgré les courants
- Piloté avec un retard inférieur à 0,5s
- Récupérer un échantillon d'eau
- Capable de cartographier les fonds marins

2.5 Environnement du produit à concevoir

Le robot d'exploration et d'exploitation sous-marine sera donc en fonctionnement dans l'eau, et précisément dans une eau salée puisqu'il sera conçu pour explorer le fond des océans. L'eau peut être claire et translucide mais elle peut également être chargée en sédiments si le robot est dans une zone touchée par des courants marins ou des conditions météorologiques complexes. De plus, en fonction de la météo ou de la période de la journée où le robot est en utilisation, la luminosité peut varier d'un éclairement suffisant pour ne pas nécessiter de lampe au noir complet.

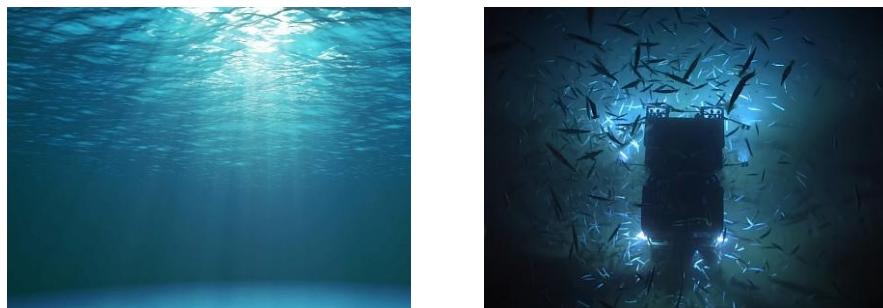


Figure 2 : Fonds marins sous différentes luminosités

Le robot doit également effectuer une cartographie des fonds marins, c'est-à-dire qu'il doit faire une carte des reliefs des fonds. Le robot sera donc confronté à différentes surfaces comme du sable ou des rochers, mais également à des végétaux mouvant comme des algues voir des animaux comme des coraux. Il devra analyser des différences d'altitude brusques qui, en fonction de son mode de déplacement, pourront peut-être perturber son déplacement et la prise des mesures.



Figure 3 : Falaise sous-marine

La flore n'est pas le seul obstacle que le robot va rencontrer. En effet, le robot va se déplacer et opérer au milieu de la faune locale, et il est évident qu'il faut éviter de blesser et tuer les êtres vivants qui composent l'écosystème que le robot va analyser. Etant donné la profondeur d'opération du robot, il peut rencontrer des animaux de toute taille et de tout genre, comme des bancs de poissons et des crustacés, mais également des prédateurs comme des requins, orques, cachalots ou des êtres immenses comme des baleines.

Certains animaux pourraient attaquer le robot pensant qu'il peut être mangé ou pour se défendre et ainsi l'endommager. D'autre - comme des pieuvres, calamar ou sèches - pourraient, toujours dans une mécanique de défense, libérer de l'encre et obstruer la caméra ou la lampe du robot, mettant ainsi en péril la mission de filmer les fonds, mais également le déplacement commandé à distance.



Figure 4 : Sèche libérant de l'encre

2.6 *Produits concurrents*

Dans le domaine des robots télécommandés sous-marins capables de plonger jusqu'à 200 mètres, plusieurs acteurs proposent des solutions innovantes. L'analyse des produits concurrents permet d'identifier les forces et faiblesses de chaque solution afin de positionner notre projet de manière stratégique et d'établir une matrice SWOT.

Nous avons regroupé les informations sur 3 produits concurrents : les robots sous-marins BlueROV2, Chasing M2 Pro et Deep Trekker DTG3 dont des photos sont proposées en figures 5, 6 et 7. Ces 3 robots se rapprochent de l'utilisation désirée de notre produit dans leur profondeur maximale et type d'utilisation.



Figure 5 : BlueROV2



Figure 6 : Chasing M2 Pro



Figure 7 : Deep Trekker DTG3

Produit	Profondeur maximale	Type	Points forts	Points faibles
BlueROV2	300m	Télécommandé	Abordable, déploiement facile, modulable	Portée du câble, autonomie, IA
Chasing M2 Pro	200m	Télécommandé	Maniable, caméra 4K, compact	Autonomie, portée du câble
Deep Trekker DTG3	200m	Télécommandé	Robuste, caméra HD, utilisation simple	Vitesse limitée, coût

Les liens permettant d'accéder aux fiches techniques de chaque robot sont en annexe 2.

2.7 Travaux déjà réalisés sur le sujet

Notre avant-projet aborde une thématique liée à un avant-projet de l'année dernière servant ainsi de base de réflexion et d'exploration préliminaire. Il consiste en un robot détecteur et réparateur de coque de bateau. Le système se déplace donc également dans un milieu marin et utilise des appareils de détection de reliefs, appareils qui peuvent être similaires à ceux qui seront abordés dans cet avant-projet pour effectuer la cartographie des fonds marins. Ce robot doit également se déplacer sous l'eau tout en résistant aux forces de courant puisqu'il peut être utilisé quand le bateau se déplace en mer.

Un travail a donc été réalisé sur un robot sous-marin, mais ce dernier avait pour objectif d'être autonome contrairement au robot dont cet avant-projet va faire l'étude et l'utilisation prévue est très différente.

3 Organisation de l'avant-projet

3.1 Définition de la matrice SWOT

La matrice SWOT (pour Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) a pour but d'identifier d'une part les forces et les faiblesses et d'autre part les opportunités et les menaces de notre projet. Elle est réalisée à partir du cahier des charges fonctionnel et des connaissances des membres participant à cet avant-projet. Son but est d'identifier les éléments les plus cruciaux pour la phase d'avant-projet sans entrer dans les détails.

Chaque élément est pondéré de 0 à 10, 10 étant le niveau le plus important.

La matrice SWOT de cet avant-projet est donnée ci-dessous en figure 8.

FORCES	Pondération de 1 à 10	FAIBLESSES	Pondération de 1 à 10
Item		Item	
Communication interne	10	Difficulté d'expérimentation	10
Autonomie (liberté totale sur la direction)	8	Manque d'expertise dans certains domaines	8
Produit polyvalent	4	Planning peu maîtrisé	7
Cout réduit	3	Connaissances réduites du sujet	5
		Manque de moyens techniques et financiers	4
OPPORTUNITES	Pondération de 1 à 10	MENACES	Pondération de 1 à 10
Item		Item	
Innovation dans la robotique sous-marine	10	Contrainte réglementaires liées à l'exploitation sous-marine	10
Utilisation scientifique	8	Courants sous-marins	8
Intérêt industriel pour la maintenance d'infrastructure offshore	6	Usure prématuée due aux conditions extrêmes	6
IA et capteurs dans le domaine sous-marin	4	Concurrence importante	6
Demande croissante pour l'exploration sous-marine	2	Perturbation de la faune	1

Figure 8 : Matrice SWOT

On établit un bref plan d'action pour chaque élément le plus critique.

Pour maximiser la communication interne dans notre projet de drone sous-marin scientifique, il est essentiel de faire des réunions régulières et structurées facilitant l'échange d'idées et la résolution rapide des problèmes. La transparence et l'écoute active renforce la cohésion de l'équipe.

Pour minimiser la difficulté d'expérimentation, l'utilisation de modèles et de simulations numériques peuvent aider au développement des prototypes qui ne pourront faire l'objet de tests réels que plus rarement.

Pour maximiser l'innovation sous-marine dans une démarche scolaire, il est possible de contacter des experts et des entreprises spécialisées dans la robotique sous-marine afin de discuter d'autres possibilités avec le robot.

Pour minimiser les contraintes réglementaires liées à l'exploitation sous-marine, organiser des sessions d'information sur les normes existantes dès le début du projet. Organisez des rencontres avec des experts pour adapter nos travaux aux normes en vigueur.

3.2 Définition du planning prévisionnel

Le planning prévisionnel de l'avant-projet est réalisé sous la forme d'un diagramme de Gantt. Ce planning ne prend en compte que les étapes qui compose l'avant-projet. A chaque tâche est associé une charge de travail en heure par personne, et les séances prévues dans l'emploi du temps n'apparaissent pas dans ce planning.

Les jalons clés sont représentés par des losanges rouges positionnés en fin de tâche. Ils correspondent au rendu des livrables à faire valider par les parties prenantes.

Les responsables désignés sur ce planning ont pour rôle de suivre l'avancement de la tâche à laquelle ils sont assignés et de faire un rapport lors de la revue de projet. Comme convenu avec M. Orsini, les tâches pour

lesquelles le travail n'a pas encore été réparti n'ont pas de responsables. Il est donc écrit « Equipe entière » dans la colonne des responsables, chose qui sera modifiée au cours de l'avancement de l'avant-projet.

Le planning prévisionnel est donné en figure 9 à la page suivante, mais est également accessible via un lien en annexe 2 à cause de la taille de ce dernier.

PLANNING AVANT-PROJET			CHARGE DE TRAVAIL (en heure par homme)	RESPONSABLE	Dates (Semaines)														
MACRO-TACHES		TACHES			6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Organisation de l'avant-projet	Répartition des rôles et responsabilités			1 Jérémie															
	matrice de SWOT			2 Youssef															
Définition de l'environnement	définition du planning prévisionnel			2 Guilhem															
	produits / services concurrents			1 Thomas															
	brevets sur le produit / service			2 Jeremy															
	normes sur le produit / service			2 Colin															
	environnement physique du produit / service			2 Jeremy															
	ressources libres de droit			2 Youssef															
Définition du périmètre	cahier des charges fonctionnel			2 Colin															
	composants principaux du produit	Elaboration du FAST		3 Guilhem															
	exclusions			1 Thomas															
Conception préliminaire	determination des solutions elementaires	Détermination des fonctions techniques/ Etats de l'Art		3 Guilhem															
	definition de l'architecture generale			3 Colin															
	determination des efforts, des vitesses et/ou des puissances	Définition de la méthode / formulation d'hypothèses / Application de la méthode		4 Jeremy															
	définition de la structure			4 Thomas															
	définition de l'architecture avec toutes les pièces			4 Youssef															
	prédimensionnement et choix des composants	Utilisation de logiciels de simulation numérique		4 Jeremy															
	prédimensionnement de la structure	Définition de la méthode / formulation d'hypothèses / calcul de prédimensionne		4 Colin															
	Contact avec un expert	Résoudre les problèmes identifiés dans la matrice SWOT		4 Thomas															
Synthèse avant-projet / Initialisation projet	nouvelle matrice de swot			2 Youssef															
	planning du projet complet			2 Guilhem															

Figure 9 : Planning prévisionnel de l'avant-projet

4 Définition de l'environnement du produit

4.1 Produits concurrents

Dans le domaine des drones sous-marins, plusieurs entités, allant de startups innovantes à des organisations établies, développent des produits et services similaires à notre projet. Voici une présentation de quelques-uns de ces acteurs.

4.1.1 OpenROV

OpenROV est un projet open-source initié par Eric Stackpole et David Lang, visant à démocratiser l'exploration sous-marine. Leur drone, facilement transportable et assemblable, est conçu pour fonctionner en eau douce, saumâtre ou salée. Il est destiné à des applications scientifiques, éducatives et de découverte du monde subaquatique. La communauté OpenROV compte des membres dans plus de 30 pays, contribuant ainsi à l'exploration sous-marine à l'échelle mondiale.

4.1.2 Ulyx

Développé par l'Ifremer, Ulyx est un drone sous-marin conçu pour explorer les grands fonds marins. Il a récemment atteint une profondeur de plus de 5 900 mètres lors de ses essais. Ce véhicule autonome est équipé de capteurs avancés pour la collecte de données océanographiques, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des écosystèmes profonds.

4.1.3 DEPTHX

Le "Deep Phreatic Thermal Explorer" (DEPTHX) est un véhicule sous-marin autonome développé par la NASA. Mesurant plus de 2 mètres et pesant plus d'une tonne, il a été conçu pour explorer et cartographier de manière autonome les gouffres sous-marins karstiques au nord du Mexique. DEPTHX a également collecté des échantillons d'eau et de sédiments, menant à la découverte de nouveaux groupes de bactéries.

4.1.4 REMUS

La série REMUS (Remote Environmental Monitoring Units) comprend plusieurs modèles de drones sous-marins utilisés pour diverses applications scientifiques. Par exemple, le REMUS 6000 peut plonger jusqu'à 6 000 mètres de profondeur, permettant la collecte de données détaillées sur les fonds marins. Ces drones sont utilisés pour des missions telles que la cartographie océanographique, la surveillance environnementale et la recherche scientifique.

4.1.5 Forssea

Forssea Robotics propose des sous-marins robotisés dédiés aux énergies marines renouvelables (EMR) et à l'exploration scientifique. Leurs drones sont utilisés pour l'inspection, le contrôle visuel et les mesures non destructives en milieu sous-marin, contribuant ainsi à la maintenance des infrastructures marines et à la collecte de données scientifiques.

4.1.6 Conclusion

L'analyse des drones sous-marins scientifiques existants met en lumière plusieurs éléments clés dont nous pouvons nous inspirer. **L'autonomie et la résistance en grande profondeur** (Ulyx, REMUS 6000) soulignent l'importance des matériaux et de la gestion énergétique. **L'intégration de capteurs avancés** (DEPTHX) est essentielle pour la cartographie et l'analyse des écosystèmes. **L'ergonomie et la téléopération en temps réel** (Ocean One K, Forssea) montrent l'intérêt d'un contrôle intuitif et d'une transmission efficace des données.

Ces technologies, adaptées à des applications variées comme la **surveillance environnementale**, **l'archéologie ou l'étude des écosystèmes**, guideront le développement de notre drone sous-marin. L'objectif sera d'optimiser **autonomie, précision et facilité d'exploitation** pour répondre aux besoins scientifiques avec une efficacité maximale.

4.2 Brevets sur le produit

Nous décrivons dans un premier temps la méthodologie de recherche des brevets, puis nous citerons les plus pertinents que nous avons trouvé.

4.2.1 Méthodologie

4.2.1.1 Définition du sujet et choix des mots-clés

Avant de commencer la recherche, nous avons précisé le sujet en identifiant **les technologies clés** associées aux drones sous-marins :

- **Systèmes de propulsion sous-marine**
- **Navigation autonome**
- **Capteurs embarqués et communication sous l'eau**
- **Gestion de l'énergie et batteries pour environnement sous-marin**
- **Applications militaires, scientifiques et industrielles**

Ensuite, nous avons listé les **mots-clés techniques** en français et en anglais pour maximiser les résultats :

- Drone sous-marin → *Underwater drone, Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*
- Propulsion sous-marine → *Underwater propulsion, thruster system*
- Navigation autonome → *Autonomous navigation, AI guidance system*
- Capteurs → *Underwater sensors, sonar, lidar*
- Communication → *Underwater communication, acoustic signaling*

4.2.1.2 Recherche dans les bases de données de brevets

Nous avons ensuite interrogé différentes bases de données pour collecter des brevets :

- **Espacenet (OEB - Office Européen des Brevets)** : Base publique regroupant des brevets internationaux.
- **Google Patents** : Permet une recherche large avec des documents de brevets américains, européens et asiatiques.
- **WIPO (Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle)** : Pour les brevets déposés à l'échelle mondiale.

Exemples de requêtes utilisées :

- "underwater drone" AND "autonomous navigation"
- "AUV" AND ("propulsion" OR "thruster")
- "underwater sensor" AND ("acoustic communication" OR "sonar")

Ces requêtes permettent de cibler des brevets spécifiques et de repérer les tendances dans le domaine.

4.2.1.3 Affinement des résultats et analyse des brevets

Après avoir obtenu des résultats, nous avons appliqué plusieurs **filtres pour affiner la recherche** :

- **Limiter par date** : Priorité aux brevets récents (2015-2025).
- **Sélectionner les brevets actifs** : Éviter ceux qui sont expirés ou abandonnés.

- **Filtrer par domaine technologique** : Ingénierie maritime, et robotique autonome, intelligence artificielle.

Lecture des brevets sélectionnés

Chaque brevet comprend plusieurs sections importantes :

1. **Le titre et le résumé** : Permet de vérifier rapidement la pertinence du brevet.
2. **L'abstract** : Indiquent succinctement le contenu du brevet.
3. **Les dessins techniques** : Donnent une meilleure compréhension des mécanismes internes.
4. **Les citations** : Révèlent d'autres brevets en relation avec la technologie étudiée.

4.2.2 Résultats

Nous regrouperons dans cette partie les résultats de nos recherches bibliographiques concernant les brevets.

4.2.2.1 Brevet numéro 1

Craig Thomas ANDERSON and Benjamin MARTIN KING for REMOTE OPERATED VEHICLES AND/OR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES. Brevet CA3096244A1. 2019/10/10

Cette invention concerne les **véhicules sous-marins télécommandés (ROV)** et **autonomes (AUV)**. Les ROV sont reliés à une unité de contrôle en surface par un **câble ombilical** servant à la transmission des commandes et des données, tandis que les AUV sont totalement autonomes, équipés de leur propre source d'énergie et programmés pour accomplir une mission.

Un problème courant des **ROV** et **AUV** est la **remise en suspension des sédiments**, causée par la poussée des propulseurs et les turbulences, ce qui réduit la visibilité et impacte les mesures et prélèvements. L'objectif de l'invention est donc d'améliorer ces véhicules ou d'offrir une alternative plus efficace à l'industrie.

4.2.2.2 Brevet numéro 2

Ehud ERELL and Amit FARBER for UNDERWATER SYSTEM AND METHOD. Brevet AU2014330808B2. 2014/09/29

Ce système sous-marin autonome comprend un **véhicule principal (AMUV)** et un ou plusieurs **véhicules auxiliaires (UUV)**. L'AMUV **recherche et détecte des objets sous-marins**, génère des **informations** pour identifier un **objet d'intérêt (001)**, puis **transporte un UUV** à proximité de cet objet. L'UUV **interagit avec l'objet**, et le système transmet des **données de vérification** via un **module de communication**.

4.2.2.3 Brevet numéro 3

Rustom Friedrich JEHANGIR and Joseph Anthony SPADOLA for Submersible electric thruster. Brevet WO2018070527A1. 05 /11/2015

L'invention est un **propulseur électrique submersible** conçu pour propulser des véhicules sous-marins, de surface et amphibiens. Il est composé d'un **stator fixe**, autour duquel tourne un **rotor externe équipé d'aimants permanents**. Une **hélice solidaire du rotor** génère la propulsion, tandis qu'une **buse annulaire** canalise le flux d'eau pour optimiser l'efficacité. L'ensemble est complété par un **cône avant et un cône arrière**, ainsi que des **bras de soutien** assurant la stabilité de la structure. Ce système permet une **propulsion efficace et adaptée aux environnements aquatiques**.

4.2.2.4 Brevet numéro 4

Tetsuya MIWA, Dhugal LINDSAY, Masafumi SHIMOTASHIRO, Hiroshi TAKASHI, Atsushi ARAI for Connectedly-formed underwater exploration device. Brevet EP3676171A1. 2018/12/10.

L'invention concerne un **dispositif d'exploration sous-marine** conçu pour des **études d'impact écologique** en capturant et surveillant des images sur de longues périodes. Il est particulièrement adapté aux **évaluations environnementales sous-marines** et aux **analyses des fonds marins**.

Ce système est une **structure connectée pour l'exploration en grande profondeur**, optimisée pour **prolonger l'autonomie de la batterie** et permettant une **capture vidéo omnidirectionnelle à 360°**, ainsi que diverses **mesures scientifiques**.

Inspiré du système "**Edokko-1**", il repose sur une conception en **chute libre**, avec trois **sphères creuses en verre transparent et résistant à la pression**, disposées en série pour une exploration efficace des grandes profondeurs.

4.2.3 Conclusion

Nous avons identifié des brevets portant sur des **robots et drones sous-marins complets**, mais aucun ne détaillait spécifiquement des **composants ou solutions techniques précises**. Cela nous empêche d'évaluer directement des alternatives techniques, mais nous permet néanmoins d'analyser **l'environnement concurrentiel extérieur global** de notre produit.

4.3 Normes sur le produit

Cette sous-partie a pour but de rechercher les normes que notre robot doit respecter afin de pouvoir être développé commercialiser. Cette recherche a cependant de multiples objectifs tels que réduire les coûts de fabrication, améliorer la fiabilité ainsi que l'efficacité du robot et respecter l'environnement fragile dans lequel le robot est amené à évoluer.

La recherche des normes a été effectuée en accord avec le cahier des charges fonctionnel défini précédemment. C'est grâce aux mots-clés « robot sous-marin et environnement » que nous avons trouvé les normes suivantes :

AFNOR. Lignes directrices pour l'échantillonnage quantitatif et le traitement d'échantillons de la macrofaune marine des fonds meubles. NF EN ISO 16665.AFNOR : 2014, 41 p.

Cette norme nous permet de savoir comment prélever les échantillons dans l'eau et au sol afin de ne pas endommager les fonds marins.

AFNOR. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. NF EN ISO 14040. AFNOR : 2006, 33 p.

Cette norme définit le cadre de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé sur l'ensemble de son cycle de vie.

AFNOR. Moteurs marins de propulsion alternatifs à combustion interne - Mesurage et déclaration de la puissance. NF EN ISO 8665. AFNOR : 2017, 14 p.

La norme NF EN ISO 8665 spécifie les méthodes de mesure de la puissance effective des moteurs marins à combustion interne, assurant des performances fiables et comparables.

La norme XP T90-719 définit les exigences pour l'échantillonnage et l'analyse des microplastiques laissé dans l'eau par certains matériaux, afin d'évaluer la pollution et son impact environnemental.

C'est grâce aux différentes normes citées ci-dessus que nous pouvons pour le mieux saisir les problématiques posées afin d'y répondre le mieux possible. Les normes 1,2 et 4 nous permettent de mieux appréhender l'environnement futur du robot tandis que la troisième norme nous aide à améliorer le robot en lui-même.

4.4 Réglementations et législations sur le produit

Nous allons ici recenser les différentes législations qui s'appliquent à l'utilisation d'un robot sous-marin d'exploration, appelés par la loi drones sous-marins.

La loi n°81-1135 du 23 décembre 1981 sur l'exploration et l'exploitation des ressources minérales des grands fonds marins indique que les activités de prospection, d'exploration et d'exploitation ne sont possibles que si la personne morale ou physique exerçant cette activité est dotée d'un **permis adéquat** (article 3). Les articles 9 et 14 indiquent que si les utilisateurs ne **respectent pas les obligations** concernant la protection du milieu marin, la conservation des gisements et la protection des biens et des personnes, ce **permis peut leur être retiré**.

Le **code des transports** est un texte réglementaire très complet dont certaines parties concernent le type de véhicule dont cet avant-projet fait l'objet.

L'**article D5111** porte sur le nom que doivent porter les robots sous-marins : leur **numéro d'enregistrement précédé des lettres « DRN »** écrit sur une **plaquette inaltérable**.

L'**article L5112-1** précise cette notion d'immatriculation : chaque drone sous-marin sous pavillon français doit être immatriculé et cette immatriculation donne lieu à l'établissement d'un **certificat d'immatriculation** qui doit toujours rester à bord du navire de lancement du drone.

L'**article L5241-2-1 A** stipule que toutes les **règles d'entretien** et d'exploitation destinées à assurer la **sécurité et la sûreté de la navigation** des drones ainsi que la **prévention de la pollution** et leur système de **localisation** devant fonctionner en permanence sont fixées par voies réglementaires. Si ces règles ne sont pas respectées, le drone peut être **immobilisé jusqu'à remplir ces exigences**.

L'**article L5242-1 A** indique que toutes les sanctions prévues s'appliqueront au capitaine du drone sous-marin, à l'opérateur, au propriétaire ou à l'exploitant.

L'**article L5263** chiffre les sanctions prévues pour tout type d'infractions.

Enfin, l'**article L5271-2** précise qu'un **permis de conduite en mer** et le suivi d'une **formation spécifique** à la conduite en mer d'un drone maritime correspondant à la catégorie et à l'usage du drone en cause est obligatoire.

Le **code des douane** fournit 2 articles intéressants dans le cadre de notre avant-projet. L'**article 218** indique que chaque véhicule doit avoir à son bord un acte de francisation, sauf si leur puissance est inférieure à 90kW. L'**article 232** indique quant à lui l'obligation pour tous les véhicules français d'avoir à leur bord un congé délivré par le service des douanes du port d'attache. Néanmoins, étant donné que le drone n'a pas obligatoirement de port d'attache, cet article peut être superflu.

L'utilisation des drones sous-marins en France est donc **encadrée par plusieurs textes législatifs** visant à garantir leur **sécurité**, leur **traçabilité** et leur **conformité** aux réglementations maritimes et environnementales. L'obtention d'un **permis, l'immatriculation** obligatoire, le respect des normes d'exploitation et **d'entretien** ainsi

que la responsabilité des exploitants sont autant d'exigences imposées par la loi. Ces réglementations assurent une utilisation maîtrisée de ces dispositifs tout en préservant les **écosystèmes marins** et en encadrant l'exploitation des ressources des grands fonds.

4.5 Ressources libres de droit

Dans le cadre de cet avant-projet, une recherche a été menée afin d'identifier des ressources sous licence libre pouvant être utilisées pour le développement et la fabrication de prototypes, notamment au sein du fablab. L'objectif était de recenser des éléments tels que des logiciels open-source ou des composants matériels pouvant être intégrés ou adaptés à notre projet.

L'exploration de plateformes open-source et de communautés dédiées à la robotique sous-marine a permis d'identifier plusieurs initiatives notables, comme OpenROV, KOSMOS et Aquadrone. Bien que ces projets soient effectivement sous licence libre, ils s'inscrivent dans une échelle de développement dépassant largement le cadre d'une maquette réalisable en fablab. Leur reproduction ou leur adaptation nécessiterait un investissement conséquent en temps et en ressources, ce qui les rend difficilement exploitables pour notre avant-projet.

Par ailleurs, la plupart des autres solutions existantes sont soit protégées par des licences restrictives, soit trop éloignées des spécificités de notre projet pour être utilisées sans modifications majeures.

Ainsi, il sera nécessaire d'envisager une conception sur mesure afin de répondre aux besoins définis, tout en restant attentifs à d'éventuelles ressources pertinentes qui pourraient émerger au fil du développement.

4.6 Environnement du produit

Avant de présenter l'ensemble des éléments en lien avec notre produit, il convient d'indiquer que certaines informations peuvent avoir déjà été évoquées dans le chapitre 2 (Mise en situation). Cependant, afin de faciliter la compréhension et la lecture de ce document, nous les regroupons ici pour offrir une vision d'ensemble cohérente.

Le drone sous-marin scientifique évolue dans un environnement complexe et multifactoriel, comprenant des éléments physiques, biologiques et humains, qui influencent son conception, fonctionnement, maintenance et fin de vie.

4.6.1 Facteurs environnementaux influençant le drone sous-marin

4.6.1.1 Milieu sous-marin

Le drone opère dans des conditions extrêmes qui influencent directement ses performances :

- **Pression hydrostatique** : Augmente avec la profondeur, nécessitant des matériaux résistants.
- **Température de l'eau** : Affecte l'efficacité des capteurs et la consommation d'énergie.
- **Salinité** : Impacte la densité de l'eau et la corrosion des composants.
- **Visibilité sédiments** : Réduit la visibilité et complique l'usage des capteurs optiques.
- **Faune et flore marines** : Risques d'interactions non désirées avec la biodiversité (algues coincées dans les hélices si il y en a).

4.6.1.2 Facteurs mécaniques et infrastructures

Le drone, ayant un coût assez conséquent et possédant des données maritimes importantes, le perdre est un risque dont il faut se prémunir :

- **Navires de déploiement et de récupération** : Interaction nécessaire pour le lancement et la récupération.

- **Stations de recharge et balises de communication** : Possibles structures fixes ou mobiles pour la transmission de données et l'alimentation en énergie.

4.6.1.3 Conditions extérieures et transport

Le drone, ayant un coût assez conséquent, aura besoin de précautions supplémentaires pour le stockage et le transport :

- **Climat et température ambiante** : Affects les conditions de stockage et le transport.
- **Moyens logistiques** : Transport sécurisé pour éviter les chocs et les vibrations.

4.6.2 Phases de vie du produit et impact environnemental

Chaque phase de vie du drone nécessite une prise en compte spécifique, nous en listons ici les principales.

10. Conception et Développement

11. Définition des besoins scientifiques – Identification des objectifs (cartographie des fonds marins, observation biologique, surveillance environnementale...).

12. Conception technique – Élaboration des spécifications (matériaux, capteurs, autonomie, communication, intelligence embarquée).

13. Fabrication du prototype – Assemblage du drone avec tous ses composants (moteurs, caméras, capteurs, batteries, systèmes de communication).

14. Tests en laboratoire – Vérification des performances (étanchéité, propulsion, autonomie énergétique, fiabilité des capteurs).

15. Tests de réception et validation – Essais en bassin de test ou en environnement contrôlé pour valider la conformité du drone avant son utilisation sur le terrain.

2. Préparation avant la mission

21. Planification de la mission – Définition des objectifs précis, sélection du site d'exploration, conditions environnementales et durée de mission.

22. Préparation et configuration du drone – Vérification de l'état général, calibration des capteurs, programmation de la trajectoire et des tâches.

23. Simulation de mission – Tests de navigation et de communication pour valider les protocoles avant la mise en œuvre sur le terrain.

3. Déploiement sur le terrain

31. Transport vers le site d'exploration – Acheminement du drone jusqu'au point de lancement (navire, plateforme côtière, sous-marin...).

31. Mise à l'eau et vérifications finales – Largage du drone et derniers contrôles (connexion, batteries, calibration des instruments).

4. Mission sous-marine

41. Descente vers la zone d'exploration – Navigation jusqu'à la profondeur cible en fonction des objectifs de la mission.

42. Phase d'exploration et collecte de données – Utilisation des capteurs pour l'acquisition d'images, mesures environnementales et autres relevés scientifiques.

43. Collecte d'échantillons (si applicable) – Prélèvement de sédiments, d'eau ou d'organismes si le drone est équipé d'un bras robotique.

44. Transmission des données (si possible) – Envoi de données en temps réel via liaison acoustique ou satellite selon les capacités du drone.

Cette phase de vie étant à notre sens **la plus compliquée** (du fait de la profondeur du drone), nous avons décidé **d'en détailler le fonctionnement**.

441. Acquisition et prétraitement des données – Collecte des mesures environnementales, images et autres informations par les capteurs embarqués. Filtrage et compression pour réduire la taille des données à transmettre.

442. Encodage et préparation de la transmission – Transformation des données en signaux adaptés aux protocoles de communication sous-marins (acoustique, optique ou satellite). Gestion des priorités pour optimiser la bande passante.

443. Émission des données – Envoi des informations via liaison acoustique en profondeur, ou transmission satellite lorsque le drone est en surface. Adaptation du débit en fonction des conditions du milieu.

444. Réception et validation des transmissions – Confirmation de la réception des données par la station de contrôle, correction d'éventuelles erreurs et retransmission si nécessaire.

445. Stockage temporaire et synchronisation différée – Si la transmission échoue ou est partielle, stockage sécurisé des données pour un envoi ultérieur ou récupération après la mission.

45. Adaptation en temps réel – Réajustement de la trajectoire et des actions en fonction des obstacles ou nouvelles découvertes.

50. Fin de mission et récupération

51. Remontée à la surface – Exécution d'un retour programmé ou manuel vers un point de récupération.

52. Récupération du drone – Récupération à bord du navire ou sur une plateforme de récupération.

53. Vérification post-mission – Inspection rapide des composants critiques et sauvegarde initiale des données collectées.

60. Analyse et maintenance

61. Extraction et analyse des données – Transfert, traitement et analyse scientifique des informations recueillies.

62. Maintenance et diagnostic – Nettoyage du drone, recharge des batteries, test des capteurs, vérification des composants mécaniques et électroniques.

63. Réparation ou mise à jour logicielle – Remplacement des pièces usées, mise à jour du firmware, amélioration des algorithmes de navigation.

64. Stockage ou préparation pour une nouvelle mission – Mise en sécurité du drone ou reconfiguration pour la prochaine expédition.

70. Fin de vie et recyclage

71. Évaluation de l'obsolescence – Analyse de la performance après plusieurs missions pour déterminer si le drone est encore fonctionnel.

72. Réaffectation ou rétrofit – Si possible, modernisation du drone avec de nouveaux composants ou réorientation vers des missions moins exigeantes.

73. Démantèlement ou recyclage – Retrait des composants réutilisables, recyclage des matériaux ou mise au rebut sécurisée si nécessaire.

74. Transmission des enseignements – Retour d'expérience pour améliorer les futurs modèles et optimiser les processus de mission.

4.6.3 Public visé et utilisateurs potentiels du drone sous-marin scientifique

4.6.3.1 Universités et centres de recherche en ingénierie marine

Les universités et les centres de recherche constituent une cible stratégique. Les utilisateurs incluent des **étudiants en master et doctorat (22-30 ans)** ainsi que des **enseignants-chercheurs** spécialisés en ingénierie sous-marine et en robotique autonome. Leur situation familiale est souvent flexible, surtout pour les étudiants, qui peuvent participer à des expéditions en mer de longue durée. Ces utilisateurs bénéficient généralement de **financements universitaires ou industriels**, avec des budgets parfois limités nécessitant une **solution évolutive et abordable**.

Leur principal besoin repose sur la **modularité et la programmabilité du drone** afin d'intégrer de nouveaux capteurs et développer des algorithmes d'analyse avancés. Ils attendent une **interface accessible** permettant des interactions facilitées avec des logiciels scientifiques comme Python, MATLAB ou ROS (Robot Operating System). Sensoriellement, ils privilégient des outils fournissant des **données acoustiques et visuelles détaillées**, leur permettant de traiter des modèles numériques des fonds marins.

4.6.3.2 Organismes environnementaux et ONG de préservation marine

Les organisations environnementales et les ONG, telles que Greenpeace ou Sea Shepherd, s'intéressent à l'utilisation des drones sous-marins pour la surveillance et la préservation des écosystèmes marins. Le personnel impliqué regroupe des **écologistes, des spécialistes en biodiversité marine et des analystes de données environnementales**, principalement âgés de **25 à 60 ans**. Leur situation économique repose sur des **financements privés, des subventions ou des dons**, ce qui nécessite un équipement offrant **une grande autonomie et une maintenance limitée** pour réduire les coûts d'exploitation.

Les motivations principales de ces utilisateurs sont d'**évaluer l'impact du changement climatique sur les océans, de surveiller la pollution maritime et de protéger les espèces menacées**. Ils recherchent un drone **éco-responsable**, conçu avec des matériaux recyclables et disposant d'un **faible impact sonore** pour minimiser la perturbation des écosystèmes. La capacité à **transmettre des données en temps réel** est un élément clé, facilitant les interventions rapides. Leur perception sensorielle repose fortement sur **la vue**, avec un besoin d'images et de vidéos haute résolution pour analyser l'état des habitats marins.

4.6.3.3 Entreprises d'exploitation sous-marine et énergies offshore

Les entreprises spécialisées dans l'exploitation sous-marine, notamment dans les secteurs du pétrole, du gaz et des énergies renouvelables, constituent une cible industrielle importante. Le personnel concerné est principalement constitué **d'ingénieurs et de techniciens (30-55 ans)**, travaillant sur **l'inspection et la maintenance des infrastructures sous-marines** telles que les **câbles, pipelines et plateformes offshore**. Ces utilisateurs sont souvent en **déplacement** et effectuent des missions en mer prolongées, ce qui exige un équipement extrêmement **robuste et fiable**.

Ces entreprises disposent d'un **budget conséquent**, leur permettant d'investir dans des solutions **performantes et à forte valeur ajoutée**. Leurs attentes incluent des **capteurs de haute précision** capables de détecter **les fissures, les anomalies structurelles et les variations de température sous-marine**. La **résistance aux conditions extrêmes** est un critère essentiel, notamment pour le fonctionnement du drone sous des pressions élevées et dans des environnements corrosifs. Sensoriellement, ces utilisateurs exploitent **la vue** pour

les inspections par imagerie thermique et sonar, ainsi que **le toucher** pour manipuler des interfaces robustes en milieu difficile.

4.6.3.4 Passionnés d'exploration sous-marine et grand public

Enfin, une part du marché peut être adressée aux **amateurs de plongée, aux vidéastes sous-marins et aux explorateurs indépendants**, qui souhaitent utiliser un drone sous-marin pour **l'observation et la capture d'images des fonds marins**. Ces utilisateurs ont généralement entre **20 et 50 ans**, avec des profils variés allant des plongeurs récréatifs aux documentaristes. Leur situation économique est diverse, certains finançant eux-mêmes leur équipement, tandis que d'autres bénéficient de **sponsorisations ou de subventions pour des projets de conservation marine**.

Leurs attentes sont axées sur la **facilité d'utilisation, la portabilité et la qualité de l'image**. Ils recherchent un drone compact, capable de **filmer en haute résolution**, avec une **interface intuitive et une connexion sans fil en temps réel**. Sensoriellement, leur expérience repose principalement sur **la vue**, avec une exigence de restitution fidèle des couleurs et de la clarté des images capturées sous l'eau. Pour certains vidéastes et plongeurs professionnels, **l'ouïe** peut également être un critère, notamment pour capter les sons de l'environnement sous-marin.

4.6.4 Conclusion

L'analyse approfondie des **utilisateurs potentiels** montre que le drone sous-marin scientifique doit répondre à des **besoins variés et exigeants**. Les scientifiques et chercheurs recherchent **la précision et la compatibilité avec leurs outils d'analyse**, tandis que les ONG privilégient **l'autonomie et l'impact environnemental réduit**. Les entreprises industrielles exigent **une fiabilité extrême et des capteurs de haute technologie**, alors que le grand public est principalement intéressé par **la facilité d'utilisation et la qualité des images sous-marines**.

En intégrant ces attentes dans le développement du produit, le drone pourra ainsi **s'adapter efficacement aux exigences du marché scientifique, environnemental, industriel et récréatif**.

5 Définition du périmètre du produit

L'objectif de ce chapitre est de poser le cadre de notre étude, du mieux possible. En effet, dans le cas contraire, il est quasiment inévitable que le commanditaire nous dise que cela ne convienne pas ou qu'il y a des oubli majeurs. Il nous faut donc **consolider le cahier des charges fonctionnel** du sous-marin et définir les **exclusions** pour limiter les ambiguïtés avec le client.

5.1 Consolidation du cahier des charge fonctionnel

Le cahier des charges fonctionnel est constitué d'une **fonction de service** correspondant au besoin exprimé par le client et de plusieurs **contraintes** imposées par l'environnement extérieur du sous-marin. Afin d'éviter que certaines contraintes soient oubliées ou que la fonction de service ne soit une solution au problème, nous allons, dans les parties suivantes, nous appuyer sur plusieurs méthodes.

5.1.1 Redéfinition de la fonction de service

Avant de définir la fonction de service, nous devons en premier lieu établir le besoin fondamental, également appelé **fonction globale**. Pour cela, nous utilisons la « méthode des cinq pourquoi ? ». Cette méthode consiste à questionner systématiquement le client sur la raison de son besoin.

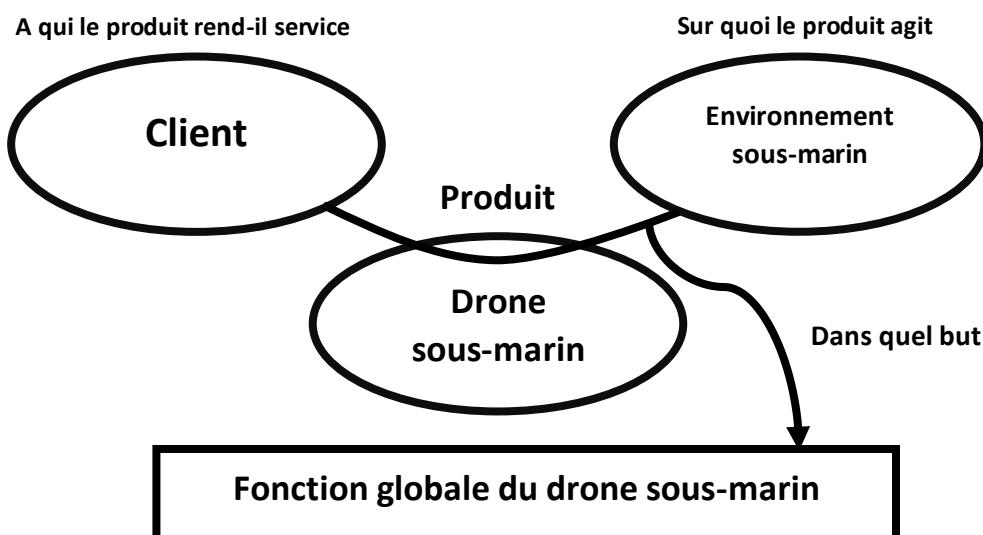
Une fois cette fonction globale établie, nous pouvons l'utiliser dans le diagramme « bête à cornes », qui est un outil d'analyse du besoin du client qui répond aux questions suivantes : **A qui le produit rend-il service, sur quoi le produit agit et dans quel but, ce but étant la fonction globale**.

Nous pouvons ensuite en déduire la fonction de service, qui reprend la fonction globale en y ajoutant un **verbe d'action** et de **deux éléments du milieu extérieur**.

Le premier « pourquoi » concevoir ce sous-marin est naturellement pour explorer les fonds marins. Puis à la question « pourquoi explorer les fonds marins », nous avons répondu que le but était de collecter des données. Nous avons continué en précisant que nous voulions en collecter car nous manquons de données sur les fonds marins, et cela puisqu'ils sont difficiles d'accès. Enfin, nous avons précisé qu'ils sont difficiles d'accès à cause des conditions extrêmes à ces profondeurs.

La fonction globale du drone sous-marin est donc : « **Explorer et collecter des données des fonds marins dans des endroits dangereux et inaccessibles pour l'homme** ».

Le diagramme bête à corne s'établit donc comme le suivant :



Enfin, on détermine la **fonction de service** en utilisant les 2 éléments du milieux extérieur les plus influents sur le drone ainsi que le verbe d'action le plus adapté : « **Résister à la pression et l'eau salée en explorant les fonds marins et en collectant des données** »

Nous avons donc déterminé la fonction globale et la fonction de service que nous utiliserons dans les parties qui suivent pour consolider le cahier des charges fonctionnel.

5.1.2 Recherche de contraintes supplémentaires

Afin de trouver toutes les contraintes associées au produit, il faut croiser tous les éléments du milieu extérieur (**EME**) que l'on a répertorié avec les quatre **verbes d'action** : résister, s'adapter, respecter (dans le sens de ne pas dégrader) et informer. Chaque contrainte est évaluée de 1 à 3 en fonction de son importance, 3 étant le niveau d'importance maximal et 1 le niveau minimal (la contrainte a du sens, mais aucun intérêt pour ce produit). Cela nous donne la liste de contraintes suivies de leur niveau d'importance en gras suivante.

- Eau salée → Résister → Le sous-marin doit résister à la corrosion causée par l'eau salée. **3**
- Pression → Résister → Le sous-marin doit résister à la pression très forte des grandes profondeurs. **3**
- Faune et flore → Respecter → Le sous-marin doit respecter la faune et la flore marine en évitant de les perturber. **2**
- Bateau → S'adapter → Le sous-marin doit s'adapter aux interactions avec le bateau support pour le déploiement et la récupération. **2**
- Hommes → Informer → Le sous-marin doit informer les opérateurs en surface de son état et de ses observations. **3**
- Local de maintenance → S'adapter → Le sous-marin doit s'adapter aux infrastructures du local de maintenance pour les réparations et l'entretien. **2**
- Air → Respecter → Le sous-marin doit respecter les normes de sécurité pour éviter toute pollution ou contamination de l'air lors de son stockage et de sa maintenance. **2**
- Gravité → S'adapter → Le sous-marin doit s'adapter aux effets de la gravité pour assurer une flottabilité et une stabilité optimales sous l'eau. **1**
- Grues → S'adapter → Le sous-marin doit s'adapter aux systèmes de levage des grues pour son transport et sa mise à l'eau. **2**
- Températures → Résister → Le sous-marin doit résister aux variations de température entre la surface et les grandes profondeurs. **3**
- Local de stockage → S'adapter → Le sous-marin doit s'adapter aux conditions du local de stockage pour préserver son bon état lorsqu'il n'est pas utilisé. **1**

Nous avons donc déterminé les principales contraintes liées au milieu dans lequel le drone sous-marin évolue en fonctionnement, mais également lorsqu'il est transporté et stocké.

5.1.3 Cahier des charges consolidé

Grâce aux sous-parties précédentes, nous avons pu déterminer la fonction de service ainsi que les contraintes importantes pour la conception du système. L'objectif de cette sous-partie est donc de dimensionner l'importance de ces contraintes mais surtout de donner des chiffres afin d'avoir une idée plus précise de ce que le robot pourra réaliser et les difficultés auxquelles il pourrait faire face. Nous avons donc listé ces contraintes dans le tableau ci-dessous en leur attribuant un **niveau de flexibilité** et la **phase de vie** dans laquelle elles pourraient intervenir. Le niveau F0 étant la flexibilité la plus faible et F3 la plus forte. Les contraintes ont été nommées par rapport aux différentes phases de vie. Le premier indice donne la phase de vie concernée par la contrainte et le deuxième indice est le numéro de la contrainte dans cette phase de vie. De plus, tous les niveaux donnés viennent des documents des recherches documentaires qui avaient menées plus tôt dans l'avant-projet.

Référence	Fonction de service / Contrainte	Critères	Niveaux	Flexibilité
FS1	Collecter des données particulières dans les fonds marins en milieux hostile	Vidéo live pour piloter Stockage d'échantillons Stockage de photos HD	Vidéo 1080p 60fps Echantillon de 500mL Photos 24MP Stockage interne de 64Go	F0
C1	Résister à l'eau	Pression Corrosion (salinité de l'eau) Différence de température	Min 1 bar Max 200m (20 bar) 35g/L (taux moyen de sel dans l'eau de mer) De +25°C (surface) à +4°C (profondeur)	F0
C2	Déplacer le robot	Propulser le robot et le diriger	Vitesse de 2m/s	F0
C3.1	Adaptation au bateau support	Interfaces mécaniques et protocoles d'opération	Compatibilité avec une plateforme de déploiement de 5x5 m	F1
C3.2	Adaptation aux grues de levage	Systèmes de levage et manutention	Poids supporté par les grues ≥ 150 kg	F2
C4.1	Respect de la faune et de la flore marines	Présence d'organismes vivants	Niveau sonore sous 160 dB pour éviter les perturbations	F1
C4.2	Adaptation aux effets de la gravité	Equilibre sous l'eau pour ne pas se retourner	Masse volumique ajustable entre 997 kg/m ³ et 1027 kg/m ³ S'adapter à la gravité, un vecteur vertical vers le bas de 9,81 m/s ²	F0
C5.1	Transmission d'informations aux opérateurs	Environnement de communication (eau, interférences)	Débit de données de 10 Mbit/s à 200 m	F1

C5.2	Adaptation aux infrastructures de récupération	Moyens de récupération (navire, plateforme)	Interface de récupération pour une grue avec crochet de 50 mm	F2
C6.1	Adaptation au local de maintenance	Contraintes d'espace et d'équipements disponibles	Accès via une porte de 1,2 m de large	F2
C6.2	Respect des normes de sécurité de l'air	Risques de pollution ou contamination	Émissions de COV < 10 ppm en stockage	F1
C7.1	Adaptation aux conditions de stockage	Conditions environnementales du stockage	Température entre 10°C et 25°C, humidité < 60%	F3

Nous avons donc pu définir de manière plus précise le cahier des charges fonctionnel dans cette sous-partie grâce aux recherches documentaires ainsi qu'à la méthode des 5 pourquoi réalisée dans la partie 5.1.1.

5.2 Définition des exclusions

Dans le cadre de cette étude, certaines limites doivent être définies afin de garantir un travail pertinent et cohérent avec les objectifs fixés. Les **exclusions** listées ci-dessous permettent ainsi de clarifier le **périmètre de l'étude** et d'éviter toute dérive vers des sujets hors de son champ d'application.

- Développement d'un système de navigation : Le **contrôleur de mouvement** ne sera pas développé.
- Traitement d'image et reconnaissance des obstacles : L'**analyse et l'interprétation** avancée des images capturées par le robot ne seront pas prises en compte.
- Développement du système de récupération d'échantillons : La faisabilité sera évaluée, mais pas le design précis du **mécanisme** de prélèvement d'eau.
- Intégration avec un navire spécifique : L'étude ne prendra pas en compte les caractéristiques d'un bateau hôte pour le déploiement du robot. Aucun travail ne sera mené sur les **interfaces entre le robot et un navire**.
- **Système de mise à l'eau et de récupération** : Les mécanismes permettant de descendre ou remonter le robot à bord d'un bateau ne seront pas étudiés.
- Infrastructure de maintenance à bord : L'organisation de la **maintenance** du robot sur le bateau, y compris l'espace nécessaire, les outils et les équipements, ne sera pas prise en compte.
- **Personnel dédié à l'exploitation** : L'étude ne définira pas le rôle et les compétences requises pour l'équipage en charge du pilotage et de l'entretien du robot.
- Communication avec le navire : Le **mode de transmission des données** entre le robot et un navire en surface ne sera pas approfondi, sauf pour garantir un pilotage avec une latence inférieure à 0,5s.
- Autonomie énergétique en lien avec un bateau : Toute **alimentation ou recharge** du robot via un bateau de support sera exclue de l'étude.

Les exclusions définies dans cette étude garantissent une approche centrée sur la conception globale du robot, en mettant l'accent sur son architecture et ses principales fonctionnalités.

6 Conception préliminaire en avant-projet

En conception préliminaire, l'objectif est de valider les faisabilités techniques et économiques du sous-marin et de voir si le vrai projet qui coutera plus cher est viable.

Les étapes de la conception du robot sous-marin sont les suivantes :

- Détermination des solutions élémentaires
- Définition de l'architecture
- Définition de la structure
- Prédimensionnement des solutions et de la structure

6.1 Détermination des solutions élémentaires

Face à un problème technique, la première solution envisagée n'est pas toujours la meilleure. Il est donc essentiel d'explorer plusieurs pistes en s'appuyant sur les Fonctions de Service et les Contraintes du cahier des charges fonctionnel.

La méthode FAST permet de structurer cette réflexion en identifiant les fonctions techniques nécessaires. La recherche de solutions existantes se fera à partir des fonctions techniques les plus détaillées (en bout de chaîne).

Afin d'éviter les répétitions entre la détermination des fonctions techniques, la recherche de l'existant et le choix des solutions, l'ensemble de l'analyse sera présenté dans un tableau unique, expliqué ci-dessous.

6.1.1 Détermination des fonctions techniques

La détermination des fonctions techniques est une étape assez abstraite qui demande une réflexion et une prise de recul sur le besoin du client et les objectifs du sous-marin. Elle s'appuie sur la méthode suivante :

- Chercher des solutions à chaque fonction de service et contraintes avec sa propre culture technique et de manière intuitive, des recherches sur Internet et dans des livres (disponibles à la bibliothèque) et des discussions avec des professeurs ou d'autre élèves.
- Définir les fonctions techniques à partir des solutions précédentes.
- Eventuellement définir d'autre fonctions techniques.
- Eventuellement trouver des points communs à plusieurs fonctions techniques pour en définir une de niveau supérieur.

Chaque contrainte, fonction de service, fonction technique et sous-fonction technique est référencée dans le tableau présent à la page suivante pour faciliter leur mention dans la suite de l'avant-projet et les fonctions techniques sont reliées entre elles par des connecteur (**ET/OU**). Cette démarche permet d'élargir les pistes de conception pour éviter au maximum de limiter le nombre de solutions techniques pour répondre aux exigences du cahier des charge fonctionnel.

Réf.	Fonction de Service / Contraintes	Premières idées de solutions en tête	Réf.	Fonctions Techniques (niveau 1)	Réf.	Fonctions Techniques (niveau 2)	Réf.	Fonctions Techniques (niveau 3)	Réf.	Solutions technologiques
FS1	Collecter des données particulières dans les fonds marins en milieux hostile		FTP1.1	Capturer des images et des vidéos sous-marines	FTP1.1.1	Assurer une bonne qualité d'image			STP1.1	Caméra HD ET éclairage LED ET capteur de luminosité automatique OU caméra-thermique ou infrarouge
					FTP1.1.2	ET maintenir la visibilité en faible luminosité				
			FTP1.2	ET acquérir des mesures environnementales	FTP1.2.1	Selectionner des capteurs adaptés aux conditions	FTP1.2.1.1	Acquérir des données de manière fiable	STP1.2	Capteurs de pression, température, salinité et de PH ET coque renforcée en titane pour résister à la pression OU coque renforcée en plastique dur pour résister à la pression
					FTP1.2.2	ET Assurer la calibration des capteurs	FTP1.2.1.2	ET Résister à la pression		
			FTP1.3	ET stocker et transmettre les données collectées	FTP1.3.1	Intégrer un système de stockage sécurisé	FTP1.3.1.1	Protéger des chocs et vibrations	STP1.3.1	Boîtier en silicium contenant un SSD OU structure reliée par des supports souples (ressorts, élastomères...) OU mousse aborbante OU gel amortissant
					FTP1.3.2	ET Optimiser la transmission des données	FTP1.3.1.2	ET Garantir une étanchéité		Fibre optique OU onde-acoustique
C1	Résister à l'eau	Utiliser des matériaux couramment utilisés pour les sous-marins	FT1.1	Assurer l'étanchéité des composants électroniques					ST1.1	Boîtier étanche : coque en aluminium anodisé OU titane OU résine OU joints toriques
			FT1.2	ET Utiliser des matériaux résistants à la corrosion					ST1.2	Peinture résistante à la corrosion OU traitement anticorrosion type époxy marine
			FT1.3	ET Limiter la condensation interne	FT1.3.1	Stopper les infiltrations			ST1.3	Système de déhumidification (gel de silice) OU ventilation interne avec séchage d'air ET capteur d'humidité OU joints toriques
			FT1.4	ET Résister à la pression	FT1.3.2	OU sécher les éléments internes			ST1.4	coque cylindrique renforcée OU coque en alliage de titane OU structure multicouche
C2	Déplacer le robot et s'adapter aux effets de la gravité	Une hélice et un gouvernail classique ET Système de ballastes repartis dans le sous-marin	FT2.1	Propulser le robot dans différentes directions	FT2.1.1	Intégrer un système de propulsion adapté			ST2.1	Hélices orientables OU jet d'eau orientables
			FT2.2	ET Maintenir la stabilité face aux courants marins	FT2.2.1	Rester stable en déplacement			ST2.2	Ailerons stabilisateurs OU propulseurs latéraux
			FT2.3	ET Ajuster la flottabilité	FT2.2.2	ET Corriger la trajectoire			ST2.3	Ballast OU masse mobiles pour la flottabilité OU mousses
			FT2.4	Equilibrer la répartition des masses	FT2.4.1	Concevoir une architecture homogène			ST2.4	Répartition homogène des éléments internes OU ballasts mobiles
			FT2.5	ET ajuster la flottabilité en fonction de la profondeur	FT2.4.2	ET éviter les variations brutales de masse			ST2.5	Ballasts
			FT2.6	ET maintenir la stabilité lors des manœuvres	FT2.5.1	Contrôler automatiquement la poussée d'Archimède			ST2.6.1	Système gyroscopique
			FT2.6.1	Déetecter l'inclinaison du robot					ST2.6.2	MU (centrale à inertie)
			FT2.6.2	ET stabiliser le robot					ST5.1	Liaisons par câble optique OU câbles blindés OU câbles torsadés OU câbles électrifiés
C5.1	Transmission d'informations aux opérateurs	Transmission via un câble renforcé et port USB	FT5.1.1	Envoyer des données en temps réel	FT5.1.1.1	Sécuriser la communication			ST5.1.2	Interface USB-C étanche OU module Wi-Fi
			FT5.1.2	ET extraire rapidement les données	FT5.1.1.2	ET optimiser la bande passante			ST5.1.3	Blindage électromagnétique OU filtre passe-bas
			FT5.1.3	ET assurer une connexion fiable	FT5.1.3.2	Limiter les interférences avec				

Figure 10 : Fast

6.1.2 Recherche de l'existant

Dans cette partie, nous cherchons des solutions techniques déjà existantes pour répondre aux fonctions techniques présenté dans le FAST à la page précédente. Pour cela, nous utilisons les fonctions techniques pour définir des mots clés à partir desquels nous effectueront nos recherches. Les produits concurrents présentés dans la partie 2.6 possèdent des solutions techniques envisageables pour notre avant-projet.

Toutes les solutions techniques trouvées à l'aide de cette méthode sont répertoriées dans le FAST dans la colonne **Solutions technologiques** et référencées en fonction de la fonction techniques qu'elles remplissent.

Une recherche en utilisant des mots clés sur Google Patents et sur Espacenet ont permis de recenser une liste de brevets pour une majeure partie des solutions technologiques mentionnées dans le FAST. Ces brevets sont cités ci-dessous, précédés des solutions technologiques du FAST et les liens pour retrouver ces brevets sont en annexe.

- Caméra HD ET éclairage LED ET capteur de luminosité automatique OU caméra thermique ou infrarouge :

BUTTET Mathias - BLUMENTHAL Jean-Michel. Equipement d'assistance a une exploration sous-marine et robot sous-marin pour l'équipement. EP3271786B1. 2018-01-24

- Capteurs de pression, température, salinité et de PH ET coque renforcée en titane pour résister à la pression OU coque renforcée en plastique dur pour résister à la pression :

HAYWARD Peter - MOTTRAM Keith - DONNELLY Chris - MAASS Stefan. WO2013050051A1. 2013-04-11

伸晃 橋元, Sonde pour mesure de température en profondeur et thermomètre de profondeur. WO2024004375A1. 2024-01-04

- Boitier en silicone contenant un SSD OU structure reliée par des supports souples (ressorts, élastomères...) OU mousse absorbante OU gel amortissant :

Dr. WELTIN Uwe - Dr. FREUDENBERG Tillman - Dr. FREUDENBERG Ulrich. Support élastique. EP0541902B1. 1995-02-22

MCDONNELL Kevin - MCDONNELL Alexandra. Système d'amortissement des chocs à structures multiples pour rembourrage anatomique. EP4077964A4. 2024-01-24

- Boitier étanche : coque en aluminium anodisé OU titane OU résine OU joints toriques :

DENNIS Alan John. Boîtiers étanches. WO2001057980A1. 2001-08-09

I-Wen Su. Boîtier étanche pour équipement électronique. US7362570B2. 2008-04-22.

REICH II Egon. Boîtier étanche. US4489770A. 1984-12-18

- Peinture résistante à la corrosion OU traitement anticorrosion type époxy marine :

葛德春. Marine reinforced concrete anticorrosion paint and preparation method thereof. CN101255290B. 2010-11-10

- Système de déshumidification (gel de silice) OU ventilation interne avec séchage d'air ET capteur d'humidité OU joints toriques :

SANCHEZ Jose - BARKALLAH Amine - RIVENC Jean. Dispositif électronique comprenant un dispositif d'adsorption d'humidité. FR2947417A1. 2011-08-26

ARCHER Richard Hamilton - Qun Chen - JONES James Robert. Système et procédé de déshumidification. WO2019117732A1. 2019-06-20

- Coque cylindrique renforcée OU coque en alliage de titane OU structure multicouche :

ROSÉN Håkan. Coque marine et vaisseau marin. WO2013154484A1. 2013-10-17

- Hélices orientables OU jet d'eau orientables :

DE LA ROCHE KERANDRAON Olivier - PAROLDI Daniel - VESNITCH SPALE Yves. Hélice à pas variable. 1986-09-03

- Ailerons stabilisateurs OU propulseurs latéraux :

ALDIN Gérard - ALDIN Aline - ALDIN Frédéric - ARCHAMBAUD Christel. Stabilisateur dynamique pour bateau, dispositif compensateur d'effort pour orienter une voilure et bateau semi-submersible. EP1716040A2. 2006-11-02

- Ballast OU masse mobiles pour la flottabilité OU mousses :

BAYLOT Michel - BONNISSEL Marc - ROCHER Xavier. Dispositif de flottabilité et procédé de stabilisation et de contrôle de la descente ou remontée d'une structure entre la surface et le fond de la mer. EP1606159B8. 2008-07-16

- Système gyroscopique :

KUYVENHOVEN Arend Willem. Gyroscopic stabilizing apparatus. US2586469A. 1952-02-19

- Liaisons par câble optique OU câbles blindés OU câbles torsadés OU câbles électrifiés :

STIPES Jason. Cable de données à grande vitesse composé de paires torsadées blindées individuellement. CA2382720C. 2009-12-22

6.1.3 Choix des solutions

Nous effectuons dans ce chapitre un choix parmi les différentes solutions proposées à chaque fonction technique du FAST en page 30. Chaque solution correctement dimensionnée peut convenir aux besoins, mais il faut trouver un compromis, le meilleur possible par rapport aux contraintes du cahier des charges fonctionnel. Ces contraintes proviennent directement du cahier des charges fonctionnel et sont issues du FAST.

Pour la solution à la fonction technique principale FTP1.1, nous utilisons une matrice de choix. Cette matrice fonctionne comme une grille dans laquelle interviennent les différentes solutions dans la colonne de gauche, les critères de choix dans la ligne du haut, les pondérations choisies dans la deuxième ligne et les notes dans le reste de la matrice. Les notes finales sont dans la colonne de droite, dont les cases sont surlignées en fonction du code couleur expliqué sous la matrice. Cette méthode est très critiquable car une solution cochant toutes les cases importantes mais ne pouvant être choisie à cause du critère le moins bien pondéré peut être retenu comme la meilleure solution (par exemple une caméra HD d'une qualité et d'une visibilité exceptionnelle mais dont le prix est trois fois supérieur au prix total du sous-marin n'est pas une solution envisageable). Elle ne

peut donc être utilisée pour faire un choix définitif. Elle permet en revanche de dégrossir et d'éliminer les solutions parfaitement inadaptées.

Les autres solutions sont choisies suivant des critères et un raisonnement qui sera expliqué par la suite.

6.1.3.1 FTP1.1

La matrice de choix pour la solution STP1.1 est la suivante :

Mise en mouvement	Assurer une bonne qualité d'image	Maintenir la visibilité en faible luminosité	Coût d'achat	Note
Pondération	3	6	1	
Capteur thermique infrarouge	1	1	2	11
Camera HD + éclairage	3	2	2	23
Légende code couleur	Très bien	Bien	Peu intéressant	Non adapté

Figure 11 : Matrice de choix pour la STP1

Le critère de visibilité paraît comme le plus important puisqu'il est essentiel pour diriger le sous-marin et collecter des informations photographiques et vidéo. La qualité des données collectées est également importante mais moins essentiel, d'autant plus que d'après la recherche de l'existant, une excellente qualité vidéo à ces profondeurs est extrêmement complexe à obtenir. Enfin, le coût apparaît en dernier car il reste un critère mais ne doit pas être un frein pour les autres contraintes.

La caméra HD accompagnée d'un éclairage LED semble donc être la solution la plus adaptée pour répondre aux exigences de la FTP1.1. Ce choix est confirmé grâce aux données acquises dans le chapitre recherche de l'existant.

6.1.3.2 FTP1.2

Les capteurs sont imposés afin de récolter les données demandées par le client. Le choix du matériau de la coque s'est effectué au profit d'une coque en titane, pour des raisons principales de résistance à la pression et de durabilité. La pression à une profondeur de plusieurs centaines de mètres est telle que la coque en plastique, bien que renforcée, ne résisterait probablement pas. Le titane résiste également mieux à la corrosion.

6.1.3.3 FTP1.3.1

Après des recherches dont quelques brevets apparaissent dans le chapitre 6.1.2 Recherche de l'existant, il apparaît que la solution la plus couramment utilisée, la plus fiable et la plus efficace soit une structure reliée au châssis par des supports souples tel que des ressorts.

6.1.3.4 FTP1.3.2

Cette fonction technique a été écrite pour trouver une solution afin de contrôler le sous-marin en direct depuis un bateau. Etant donné les profondeurs auxquelles ce sous-marin doit évoluer, la solution de transmettre les données via des ondes acoustiques n'est pas viable pour la simple raison que le délai entre la prise d'action de l'opérateur et l'action sur le sous-marin, ainsi que l'instant où une action se produit autour du sous-marin et l'instant où cette information remonte à l'opérateur serait trop long pour piloter le sous-marin efficacement sans risque de l'endommager. La fibre optique apparaît donc comme la meilleure solution.

6.1.3.5 FT1.1

Pour le boîtier étanche, la coque en aluminium anodisé est celle qui présente le meilleur compromis face aux autres matériaux, car l'aluminium anodisé est léger, résistant à la corrosion et permet une bonne étanchéité pour l'électronique.

6.1.3.6 FT1.2

La manière la plus efficace de protéger la coque de la corrosion est la résine résistante à la corrosion type époxy. En effet cette méthode est plus adaptée pour couvrir des formes complexes et il sera plus simple d'appliquer une nouvelle couche de résine que de refaire la peinture. Les deux solutions ne sont pas excellentes pour l'environnement.

6.1.3.7 FT1.3

Pour parer la buée, les joints sont une solution peu chère et très simple. Un système de ventilation interne et de séchage de l'air commandé via des capteur d'humidité est la solution la plus efficace et la plus durable qui nécessite le moins de maintenance et d'entretien mais très couteux et complexe. La solution qui propose le meilleur compromis entre prix, simplicité et efficacité est le gel de silice, un gel déshumidifiant.

6.1.3.8 FT1.4

La solution à cette fonction technique de résistance à la pression a déjà été effectuée au 6.1.3.2.

6.1.3.9 FT2.1

Le déplacement du robot doit être possible dans toutes les directions : en avant, en arrière, latéralement ainsi que verticalement. Il est essentiel de pouvoir manœuvrer avec précision, y compris à très faible vitesse ou à l'arrêt. Dans ce contexte, l'utilisation de simples gouvernails est insuffisante car leur efficacité dépend d'une vitesse de déplacement minimale.

La solution retenue est l'installation d'hélices orientables, également appelées propulseurs vectoriels. Ces propulseurs permettent de générer des mouvements fins dans toutes les directions indépendamment de la vitesse du sous-marin. Ce choix garantit une maniabilité optimale, indispensable pour évoluer dans des milieux encombrés tels que les fonds marins ou les structures immergées.

6.1.3.10 FT2.2

Sous l'effet des courants marins, le sous-marin risque d'être déporté involontairement de sa trajectoire. Pour compenser ces forces environnementales, il est nécessaire de mettre en œuvre une correction active de la position. Le choix s'est porté sur l'utilisation de propulseurs latéraux. Ces propulseurs permettent de générer une poussée transversale pour corriger immédiatement toute dérive due aux courants. Ce dispositif est particulièrement adapté aux opérations nécessitant un maintien précis de la position, notamment lors des observations.

6.1.3.11 FT2.3

Le sous-marin doit pouvoir ajuster sa flottabilité pour modifier sa profondeur sans avoir recours en permanence aux moteurs de propulsion verticale. L'utilisation de matériaux à flottabilité fixe, comme la mousse, ne permettrait pas une adaptation dynamique aux besoins de mission. De même, déplacer des masses mécaniques serait lent, complexe et sujet à pannes. La solution retenue est l'intégration d'un système de ballast à eau. Ce système consiste à remplir ou à expulser de l'eau dans des chambres dédiées afin de contrôler précisément la densité du robot. Cette approche, inspirée des sous-marins classiques, permet au robot de monter ou de descendre de manière douce et contrôlée, tout en économisant l'énergie des propulseurs.

6.1.3.12 FT2.4

Pour garantir une stabilité naturelle et minimiser le besoin de corrections actives, le centre de gravité du sous-marin doit être soigneusement positionné. Plutôt que de recourir à des systèmes de masses mobiles complexes et fragiles, une approche plus simple et plus fiable a été privilégiée. Ainsi, la solution choisie repose sur une répartition homogène des éléments internes dès la phase de conception. En plaçant symétriquement les composants lourds comme les batteries, les moteurs et les ballasts, on assure une stabilité naturelle du sous-marin. Cette organisation réduit les risques de roulis et de tangage intempestifs et optimise la consommation énergétique liée aux corrections d'attitude.

6.1.3.13 FT2.5

La poussée d'Archimède ne peut être contrôlée que par un système de ballast. C'est la seule solution utilisée dans les sous-marins et donc la solution retenue.

6.1.3.14 FT2.6

La solution adoptée pour maintenir la stabilité lors des déplacements est l'intégration d'un système gyroscopique couplé à une centrale inertuelle (IMU). Ce dispositif permet de mesurer en temps réel les vitesses angulaires, les accélérations et l'orientation du sous-marin. Ces données sont exploitées par des algorithmes de contrôle automatique pour ajuster en permanence la poussée des propulseurs et stabiliser le sous-marin sans intervention humaine. Cette stabilisation active est aujourd'hui un standard dans l'ensemble des robots marins professionnels et garantit un comportement prévisible même dans des conditions difficiles.

6.1.3.15 FT5.1.1

Pour transmettre les données en temps réel, notamment pour contrôler le robot, la fibre optique offre un grand débit comparé aux autres solutions. Les autres câbles sont plus lourds et la fibre a une grande résistance aux interférences électromagnétiques, il est donc inutile de rajouter des protections supplémentaires.

6.1.3.16 FT5.1.2

Pour récupérer les données stockées dans le sous-marin, l'interface par un port USB offre un débit bien plus important que par Wifi, et ne nécessite pas l'installation d'un module. Cette solution est donc plus efficace, moins coûteuse et plus facile à mettre en place. Il suffit de mettre un cache étanche sur le port USB en cas de fuite dans le compartiment étanche du sous-marin.

6.1.3.17 FT5.1.3

Le blindage électromagnétique protège contre toutes les interférences électromagnétiques venant de l'extérieur et évite que le système émette des parasites. Il est néanmoins plus lourd et coûteux et nécessite parfois une isolation complexe. Le filtre passe-bas supprime uniquement les fréquences hautes indésirables dans le signal électrique qui traverse le câble de transmission. Il est léger et simple à mettre en œuvre. Mais il ne protège pas contre les parasites provenant de l'environnement extérieur. Le blindage électromagnétique est donc la meilleure solution car il agit sur tout le câble, il protège à la fois en émission et en réception et il est indispensable dans un environnement hostile et très perturbé comme les fonds marins.

Ces solutions retenues sont a priori les meilleures individuellement, mais elles doivent être compatibles entre elles pour assurer le bon fonctionnement du sous-marin. Il est possible que certaines solutions retenues s'avèrent inadaptées pour des questions de prix ou d'architecture inadaptée lors de l'agencement avec les autres composants. Dans le cas où une solution est inenvisageable, il faudra revenir à cette étape pour choisir des nouvelles solutions adaptées.

6.2 Définition de l'architecture générale

La définition de l'architecture générale consiste à définir les emplacements relatifs des principaux groupes de composants retenus. Les composants ont été regroupés par type de fonctionnement et en fonction de leur fonction techniques. Par exemple tous les capteurs ont été mis dans le même compartiment, et les éléments dédiés à la propulsion du sous-marin également. L'agencement des groupes a été défini comme le montre la figure 12 ci-dessous.

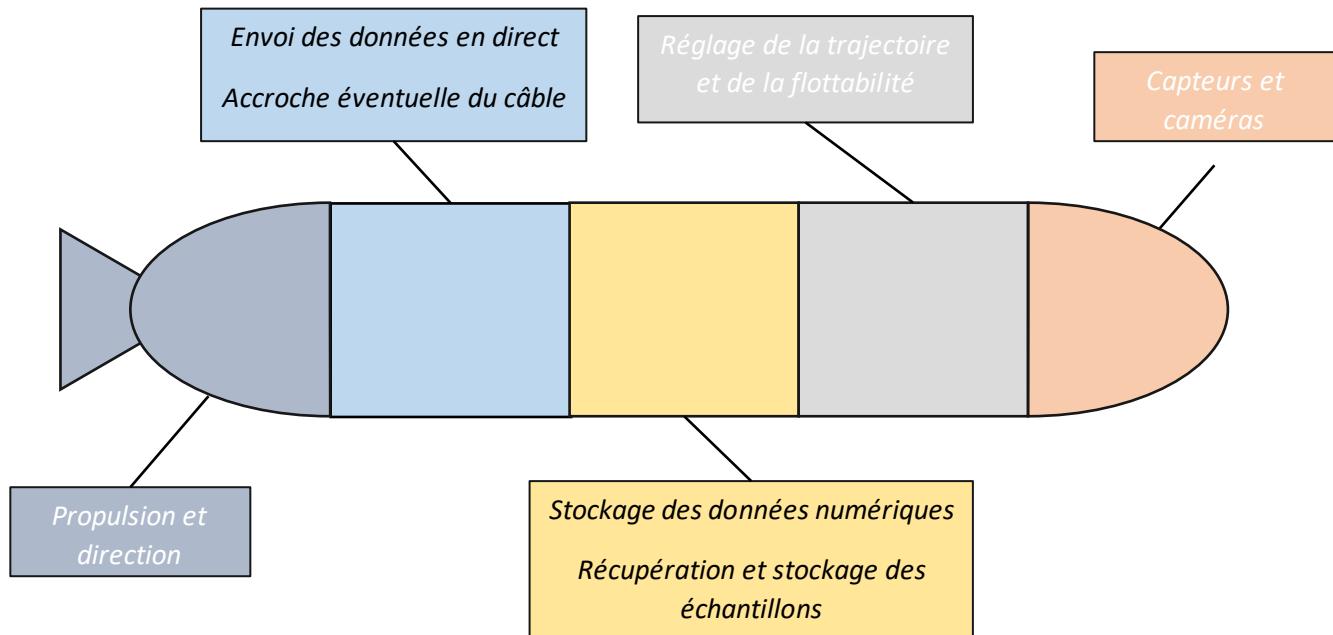


Figure 12 : schéma de l'architecture générale du sous-marin

Etant donné le choix des composants servant à la propulsion et la direction du sous-marin (hélice orientables), ces éléments ont été regroupés dans le compartiment le plus à l'arrière du sous-marin.

Les caméras servant à diriger le robot mais également à collecter des images et des vidéos des fonds marins ne peuvent être placées qu'à l'avant. Les autres capteurs sont également placés à cet endroit.

L'étude de plusieurs sous-marins avec ballasts a montré que ce système est le plus efficace lorsqu'il est placé à l'avant du sous-marin. Nous l'avons donc placé juste après le compartiment dédié aux caméras et capteurs qui ne peut être à un autre emplacement.

Nous avons estimé que la transmission de données en direct par fibre optique était la meilleure solution, et que le robot doit être rattaché au bateau par un câble afin de le ramener efficacement sans dépenser d'énergie et en gagnant du temps, ou tout simplement en cas de problème. Un câble doit donc impérativement être accroché au robot. Afin d'éviter au maximum toute prise de vue gâchée par la présence du câble dans le champ de la caméra, nous avons décidé de mettre ce dispositif à l'arrière. Le système de transmission des données est donc également dans ce compartiment.

Enfin, le dernier compartiment restant est celui du milieu, avec le stockage des données numériques comme les photos prises pendant la plongée et d'autres vidéos, ainsi que le stockage des échantillons. Ce stockage est à un endroit stratégique, car en cas de choc frontal, ce compartiment n'est pas le premier à être endommagé et les données peuvent être conservées. De même si lors du rapatriement du robot à l'aide du câble, celui-ci venait à subir un choc à l'arrière, ce compartiment ne serait peut-être pas endommagé et les données sauvées.

Ce schéma d'architecture est très général et ne détaille pas l'agencement des composants eux-mêmes. En effet, nous avons vu après discussion avec le responsable du bureau d'étude que pour effectuer cet agencement, il était nécessaire de choisir chaque composant car un grand nombre de ces composants sont normalisés et des produits qu'il va être nécessaire d'acheter. Leur forme et leur géométrie n'est donc pas adaptable, c'est nous qui devons nous adapter à la géométrie de chacun de ces composants. Comme ce choix de composant n'est pas l'objectif de ce livrable ni même de cet avant-projet, ce schéma d'architecture est le plus avancé que nous pouvons fournir.

6.3 Prédimensionnement du composant principal

Dans le cadre de la conception de notre robot sous-marin, il est nécessaire de prédimensionner l'épaisseur de la coque en titane renforcé afin d'assurer sa résistance à la pression hydrostatique tout en optimisant son poids. Ce prédimensionnement, basé sur les contraintes mécaniques et les propriétés du matériau, constitue une première étape avant des analyses plus détaillées. Il nous est paru que c'était le paramètre le plus important à prédimensionner tant la résistance globale dépend de ce paramètre. Les autres paramètres comme le volume minimal sont également importants mais dépassent le simple cadre de notre avant-projet.

6.3.1 Définition des méthodes de choix et de prédimensionnement (avec son modèle associé)

Avant de procéder au choix et au dimensionnement de la coque en titane renforcé, il est essentiel de définir l'ensemble des caractéristiques techniques auxquelles ce composant devra répondre. Ces spécifications techniques sont issues à la fois du cahier des charges fonctionnel, de contraintes réglementaires, et des besoins identifiés lors des réflexions précédentes. Certaines de ces caractéristiques sont déjà connues, tandis que d'autres nécessiteront d'être calculées ou précisées à travers un modèle et une méthode de prédimensionnement.

Le tableau ci-dessous synthétise ces critères sous forme de Spécifications Techniques de Besoin (STB), en précisant pour chaque caractéristique la valeur cible ou l'objectif à atteindre.

Caractéristique technique (Critère de choix)	Valeur ou niveau (objectif)
Profondeur de fonctionnement maximale	200m
Pression externe maximale	21 bars (calculer à partir de la profondeur max)
Résistance à la corrosion en eau salée	Obligatoire (nominale)
Masse maximale de la coque	À déterminer (objectif d'allègement dans l'objectif de prédimensionner les ballast)
Coefficient de sécurité	2
Forme géométrique de la coque	Cylindrique + extrémités hémisphériques (connue)
Épaisseur minimale	Ce qu'on cherche à calculer

Ces spécifications serviront de base à la méthode de calcul de prédimensionnement, en tenant compte des contraintes mécaniques, géométriques et environnementales. Les caractéristiques marquées « à déterminer » nécessiteront un calcul ou une analyse plus approfondie dans les chapitres suivants.

Voici une version simplifiée de notre drone sous-marin qui sera utilisé pour les calculs :

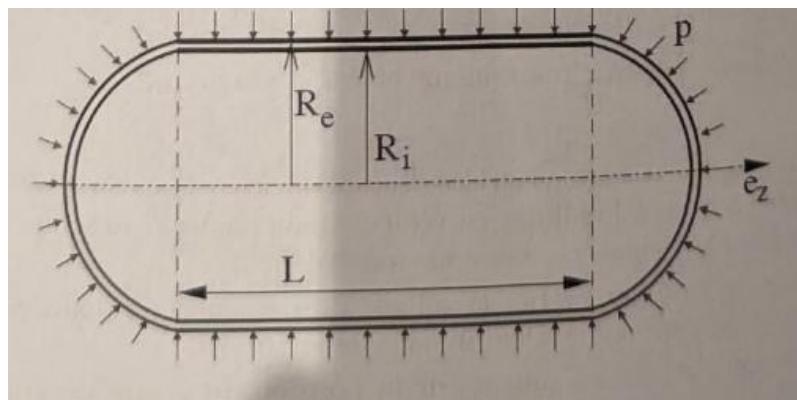


Figure 13 : Figure simplifiée

L'objectif va être de relier la contrainte exercée sur le drone sous-marin aux grandeurs Re et Ri, en déduire Re, puis Re-Ri l'épaisseur de la coque. Pour ce faire nous nous inspirons d'un sujet de concours de la filière PT datant de 2012.

6.3.2 Recherche des données

Afin de calculer Re, il est nécessaire de connaître Ri et p. La valeur de p est directement déterminée : 21 bars. En revanche, Ri est inconnu. Pour l'estimer, il faudrait déterminer le volume minimal nécessaire au bon fonctionnement du drone, ce qui dépend des composants internes. Cela impliquerait notamment de choisir les capteurs à intégrer, chaque capteur nécessitant une implantation spécifique. Ces choix techniques détaillés dépassent le cadre de notre avant-projet, et ne seront donc pas définis à ce stade.

6.3.3 Calcul de prédimensionnement

Le détail des calculs se trouve en Annexe 2 (rédigé entièrement par l'équipe écrivant ce rapport), il résulte que l'on trouve :

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3} \cdot \frac{B}{r^2} = \sqrt{3} \cdot \frac{R_i^2 R_e^2 P}{r^2 (R_e^2 - R_i^2)}$$

La formule exprime la contrainte équivalente de Von Mises en tout point situé à une distance radiale r à l'intérieur de l'épaisseur d'un cylindre épais soumis à une pression extérieure P. Cette équation montre que la contrainte dépend de la géométrie du cylindre (à travers les rayons intérieur Ri et extérieur Re) ainsi que de la position radiale r. La présence de r^2 au dénominateur indique que la contrainte est inversement proportionnelle au carré de la distance par rapport à l'axe : elle est donc plus élevée près de la paroi intérieure et diminue vers l'extérieur. Par ailleurs, le facteur comprenant les termes en Ri et Re traduit l'influence combinée de l'épaisseur et des dimensions globales du cylindre : plus l'écart entre Re et Ri est faible, plus la contrainte est amplifiée.

6.3.4 Conclusion

En conclusion, l'expression analytique de la contrainte équivalente de Von Mises obtenue pour un cylindre épais soumis à une pression extérieure met en évidence l'importance de la géométrie et de la position radiale dans la distribution des contraintes. Elle montre que la contrainte maximale se situe à la paroi intérieure, ce qui constitue la zone critique pour la résistance mécanique du cylindre. Cette formule permet donc d'anticiper les points de faiblesse structurelle et d'orienter les choix de conception, notamment en termes d'épaisseur et de matériaux, pour garantir la tenue de l'ouvrage sous pression.

7 Organisation de la suite de l'avant-projet

Dans cette partie, nous allons expliquer les prochaines étapes à suivre pour poursuivre cette étude. Nous allons dans un premier temps définir le **nouvel objectif général** pour la poursuite de cette étude, puis nous déterminerons les **tâches principales à effectuer** pour atteindre les objectifs souhaités. Nous définirons une nouvelle **matrice SWOT** présentant nos forces, faiblesses, opportunités et menaces ainsi que des plans d'actions associés pour maximiser nos chances d'aboutir au résultat souhaité. Nous définirons enfin un **planning prévisionnel** sur toute la durée de la nouvelle étude.

7.1 Objectif général de la nouvelle étude

L'objectif de cette étude est de poursuivre le travail déjà effectué au cours de ce premier avant-projet sur ce robot d'exploration et d'exploitation sous-marine. Etant donné l'avancement global de l'avant-projet, l'objectif général de cette nouvelle étude est d'aboutir à un **plan côté du sous-marin**, d'effectuer des **simulations numériques** et de fabriquer une (ou plusieurs) maquette miniature.

7.2 Définition des tâches à effectuer

Pour atteindre cet objectif, le travail doit être organisé et découpé en tâches à effectuer dans un ordre précis. Nous avons donc défini les tâches à effectuer.

- Calcul complet du prédimensionnement de la coque
- Définition du plan du sous-marin côté
- Réalisation de la CAO
- Réalisation et analyse des simulations numériques
- Réalisation de la maquette

7.3 Définition de la matrice SWOT et des plans d'actions

Comme expliqué dans la partie 3.1, la matrice SWOT (pour Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) a pour but d'identifier d'une part **les forces et les faiblesses** et d'autre part **les opportunités et les menaces** de notre projet. Son but est d'identifier les éléments les plus cruciaux pour la phase d'avant-projet sans entrer dans les détails. **Chaque élément est pondéré de 0 à 10**, 10 étant le niveau le plus important en fonction de sa probabilité, de son importance et de l'impact qu'il peut avoir sur l'avancement de l'avant-projet. Plus **le produit de ces 2 colonnes** est important et plus cet élément est à prendre au sérieux et à traiter efficacement pour la réussite de l'avant-projet. La matrice SWOT est en page suivante à la figure 14.

FORCES						FAIBLESSES					
Item	Détail	Probabilité /Importanc 1 à 10	Impact 1 à 10	Atout P*I	Item	Détail	Probabilité /Importanc 1 à 10	Impact 1 à 10	Risque P*I		
Analyse complète des contraintes physiques	La section 2.5 décrit bien la pression, corrosion, température, visibilité, faune, etc. Ce réalisme oriente correctement la conception.	9	9	81	Nombreuses exclusions critiques	Liste p.27-28 : pas de navigation, pas d'interface navire, pas de système de récupération, pas d'algorithme, pas d'échantillonner → limite sévèrement la crédibilité fonctionnelle.	10	10	100		
Architecture générale claire et justifiée	Le schéma d'architecture p.36-37 répartit logiquement propulsion, capteurs, stockage et liaison (câble placé à l'arrière pour éviter les caméras).	8	7	56	Pas d'étude de faisabilité économique	Aucun prix, aucune fourchette budgétaire, aucune contrainte de coût n'est mentionnée (p.6, 29), alors que le coût est central même à	9	6	54		
Choix techniques argumentés (propulsion, flottabilité)	Le choix des hélices orientables, ballasts, titane, etc. est justifié techniquement dans la section 6.1.3 avec pondération des critères.	7	7	49	Pas de stratégie de test ou de validation envisagée	Aucun plan de simulation ou test de modules même à terme. Pas de validation du pilotage filaire à 200m ni tests optiques/vidéo.	7	9	63		
Utilisation pertinente des outils de conception (FAST, bête à cornes)	Le rapport mobilise les outils standards d'avant-projet avec rigueur (5 pourquoi, contraintes notées, pondération dans le cahier des charges).	7	10	70	Aspects réglementaires peu intégrés à la conception	Bien identifiés (p.18-19), mais non pris en compte dans les choix techniques (ex. plaque DRN, sécurité fail-safe, localisation en cas de	6	10	60		
Analyse concurrentielle utile	Étude synthétique de BlueROV2, Chasing M2 Pro, DTG3 avec points forts/faibles utiles pour positionner le projet (p.9-10).	6	7	42	Pas de gestion des scénarios de panne ou sécurité	Aucun paragraphe ne traite de la redondance, perte de liaison, choc, attaque de faune, perte d'alimentation.	7	10	70		
OPPORTUNITES						MENACES					
Item	Détail	Probabilité /Importanc 1 à 10	Impact 1 à 10	Atout P*I	Item	Détail	Probabilité /Importanc 1 à 10	Impact 1 à 10	Risque P*I		
Marché émergent et pluridisciplinaire	ONG, recherche, énergie offshore, grand public (section 4.6.3). Divers besoins avec profils utilisateurs différents.	8	8	64	Environnement marin complexe et imprévisible	P.7-8 : Faune, encre, courants, visibilité très variable. Peu de solutions techniques proposées pour les gérer	10	10	100		
Accès à des ressources open-source ou brevets	Section 4.5 et 6.1.2 mentionne OpenROV, brevets disponibles (hélices, caméras, coques) → base technique existante.	10	9	90	Réglementations contraignantes	Mentionnées (p.18) mais lourdes à respecter (immatriculation, sécurité, permis) et peu anticipées techniquement.	9	10	90		
Soutien académique et institutionnel potentiel	Projet encadré par l'ENSAM, possible valorisation concours/projets de recherche.	2	10	20	Dépendance exclusive à la fibre optique	Pas d'alternative envisagée en cas de rupture du câble (p.33-34). Solution unique = fragilité structurelle du pilotage.	10	2	20		
Intérêt pédagogique fort	Le projet a une valeur ajoutée pédagogique en conception, gestion projet, innovation (non négligeable pour soutien école/lab).	10	6	60	Concurrence de produits industriels avancés	BlueROV2, Deep Trekker : solutions matures, testées, certifiées. Le projet n'a aucun levier différenciateur fort défini.	8	9	72		
Niche possible en drone filaire scientifique compact	Il existe peu de modèles téléopérés à faible coût capables de descendre à 200m avec qualité HD.	8	7	56	Incertitude sur le stockage et le transport du robot	Conditions de transport, de stockage, de maintenance évoquées (p.19) mais non développées concrètement.	7	8	56		

Figure 14 : Nouvelle matrice SWOT

On établit ensuite un plan d'action pour 2 éléments critiques de chaque parties de la matrice :

FORCES

1. Bonne prise en compte des contraintes physiques (pression, faune, salinité)

Plan d'action :

Pour consolider cette force, il serait pertinent **d'organiser un échange avec un océanographe ou un ingénieur de l'Ifremer** spécialisé en robotique sous-marine. Cet entretien permettrait de **valider les hypothèses faites sur les contraintes environnementales** (ex : type de courant, faune agressive, température réelle à 200m) et d'identifier d'éventuelles **zones de sous-estimation** (ex : effet de la turbidité sur les caméras, comportement d'animaux face aux LED).

Un retour d'expérience concret renforcerait **l'ancre terrain** de l'analyse déjà bien menée, et pourrait déboucher sur des recommandations d'équipements adaptés (caméras, matériaux, protections).

2. Choix techniques réalistes et argumentés

Plan d'action :

Pour aller plus loin dans la solidité de ces choix, il serait stratégique de **soumettre les solutions techniques à une revue critique avec un expert industriel ou universitaire** (ex : responsable de maintenance chez Abyssa ou Forssea Robotics).

Ce retour permettrait de **confirmer la pertinence des choix comme le titane ou la fibre optique**, mais aussi d'ouvrir à **d'autres technologies mieux adaptées** ou plus économiques.

En parallèle, une **auto-formation rapide sur la sélection de matériaux en environnement marin** (via des modules en ligne ou ressources ENSAM) permettrait à l'équipe de renforcer ses compétences sur les critères de choix (corrosion, résistance, coût, normes).

FAIBLESSES

1. Trop d'exclusions fonctionnelles

Plan d'action :

Même si certaines exclusions sont justifiées dans un avant-projet, il est indispensable de **réduire le périmètre des exclusions les plus critiques** (comme la récupération d'échantillon ou la navigation). Pour cela, on pourrait envisager une **rencontre avec un ancien porteur de projet similaire (ex : équipe précédente ENSAM)** ou un **enseignant en robotique embarquée** pour évaluer si des modules simples (ex : GPS simulé, pince motorisée) pourraient être décrits à minima.

En parallèle, il serait judicieux de **reformuler certaines exclusions en "non abordées mais ouvertes à étude complémentaire"**, ce qui renforce la crédibilité du rapport tout en gardant une rigueur réaliste.

2. Absence de chiffrage économique

Plan d'action :

Il est fortement recommandé d'**établir un premier devis estimatif même approximatif** basé sur des prix publics de composants similaires (Blue Robotics, moules titane, cartes embarquées). Pour cela, un **contact rapide avec un fournisseur ou un technicien de fablab** permettrait de collecter des prix indicatifs. En complément, une **initiation aux outils de budgétisation projet (type BOM ou table de coût pondéré)**, via tutoriels ou courte session avec un professeur de gestion de projet, permettrait à l'équipe de présenter une **projection financière même sommaire**, souvent demandée même en phase amont.

OPPORTUNITÉS

1. Marché multi acteurs (ONG, R&D, offshore, passionnés)

Plan d'action :

Pour exploiter pleinement cette diversité d'acteurs, l'équipe pourrait **organiser une série de mini-entretiens (15-20 min)** avec un représentant de chaque secteur ciblé : un chercheur en biologie marine, un technicien offshore, un utilisateur d'ONG, et un passionné de plongée.

Ces échanges permettraient de mieux comprendre **leurs attentes, priorités, freins** (ex : compacité, autonomie, interface, impact écologique). Ils pourraient aussi orienter des choix techniques ou fonctionnels sous-exploités (ex : nécessité d'un port SD externe pour passionnés).

2. Accès à des ressources open-source / brevets

Plan d'action :

Pour tirer profit des brevets listés (section 6.1.2), l'équipe peut **identifier une solution déjà brevetée (ex : support de caméra, flotteur)** et contacter l'auteur ou une communauté associée (ex : OpenROV) pour évaluer la possibilité de réutilisation ou adaptation dans un cadre pédagogique. En parallèle, une **initiation rapide aux licences open-source (MIT, GPL, CC)** ou aux plateformes comme Espacenet permettrait à l'équipe de mieux comprendre les limites de réutilisation et d'intégrer légalement des briques techniques existantes.

MENACES

1. Environnement hostile (faune, visibilité, pression)

Plan d'action :

Même si bien décrit, cet environnement doit faire l'objet d'un **atelier de scénarisation de risques** : l'équipe peut simuler 2 à 3 situations critiques (attaque d'animal, perte de visibilité, fuite) et **étudier des contre-mesures simples**.

Une **discussion avec un plongeur professionnel ou un biologiste marin** pourrait orienter sur les comportements les plus fréquents de la faune et les dispositifs non intrusifs (lumière rouge, formes non agressives, revêtements). Ce travail améliorerait la résilience du robot dès l'avant-projet, et permettrait de mieux penser ses marges de sécurité.

2. Légalité et normes techniques contraignantes

Plan d'action :

Les normes sont bien listées (ISO, AFNOR) mais peu intégrées. Une **demi-journée de formation avec un enseignant ou un responsable Qualité** sur la **lecture de normes techniques** (NF EN ISO 14040, 16665) permettrait d'**identifier les impacts réels** sur les matériaux, prélèvements, cycles de vie, etc. À l'issue, il serait utile d'**ajouter une colonne "impact normatif"** dans la **matrice de choix des solutions techniques** pour montrer que les normes sont prises en compte — même si partiellement — dans les décisions d'ingénierie.

7.4 Définition du planning prévisionnel

Le planning prévisionnel de la suite de l'étude est réalisé sous la forme d'un **diagramme de Gantt**. Ce planning ne prend en compte que les étapes qui compose l'avant-projet. A chaque tâche est associé une charge de travail en heure par personne, et les séances prévues dans l'emploi du temps n'apparaissent pas dans ce planning. Ce planning est prévu pour s'étaler sur **deux semestres à raison de maximum quarante heures par semestres par personne**. L'équipe étant composée de 5 membres, le total est de 400 heures, et chaque case du planning correspond à 6h de travail.

Le planning s'appuie notamment sur les tâches à effectuer et sur les plans d'actions expliqués précédemment.

Les jalons clés sont représentés par des losanges rouges positionnés en fin de tâche. Ils correspondent au rendu des livrables à faire valider par les parties prenantes.

Les responsables désignés sur ce planning ont pour rôle de suivre l'avancement de la tâche à laquelle ils sont assignés et de faire un rapport lors de la revue de projet.

Le planning prévisionnel est donné en figure 15 à la page suivante.

Figure 15 : Nouveau planning prévisionnel

8 Conclusion

Cet avant-projet avait pour ambition de poser les bases techniques et fonctionnelles nécessaires au développement d'un robot d'exploration sous-marin. Trois objectifs principaux ont guidé notre travail :

- Le **prédimensionnement des composants** relatifs à la **transmission de puissance**, indispensable à la propulsion et au fonctionnement du robot,
- La **détermination des capteurs** les plus adaptés pour répondre aux contraintes et exigences définies dans le **cahier des charges**,
- Le **choix d'une solution de déplacement** garantissant une **mobilité fluide et stable** dans l'environnement aquatique.

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs actions structurantes ont été menées :

- L'élaboration du **cahier des charges fonctionnel**, en suivant la **méthode de la bête à cornes**,
- Une **analyse approfondie des produits concurrents** afin d'identifier les solutions technologiques existantes,
- La réalisation d'une **matrice SWOT** et la définition d'un **planning prévisionnel** pour organiser l'avancement de l'avant-projet,
- Des recherches ciblées sur les **brevets, normes et réglementations** applicables aux systèmes sous-marins,
- La **définition du périmètre fonctionnel du sous-marin** et de son **architecture générale**,
- Le **prédimensionnement de la coque**, avec une attention particulière portée à la **contrainte équivalente de Von Mises**,
- Enfin, la **structuration de la suite de l'avant-projet** à travers des plans d'action précis.

Ce projet a également été l'occasion de surmonter certaines difficultés :

- La **définition de la fonction de service** a représenté un enjeu méthodologique complexe, qui a été résolu grâce à l'appui de **M. Salomon** après plusieurs essais,
- La **connaissance initialement limitée** du sujet a nécessité une **formation rapide et approfondie**, permettant une montée en compétence efficace sur les aspects techniques et réglementaires du projet.

Les **étapes suivantes** ont été clairement définies dans le **nouveau planning et plans d'action**. Elles incluent notamment :

- La rencontre avec de nombreux experts,
- L'élaboration d'un plan côté du robot,
- L'élaboration de maquettes numériques ou physiques pour valider les choix techniques,

Enfin, nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à M. Perinet, pour son encadrement tout au long de cette première phase du projet ainsi qu'à M. Salomon, responsable du bureau d'études, dont les conseils techniques ont été particulièrement précieux pour orienter nos choix méthodologiques.

Annexe 1 : Documents annexe

Fiches techniques des robots concurrents :

BlueROV2 : <https://www.nauticexpo.fr/prod/bluerobotics/product-69617-586312.html>

Chasing M2 Pro : <https://shop.prodrones.fr/chasing-innovation/1450-drone-sous-marin-chasing-m2-pro-6971636380504.html>

Deep Trekker DTG3 : <https://www.deep trekker.com/fr/products/underwater-rov/dtg3>

Planning prévisionnel de l'avant-projet :

Planning prévisionnel V3.xlsx

Sources des produits concurrents :

OpenROV : [fr.wikipedia.org+1fr.wikipedia.org+1](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=OpenROV&oldid=105005111)

Ulyx : [ifremer+2meretmarine.com+2ifremer+2](https://ifremer.fr/ulyx/)

DEPTHX : [fr.wikipedia.org](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=DEPTHX&oldid=105005111)

REMUS : [fr.wikipedia.org](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=REMUS&oldid=105005111)

Forssea : [ifremer](https://ifremer.fr/forssea/)

Recherche de l'existant

Caméra HD ET éclairage LED ET capteur de luminosité automatique OU caméra thermique ou infrarouge :
[EP3271786B1 - Equipment for assisting underwater exploration and underwater robot for the equipment - Google Patents](https://www.googlepatents.com/patent/EP3271786B1)

Capteurs de pression, température, salinité et de PH ET coque renforcée en titane pour résister à la pression OU coque renforcée en plastique dur pour résister à la pression :

[WO2013050051A1 - Subsea retrievable pressure sensor - Google Patents](https://www.googlepatents.com/patent/WO2013050051A1)

[WO2024004375A1 - Probe for deep temperature measurement and deep thermometer - Google Patents](https://www.googlepatents.com/patent/WO2024004375A1)

Boîtier en silicone contenant un SSD OU structure reliée par des supports souples (ressorts, élastomères...) OU mousse absorbante OU gel amortissant :

[EP0541902B1 - Rubber mount - Google Patents](https://www.googlepatents.com/patent/EP0541902B1)

[EP4077964A4 - Multistructural shock absorbing system for anatomical cushioning - Google Patents](https://www.googlepatents.com/patent/EP4077964A4)

Boîtier étanche : coque en aluminium anodisé OU titane OU résine OU joints toriques :

[WO2001057980A1 - Waterproof enclosures - Google Patents](https://www.googlepatents.com/patent/WO2001057980A1)

[US7362570B2 - Water-proof housing for electronic equipment - Google Patents](https://www.googlepatents.com/patent/US7362570B2)

[US4489770A - Waterproof enclosure - Google Patents](https://www.googlepatents.com/patent/US4489770A)

[CN101255290B - Marine reinforced concrete anticorrosion paint and preparation method thereof - Google Patents](https://www.googlepatents.com/patent/CN101255290B)

Peinture résistante à la corrosion OU traitement anticorrosion type époxy marine :

[CN101255290B - Marine reinforced concrete anticorrosion paint and preparation method thereof - Google Patents](#)

Système de déshumidification (gel de silice) OU ventilation interne avec séchage d'air ET capteur d'humidité OU joints toriques :

[FR2947417A1 - ELECTRONIC DEVICE COMPRISING A MOISTURE ADSORPTION DEVICE - Google Patents](#)

[WO2019117732A1 - A dehumidification system and method - Google Patents](#)

Coque cylindrique renforcée OU coque en alliage de titane OU structure multicouche :

[WO2013154484A1 - Marine hull and marine vessel - Google Patents](#)

Hélices orientables OU jet d'eau orientables :

[EP1716040A2 - Dynamic stabiliser for a boat provided with a stabilising device and the thus produced boat - Google Patents](#)

Ailerons stabilisateurs OU propulseurs latéraux :

[EP1716040A2 - Dynamic stabiliser for a boat provided with a stabilising device and the thus produced boat - Google Patents](#)

Ballast OU masse mobiles pour la flottabilité OU mousses :

[EP1606159B8 - Buoyancy method and device for stabilizing and controlling lowering or raising of a structure between the surface and the sea floor - Google Patents](#)

Système gyroscopique :

[US2586469A - Gyroscopic stabilizing apparatus - Google Patents](#)

Liaisons par câble optique OU câbles blindés OU câbles torsadés OU câbles électrifiés :

[CA2382720C - High speed data cable having individually shielded twisted pairs - Google Patents](#)

Prédimensionnement :

Voir les pages suivantes

Détermination de la contrainte équivalente de Von Mises pour un cylindre épais

On considère un cylindre épais, de rayon intérieur R_i et de rayon extérieur R_e , soumis à une pression intérieure p_i et une pression extérieure p_e . On souhaite déterminer la contrainte équivalente de Von Mises en fonction des rayons et des pressions.

1. Équation d'équilibre radiale

En coordonnées cylindriques, pour un état axisymétrique (pas de variation en θ , ni en z) et sans cisaillement, l'équation d'équilibre est :

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

2. Solution générale de σ_r et σ_θ

La solution générale de cette équation est :

$$\sigma_r(r) = A - \frac{B}{r^2} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta(r) = A + \frac{B}{r^2} \quad (3)$$

avec A et B des constantes à déterminer grâce aux conditions aux limites.

3. Conditions aux limites

À $r = R_i$:

$$\sigma_r(R_i) = -p_i \quad (4)$$

À $r = R_e$:

$$\sigma_r(R_e) = -p_e \quad (5)$$

4. Calcul de A et B

On résout le système :

$$A - \frac{B}{R_i^2} = -p_i \quad (6)$$

$$A - \frac{B}{R_e^2} = -p_e \quad (7)$$

Soustrayons les deux :

$$-\frac{B}{R_i^2} + \frac{B}{R_e^2} = -p_i + p_e \quad (8)$$

$$B \left(\frac{1}{R_e^2} - \frac{1}{R_i^2} \right) = p_e - p_i \quad (9)$$

On obtient :

$$B = \frac{p_e - p_i}{\frac{1}{R_e^2} - \frac{1}{R_i^2}} = (p_e - p_i) \frac{R_i^2 R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \quad (10)$$

Ensuite :

$$A = -p_i + \frac{B}{R_i^2} \quad (11)$$

$$A = -p_i + \frac{1}{R_i^2} \left((p_e - p_i) \frac{R_i^2 R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \right) \quad (12)$$

$$A = -p_i + (p_e - p_i) \frac{R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \quad (13)$$

$$A = -\frac{p_e R_e^2 - p_i R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \quad (14)$$

5. Contrainte de Von Mises (sans contrainte axiale)

La contrainte de Von Mises est donnée par :

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_r^2}{2}} \quad (15)$$

Si $A = 0$ (pression extérieure uniquement) :

$$\sigma_r(r) = -\frac{B}{r^2} \quad (16)$$

$$\sigma_\theta(r) = +\frac{B}{r^2} \quad (17)$$

Calculons :

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \frac{2B}{r^2} \quad (18)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{B^2}{r^4}, \quad \sigma_r^2 = \frac{B^2}{r^4} \quad (19)$$

Substitution :

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(2B/r^2)^2 + B^2/r^4 + B^2/r^4}{2}} \quad (20)$$

$$= \sqrt{\frac{4B^2/r^4 + B^2/r^4 + B^2/r^4}{2}} \quad (21)$$

$$= \sqrt{\frac{6B^2/r^4}{2}} \quad (22)$$

$$= \sqrt{\frac{3B^2}{r^4}} \quad (23)$$

$$= \sqrt{3} \frac{B}{r^2} \quad (24)$$

6. Remplacement de B

On avait :

$$B = (p_e - p_i) \frac{R_i^2 R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \quad (25)$$

Si $p_i = 0$ et $p_e = P$:

$$B = \frac{R_i^2 R_e^2 P}{R_e^2 - R_i^2} \quad (26)$$

Finalement :

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3} \frac{B}{r^2} = \sqrt{3} \frac{R_i^2 R_e^2 P}{r^2 (R_e^2 - R_i^2)} \quad (27)$$
