

IMT Atlantique

PRONTO - Projet ingénieur dans un monde en Transitions

Technopôle de Brest-Iroise - CS 83818

29238 Brest Cedex 3

Téléphone : +33 (0)2 29 00 13 04

Télécopie : +33 (0)2 29 00 10 12

URL : www.imt-atlantique.fr



Rapport de projet - GROUPE 83

Pronto - parcours ingénieur A1 FISE

PROJET ABYSSE : NOTRE VERSION DU DRONE SOUS-MARIN

Destinataires : François Le Pennec, Bernard Abiven, Magalie Le Gall, Jérémie Héremy, Charlotte Langlais

Relecteurs : Antonin Polette, Gautier Pauliat, Emilien Wolff

Date d'édition : 20 mai 2025



IMT Atlantique

Bretagne-Pays de la Loire

École Mines-Télécom

Thomas BRUYERE

B1 2/4

Pierre GONOT

B2 3/4

Antonin POLETTE

B2 3/4

Gautier PAULIAT

B1 4/4

Saad-Eddine KHAZARI

B2 3/4

Emilien WOLFF

B2 3/4

Tuteur : François LE PENNEC

Sommaire

Remerciements	6
1. Présentation du projet et cahier des charges	7
1.1. Contexte	7
1.1.1. Contexte du projet	7
1.1.2. L'équipe	7
1.2. Introduction au projet ingénieur	8
1.2.1. Plan d'attaque	8
1.2.2. Documentation et recherches initiales	8
1.2.3. Cahier des charges du projet	9
2. Conception	10
2.1. Choix de la chaîne électromécanique	10
2.2. Partie mécanique	11
2.2.1. Dimensionnement général	11
2.2.2. Conception assistée par ordinateur	12
2.3. Partie électronique	17
2.3.1. Carte électronique	17
2.3.2. Les différents types de signaux	17
2.3.3. Alimentation de l'électronique du sous-marin	19
2.3.4. Propulsion du sous-marin	21
2.3.5. Immersion du sous-marin et asservissement de l'assiette	22
2.3.6. Gestion de la direction du sous-marin	22
2.3.7. Transmission de signaux	23
2.3.8. Radiocommande	24
2.3.9. Circuits électriques	24
3. Réalisation, développements et tests unitaires	27
3.1. Ordre et dépendance des opérations	27
3.2. Réalisations pratiques	27
3.2.1. Impressions 3D	27
3.2.2. Gouvernails et direction	30
3.2.3. Câblages	30
3.2.4. Test composants	31
3.2.5. Calibrage	31
3.2.6. Transmission radio	32
4. Intégration, tests et validation	33
4.1. Assemblage	33
4.1.1. Environnement de travail	33
4.1.2. Méthodologie de montage	34
4.1.3. Câblage et soudures	34
4.1.4. Autres usinages	35
4.2. Tests et résultats	36
4.2.1. Tests d'étanchéité de l'ensemble	36
4.2.2. Test de l'asservissement et du remplissage des ballasts	36
5. Communication : réalisation de notre site internet	38
5.1. Objectifs du site internet	38
5.2. Conception du site	38
5.2.1. Choix de l'architecture	38
5.2.2. Contenus préparés	39

5.3. Réalisation technique	39
5.3.1. Technologies utilisées	39
5.3.2. Hébergement	40
6. Retour d'expérience et axes d'améliorations	41
6.1. Gestion de projet	41
6.1.1. Retour d'expérience sur la gestion de projet	41
6.1.2. Axes d'amélioration de la gestion de projet	43
6.2. Travail d'équipe	44
6.2.1. Retour d'expérience sur le travail d'équipe	44
6.2.2. Axes d'amélioration du travail en équipe	46
7. Conclusion	47
7.1. Résultats	47
7.2. Rapport à l'objectif	48
7.3. Perspectives	48
7.3.1. Étanchéité	48
7.3.2. Bouée et ligne de vie	48
7.3.3. Caméras	48
7.3.4. Prévention de la rouille	48
7.4. Nos impressions	49
Annexes	50
Annexe 1 – Exemple de dessin technique tracé sur <i>Fusion 360</i>	51
Annexe 2 – "Ampacity" of battery metal strips	52
Annexe 3 – Exemple de requête I2C [10]	53
Annexe 4 – Retour d'expérience - Bruyère Thomas	54
Annexe 5 – Retour d'expérience - Polette Antonin	55
Annexe 6 – Retour d'expérience - Pauliat Gautier	56
Annexe 7 – Retour d'expérience - Gonot Pierre	57
Annexe 8 – Retour d'expérience - Khazari Saad	58
Annexe 9 – Retour d'expérience - Wolff Emilien	59
Références	60

Liste des figures

1.1. Projet Kosmos : une caméra étanche de surveillance sous marine	7
1.2. Sous marin DIY en Lego avec ajustement mécanique de l'assiette	8
2.1. Schéma bloc de l'asservissement du sous-marin	10
2.2. Disque	11
2.3. Photo BEC (Bassin d'Essais des Carènes)	11
2.4. Moteur brushless choisi de 750KV	12
2.5. Capture du modèle 3D du sous marin fait sous <i>Fusion 360</i> (Autodesk)	12
2.6. Coupe des gouvernails et tringlerie	13
2.7. Débattement mesurable sur CAO et permis par les servomoteurs	13
2.8. Schéma du problème	14
2.9. Positions des centres de masse	14
2.10. Vue de coupe des solutions de jointage	14
2.11. Solutions de jointage dans la CAO	15
2.12. Exemple de module : ballasts	15
2.13. Potentiomètre de 128 mm	16
2.14. Coupe de la partie seringue	16
2.15. Carte Arduino Uno R4	17
2.16. Signal analogique et signal numérique	17
2.17. Fonctionnement d'un signal PWM	18
2.18. Comment les différencier ?	18
2.19. Attention aux changements d'états	18
2.20. La clock pour synchroniser	19
2.21. Cellules INR18650 3500 mAh choisies	20
2.22. BMS 18650 3s 40A	20
2.23. Schéma électrique du lien batterie / BMS	20
2.24. Schéma électrique de la batterie sur son support d'un côté et de l'autre	21
2.25. Bande de nickel	21
2.26. Moteur brushless 750 KV choisi	22
2.27. Contrôleur moteur ESC 30 A choisi	22
2.28. MPU 6050	22
2.29. Intérieur d'un servomoteur	22
2.30. Schéma du principe de fonctionnement de la transmission de l'information entre le sous-marin et l'utilisateur	23
2.31. Diagramme de séquence.	23
2.32. Radio commande FlySky i6	24
2.33. Récepteur FlySky FS-iA10B	24
2.34. Circuit électrique du moteur brushless	24
2.35. Circuit électrique des moteurs pour les ballasts	24
2.36. Schéma électrique des potentiomètres et du CAN	25
2.37. Centrale inertielle	25
2.38. Schéma électrique des servomoteurs	25
2.39. Kit caméra de drone FPV	26
2.40. Circuit électrique complet du sous-marin	26
3.1. Étagement du projet	27
3.2. Test au Dellec	27
3.3. Disques imprimés	28
3.4. Exemple de certains disques (à gauche, celui supportant le contrôleur moteur, éloigné de la surface par des entretoises elles aussi imprimées et à droite, celui tenant l'Arduino)	28
3.5. Ogive arrière, sortie d'imprimante	28
3.6. Soudeuse par points Dcreate 756	29
3.7. Soudage par point à gauche et soudage classique à droite	29

3.8. Avant et arrière de la batterie assemblée	29
3.9. Chauffage d'une gaine thermorétractable à l'aide d'un pistolet à air chaud	29
3.10. Usinage sur fraiseuse des axes et montage sur les gouvernails	30
3.11. Intérieur de l'ogive arrière	30
3.12. Câble coaxial final	30
3.13. Installation du connecteur SMA Male	31
3.14. Banc de test	31
3.15. Offsets mpu	31
3.16. Calibrage mpu et can	31
3.17. Coefficient de réflexion (s_{11}) des antennes	32
3.18. Coefficient de transmission (s_{12}) des câbles	32
4.1. Table de montage dans l'atelier mécanique de IMT Atlantique et machine d'usinage	33
4.2. Rangement des composants	34
4.3. Électronique assemblée	34
4.4. Câblage sur sous marin	35
4.5. Découpe à la scie des lests	35
4.6. Découpe laser de la fenêtre de caméra	35
4.7. Tests en bac	36
4.8. Montage de test pour le remplissage des ballasts	37
5.1. Capture d'écran du site	38
5.2. Partie sur le fonctionnement du sous-marin	39
5.3. Modélisation 3D sur Blender	39
5.4. Déploiement sur Netlify grâce à Github	40
6.1. Gantt initial	41
6.2. Gantt mi-projet	42
6.3. Gantt final	42
6.4. Organisation du groupe Mattermost Projet Aysse avec 8 canaux	44
6.5. Exemple d'organisation lors d'une séance	45
7.1. Notre sous-marin	47
7.2. L'équipe 83 PRONTO de gauche à droite : Saad, Gautier, Pierre, Thomas, Antonin et Emilien	49

Liste des tableaux

1.1. Tableau des fonctionnalités, avec leur(s) critère(s) de valeur, leur niveau(x), leur flexibilité et leur priorité. FP : fonction principale, FS : fonction secondaire, FC : fonction de contraintes.	9
2.1. Groupe fonctionnel des modules du sous-marin	15
2.2. Comparaison des deux types de moteur	21

Remerciements

Avant de vous présenter le fruit de quasiment 5 mois de travail avec l'équipe PRONTO, nous tenions en tant que préambule à remercier certaines personnes pour leur accompagnement et leur aide précieuse durant tout le projet.

Nous pensons immédiatement à Bernard Abiven, qui s'est avéré un vrai mentor durant le projet tant par la mise à disposition de machines d'usinages indispensables pour le projet, que pour les conseils techniques précieux. L'atelier fut utilisé à de multiples reprises, et M. Abiven était à chaque fois disponible pour nous aider et nous conseiller. D'autre part, il nous a fourni beaucoup de matière première pour les usinages (tiges métalliques, tube en plexiglas, rond d'acier, silicone, ...). Nous le remercions de ce geste, puisque le budget fut restreint pour ce projet. Il nous a permis d'atteindre une qualité de finition du sous-marin excellente et précise, proche de nos attentes.

Merci également à François Le Pennec, notre tuteur, pour son suivi régulier et la mise en relation avec le personnel de IMT Atlantique utile pour le projet. Merci pour ses conseils et ses retours de livrables.

De fait, nous tenons également à remercier Jérémie Hemery pour ses explications précieuses et pour nous avoir laissé utiliser l'analyseur de réseau du département micro-ondes, mais aussi Magali Le Gall pour nous avoir fourni le matériel nécessaire pour accomplir nos tests.

Sur un plan plus personnel, merci également à Richard et Stéphanie Polette pour nous avoir invité le temps d'une soirée et nous avoir donné l'opportunité de tester notre sous-marin sous conditions contrôlées.

Pour les câbles et connecteurs SMA, nous tenons à remercier Christophe Wolff, père de Emilien, et ingénieur R&D chez *Alcatel Lucent Enterprise* qui nous a mis en relation avec les bons services et a permis de nous fournir le câble.

L'ÉQUIPE 83 PRONTO

Présentation du projet et cahier des charges

1.1. Contexte

1.1.1. Contexte du projet

Les récifs coralliens, véritables joyaux de la biodiversité marine, abritent environ 25% des espèces marines tout en ne couvrant que moins de 1% de la surface des océans. Pourtant, ces écosystèmes essentiels sont aujourd'hui en grand danger. La pollution humaine (déversements plastiques, produits chimiques, eaux usées) et le dérèglement climatique (acidification des océans, élévation de la température de l'eau) menacent directement leur survie. Selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), près de 50% des récifs coralliens mondiaux sont déjà considérés comme gravement dégradés, et d'ici 2050, 90% pourraient être en danger si rien n'est fait.

Face à cette urgence, il devient crucial pour les communautés locales et les organisations de protection de l'environnement de réaliser une surveillance régulière et fine des fonds marins pour anticiper, comprendre et atténuer ces menaces. Un projet particulièrement inspirant pour nous a été le projet *Kosmos*, présenté en [FIGURE 1.1](#). C'est dans ce contexte qu'émerge notre projet de drone sous-marin maniable. En effet, ce dernier est pensé pour être léger, à faible coût et pour être déployé facilement dans des zones récifales fragiles. Bien que ce prototype soit encore en phase de développement, il laisse entrevoir un potentiel important : celui de démocratiser la surveillance environnementale en la rendant accessible à des chercheurs, associations ou gestionnaires de réserves naturelles, même avec des moyens limités.



FIGURE 1.1 – Projet Kosmos : une caméra étanche de surveillance sous marine

En renforçant ce système – par exemple avec une autonomie étendue ou des capteurs environnementaux – ce drone pourrait devenir un **outil de proximité efficace** pour protéger les récifs, en permettant une observation continue, non intrusive et réactive des milieux marins.

C'est comme cela que le projet a été pensé et lancé !

1.1.2. L'équipe

Nous sommes un groupe de 6 amis et nous partageons la même envie : celle d'être mis au défi par un projet ambitieux, passionnant et stimulant. Nous partageons tous les 6 les mêmes valeurs du point de vue de l'éthique de travail. Par conséquent, nous avons pu compter sur chacun des membres pour faire avancer ce projet continuellement.

Ce projet étudiant a la particularité de ne pas être issu d'une demande extérieure car nous avons choisi nous même notre projet. Plusieurs facteurs nous ont motivés à nous aventurer dans la conception de ce drone sous-marin : la proximité de IMT Atlantique avec l'océan, la pluridisciplinarité de ce projet et la source de motivation que représente ce challenge. En effet, nous cherchions un projet nous permettant de nous dépasser, d'acquérir des compétences et qui soit cohérent avec l'environnement de l'école et les spécialités techniques de l'école.

1.2. Introduction au projet ingénieur

C'est de ce constat qu'est né le PROJET ABYSSE : imaginer, concevoir et réaliser notre propre drone sous-marin, et aller jusqu'aux outils de sa promotion.

Dans le cadre de l'unité d'enseignement PRONTO, la flexibilité des sujets étudiants était le **moyen rêvé de concrétiser cette idée**.

Le présent projet ingénieur de la mission PRONTO vise à l'élaboration d'un drone sous-marin. Dans le contexte maritime présent aux abords de l'école, un tel outil est justifiable pour la surveillance des fonds marins. De plus, l'élaboration d'un tel projet en groupe de 6 nécessite diverses compétences relatives à l'organisation d'un projet, les problématiques de systèmes embarqués, électronique et télécommunication, domaines fortement inscrits dans la formation de l'école d'ingénieur IMT Atlantique.

1.2.1. Plan d'attaque

Ainsi, nous nous sommes réunis et avons pensé et imaginé un plan de conception puis de réalisation d'un tel drone, qui a d'ailleurs été guidé par les jalons imposés lors du projet.

Nous cherchons alors successivement à :

1. Poser le cahier des charges du projet, dimensionner et commander les pièces et composants
2. Imaginer l'implémentation des composants dans le système, par la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) 3D
3. Créer des circuits électroniques sur mesure et les programmer
4. Usiner ou produire toutes les pièces nécessaires puis les monter
5. Tester le système en conditions idéales puis réelles.

1.2.2. Documentation et recherches initiales

Lors des premières réunions visant à l'élaboration d'un cahier des charges du projet dans lequel nous nous lançons, nous avons commencé à réaliser diverses recherches au sujet des drones sous-marins télécommandés.

Tout d'abord, nous avons besoin de comprendre comment fonctionnait un sous-marin : quel principe physique permet à un sous-marin de flotter ou couler ? Quel mécanisme permet la gestion précise de la profondeur de plongée d'un sous-marin ? Ces premiers questionnements ont été éclaircis notamment par l'archive 1 du site gouvernemental de la défense qui explique la plongée d'un tel engin.



FIGURE 1.2 – Sous marin DIY en Lego avec ajustement mécanique de l'assiette

Nous nous sommes très rapidement penchés sur plusieurs vidéos *Youtube*, dont la très inspirante vidéo [2], qui détaille beaucoup d'aspects techniques de la réalisation pratique d'un drone sous-marin. D'autres vidéos ont aussi pu nous aider à imaginer des solutions techniques pour l'étanchéité et la transmission de données (radiocommande et transmission vidéo), notamment la vidéo [3] et les deux épisodes d'une même chaîne [4] et [5]. Pour la division du projet en différentes parties, nous nous sommes appuyés sur [6], un autre projet de construction d'un sous-marin télécommandé. Le site [6] rend compte de toutes les étapes nécessaires au projet, tant dans la partie modélisation que dans la partie assemblage.

Toutes ces sources documentaient bien l'électronique embarquée et nous ont permis de l'adapter à notre cahier des charges.

L'objectif ici était essentiellement de nous faire une idée du niveau de difficulté que nous aurions à rencontrer. Pour le dimensionnement de la batterie, nous avons aussi eu besoin d'une documentation plus pointue sur le sujet. Nous nous sommes aidés de la vidéo [7], qui détaille à la fois le dimensionnement d'une batterie à partir de cellules et l'assemblage pratique de celle-ci par la méthode de soudage par point. Enfin, dans l'objectif de faire fonctionner le moteur brushless (synchrone), nous avons cherché beaucoup de ressources. La plus complète d'entre elles est le site web [8], qui explique le fonctionnement du moteur et la manière de programmer la carte *Arduino* pour le faire fonctionner.

1.2.3. Cahier des charges du projet

A partir de toutes ces recherches documentaires, nous pouvons alors établir notre objectif, qui va nous guider tout au long de la conception et de la fabrication du drone :

OBJECTIF

Conceptualiser un drone sous-marin qui remplit les fonctions suivantes :

1. Piloter le sous marin à distance et le contrôler (profondeur et déplacement) de manière précise et sans fils
2. Transmettre une vidéo en direct à l'utilisateur. Nous prévoyons donc une bascule entre deux flux vidéo : l'un vers l'avant pour le pilotage et l'autre vers le fond pour l'observation

Nous avons dès lors posé dans la [TABLE 1.1](#) le cahier des charges associé à ces exigences.

Fonction	Critère(s)	Niveau(x)	Flexibilité	Priorité
FP1 – Explorer les fonds marins	Profondeur	0 à 5m	±2m	1
	Autonomie de la batterie interne	30min	Moyenne	
	Longueur du câble	10m	Min	
FP2 – Transmettre une vidéo en direct	Résolution	720p, 10fps min	Moyenne (pour maintenir un coût raisonnable)	1
	Latence	200ms	Faible	
FC1 – Résister à la pression de l'eau	Étanchéité	Jusqu'à 2m de profondeur	Nulle	1
FC2 – Maintenir la stabilité dans l'eau	Déviation angulaire horizontale maximale	Déviation faible sous courant modéré	Moyenne	2
FS1 – Transportabilité	Masse	Moyenne	Facile à transporter & à mettre à l'eau	3

TABLE 1.1 – Tableau des fonctionnalités, avec leur(s) critère(s) de valeur, leur niveau(x), leur flexibilité et leur priorité. FP : fonction principale, FS : fonction secondaire, FC : fonction de contraintes.

Chapitre 2

Conception

PRÉAMBULE

Avant de commencer à coder, souder ou même imprimer en 3D, il faut bien évidemment penser le sous marin et son principe de fonctionnement. Après plusieurs observations sur des modèles trouvés sur le marché, deux points retiennent particulièrement notre attention

- L'**équilibre** du sous marin qui reste à prendre en compte en cas de courant ou de vagues qui nécessite une gestion précise de l'assiette identifié grâce à [3].
- L'**étanchéité** du sous marin qui doit être parfaite pour permettre aux composants de ne pas prendre l'eau.

Ainsi, nous décidons d'y implanter un **asservissement en assiette** et un système de **jointage performant**.

2.1. Choix de la chaîne électromécanique

Nous pouvons dans un premier temps proposer ce premier schéma bloc permettant de résumer les fonctions des différents composants pour implanter l'asservissement en assiette (noté θ_{SM}), avec les fonctions associées.

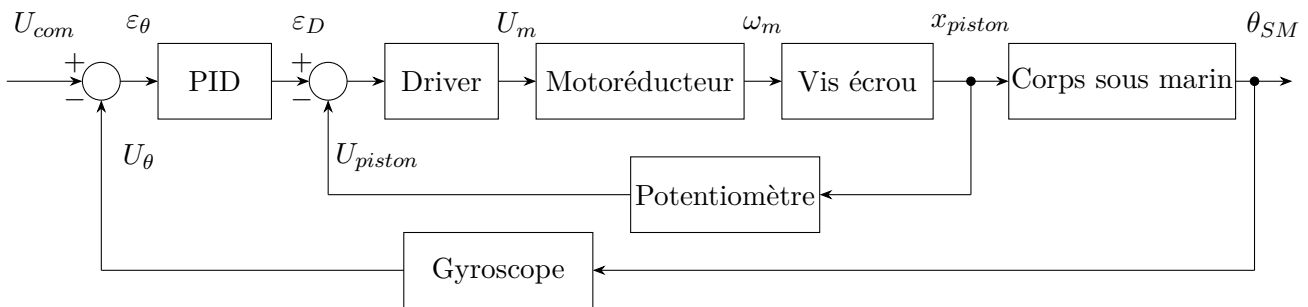


FIGURE 2.1 – Schéma bloc de l'asservissement du sous-marin

U_{com} est ici la tension de consigne produite par les impulsions issues du récepteur de la télécommande, image de la position d'un potentiomètre de la radiocommande. Cette tension est comparée à la tension U_{θ} produite par le gyroscope liée linéairement à l'angle d'assiette.

La carte *Arduino* implémente le comparateur, le correcteur Proportionnel Intégral Dérivé (PID) et produit la tension PWM (dont le principe est expliqué en [Section 2.3.2.1](#)) qui commande les motoréducteurs. Ceux-ci vont traduire les pistons des seringues ballasts par le biais d'un système vis/écrou produisant un déséquilibre de masse avant/arrière qui se traduit par un changement de l'angle θ_{SM} du sous marin.

Ce contrôle d'angle permet également au sous-marin d'effectuer une plongée plus efficace en l'inclinant dans la direction voulue, afin que la propulsion se fasse dans l'axe de la direction

Dans les sections suivantes, nous détaillerons et justifierons donc le choix des composants et leurs dimensionnements, avant leur implantation.

2.2. Partie mécanique

Même si les parties sont présentées de façon distinctes, il est évident que mécanique et électronique ont été conçues pour s'intégrer parfaitement et tenir compte des contraintes de chacune. De plus, il en est de même pour la CAO des pièces qui a évidemment dû tenir compte de la capacité à les fabriquer par la suite avec les machines et le matériel disponible.

2.2.1. Dimensionnement général

2.2.1.1. Taille du sous-marin

Pour définir la taille globale du sous-marin, il a fallu trouver un compromis entre la transportabilité et la capacité à tenir une direction en mer dans des courants. Comme le sous marin est à la limite de la flottabilité, son poids sera équivalent à son rapport en eau, donc de volume $V_{SM} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

La masse envisageable pour être transportable serait donc d'environ 15 kg. Notre idée initiale était de partir sur un tube de $\varnothing 128 \text{ mm}$, ce qui nous conduit à une longueur de

$$\ell_{SM} = \frac{V_{SM}}{S_{tube}} = \frac{V_{SM}}{\pi D^2/4} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{\pi (128 \cdot 10^{-3})^2/4} = \boxed{1,15 \text{ m}} \quad (2.1)$$

Cette première approximation permet de se rendre compte que c'est utilisable. La longueur réelle sera légèrement supérieure à cause de la forme d'ogive des extrémités qui ferment le tube.

2.2.1.2. Modules internes

Suite aux exigences du projet, il s'est avéré pratique tant pour la fabrication que l'assemblage de compartimenter les fonctions au sein d'une structure basée sur des tiges filetées dans le sens longitudinal qui maintiennent des disques dans le sens transversal, eux même supports des composants réalisant les fonctions.

La [FIGURE 2.2](#) montre un exemple modélisé qui contient donc des percages pour les batteries, pour les tiges filetées mais aussi des inserts filetés qui permettront de fixer les composants dont nous parlerons plus tard.

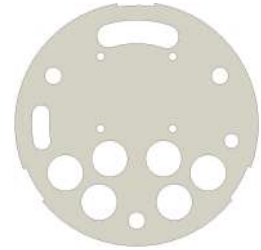


FIGURE 2.2 – Disque

2.2.1.3. Liaison à la commande



Le détail de la problématique de la transmission est donnée à la [Section 2.3.7](#). Toutefois, la difficulté de transmettre les ondes radio dans l'eau nous a amené à devoir conduire les ondes radio générées dans le module du sous-marin jusqu'à la surface où se trouvent les antennes. Il fallait donc intégrer des connecteurs de traversée de paroi étanches.

De plus, le câble traîné devait interférer le moins possible avec la direction prise par le sous marin et surtout avec les gouvernails et l'hélice. Il a donc été décidé de positionner ces connecteurs de traversée de part et d'autre du corps, alignés sur la gouverne de profondeur. L'idée de base est que ces câbles suivraient l'axe du sous-marin lors de sa progression pour ensuite progressivement se courber et atteindre la surface.

2.2.1.4. Propulsion mécanique

La partie propulsion est particulièrement problématique : le dimensionnement d'une hélice dans l'eau est une technique particulière et nécessite une attention spécifique.

Si nous considérons l'eau comme un fluide incompressible, la rotation d'une hélice dont les pales sont inclinées formant un pas, au même titre que le pas d'une vis, permet l'avancement de cette hélice d'une quantité liée à l'angle de rotation et au pas suivant la formule

$$x = p \times N \quad \text{avec } p \text{ le pas en mm/tr, et } N \text{ le nombre de tours} \quad (2.2)$$

En divisant cette expression par le temps, nous obtenons :



FIGURE 2.3 – Photo BEC (Bassin d'Essais des Carènes)

$$v = p \times \omega \quad (2.3)$$

avec v la vitesse d'avance du sous-marin et ω le taux de rotation de l'arbre d'hélice.

Même si la vitesse v ne figure pas comme une exigence stricte de notre cahier des charges, nous allons considérer qu'une vitesse correspondant à l'avance d'une personne marchante est un bon objectif sous l'eau, soit environ $v = 5 \text{ km/h}$.

Le choix du moteur est possible via le paramètre KV¹ donné dans les spécifications des catalogues. Celui-ci représente le nombre de tr/min pour 1 V d'alimentation. Du côté de l'hélice, le choix du pas est relativement restreint dans les catalogues. L'hélice choisie a un pas de $p = 1.4 \text{ cm}$



FIGURE 2.4 – Moteur brushless choisi de 750KV

La vitesse d'avance étant de $v = 5 \text{ km/h}$, soit $1,4 \text{ m/s}$, nous en déduisons que le taux de rotation doit être de

$$\omega = \frac{1,4}{0,014} = 100 \text{ tr/s} = 6000 \text{ tr/min} \quad (2.4)$$

En considérant qu'en réalité, il y a toujours un glissement de l'hélice dans l'eau, nous prévoyons une vitesse de rotation supérieure que nous fixerons autour des 25 %. Nous choisissons un moteur capable de tourner au moins à 7500 tr/min sous 12 V, ce qui correspond à un KV de $7500/12 = 625 \text{ KV}$. Dans le choix disponible sur le site, la valeur la plus proche était de 750 KV , visible sur la FIGURE 2.4.

Plus haut nous avons pris l'hypothèse que le fluide était incompressible, ce qui en réalité n'est pas vrai. Il y a notamment un phénomène qui pose problème dans l'eau visible sur la FIGURE 2.3 : la cavitation. La pale de l'hélice a un profil qui s'apparente à une aile d'avion et dont le principe est de provoquer une baisse de pression dynamique sur l'une des faces, générant ainsi la force qui fait avancer le sous-marin. Cette dépression peut atteindre le point de changement de phase liquide/vapeur, générant ainsi des bulles qui apparaissent à la surface de l'hélice, et qui ont 3 effets : érosion de l'hélice, turbulence du flux donc perte d'efficacité de l'hélice et génération de bruit qui se propage dans l'eau.

Nous n'avons pas pris le temps de déterminer les conditions d'une telle cavitation, nous tenterons de l'observer pendant les tests.

2.2.2. Conception assistée par ordinateur

Après une vingtaine d'heures de modélisation sous *Fusion 360*, nous obtenons finalement une conception complète et propre. Elle regroupe d'ailleurs des liaisons mécaniques permettant notamment d'imaginer les mouvements possibles avec les servomoteurs que nous détaillerons dans les parties suivantes.

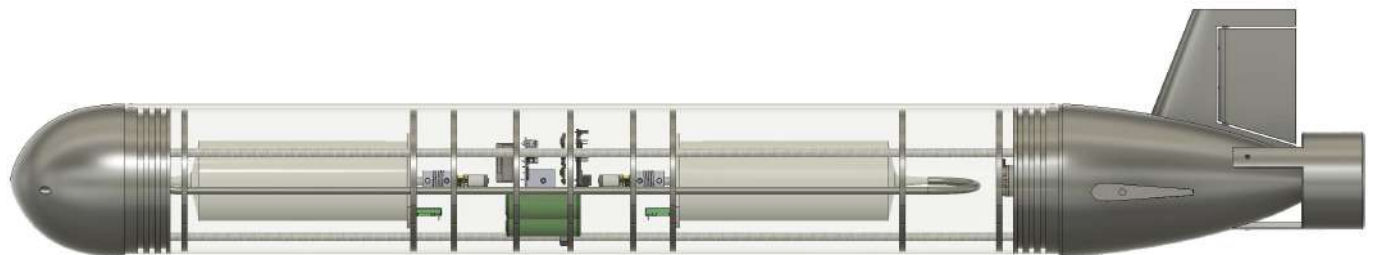


FIGURE 2.5 – Capture du modèle 3D du sous marin fait sous *Fusion 360* (Autodesk)

La CAO était pour nous un incontournable. Elle permet :

- un placement précis et une simulation mécanique des liaisons pour garantir un fonctionnement en dynamique
- une visualisation qui simplifie la conception sans avoir besoin de maquetter
- un paramétrage qui permet d'avoir un modèle qui se reconstruit automatiquement en cas de changement de cote, produisant ainsi immédiatement les pièces prêtes à la fabrication

1. Rien à voir avec les kV, ce n'est pas une tension !

- la communication de l'avancement du projet par le biais de vues de synthèse sous *Blender*. Nous en reparlerons dans la [Section 5.3.1.2](#)
- la production de plans 2D permis par le module de tracé du logiciel, avec cotation intelligente et convention d'écriture. Nous pourrions retrouver en [ANNEXE 1](#) un exemple de tels plans.

Dans les sous-sections suivantes, nous vous présentons les parties fonctionnelles principales traitées en CAO.

2.2.2.1. Direction

Pour diriger le sous marin, plusieurs solutions se présentent à nous.

- (1) Implanter 4 pompes, 2 à l'avant et 2 à l'arrière qui expulsent de l'eau dans la direction opposée à celle voulue.
- (2) Comme dans les vrais sous-marins, des gouvernails qui orientent le flux et produisent une force perpendiculaire à l'avancement faisant pivoter le sous-marin.

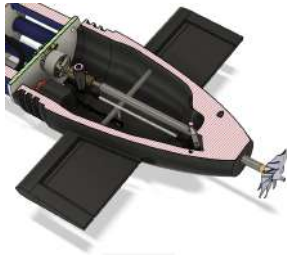


FIGURE 2.6 – Coupe des gouvernails et tringlerie

Compte tenu de l'absence de budget et compte tenu des sommes que nous avons pu récolter au sein du groupe, le choix s'est naturellement tourné vers la proposition (2). Il a cependant fallu imaginer une mécanique complète visible en [FIGURE 2.6](#) et qui peut être montée sous la coque, à l'intérieur de l'ogive arrière avec suffisamment de débattement pour être efficace.

Comme dans les modèles réduits, nous optons pour des servomoteurs qui sont décrits en [Section 2.3.6](#). Ceux-ci actionnent alors une tringlerie qu'il a fallu dimensionner pour tenir dans l'emplacement disponible sur toute la course. Cette dernière est visible en [FIGURE 2.7](#). Il a d'ailleurs fallu faire une découpe dans l'ogive arrière pour permettre le débattement.

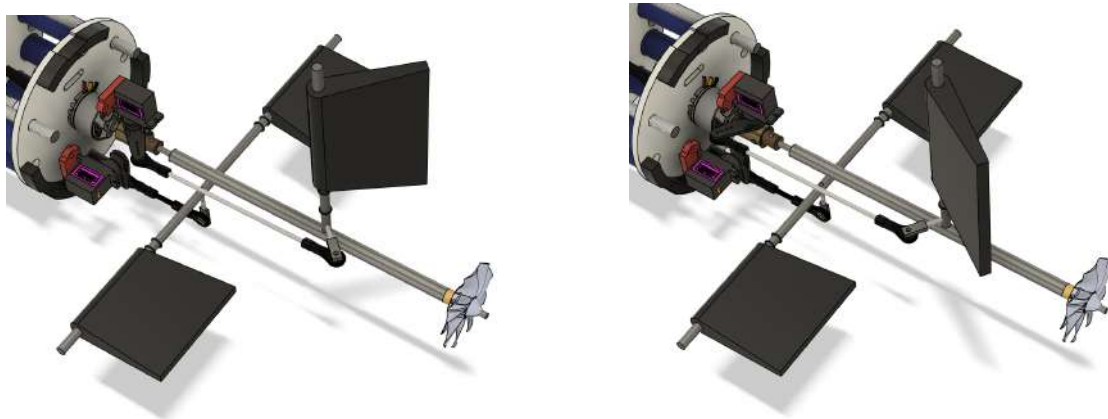


FIGURE 2.7 – Débattement mesurable sur CAO et permis par les servomoteurs

Remarques : le plan des gouvernails horizontaux est décalé par rapport à l'axe longitudinal du sous-marin, car nous avons utilisé cet axe pour l'arbre de propulsion décrite en [Section 2.3.4](#). Il a donc fallu décaler le plan pour que la tige de commande des gouvernails n'interfère pas avec l'arbre de propulsion.

D'autre part, pour des raisons pratiques, nous avons décidé de ne pas implanter un deuxième gouvernail vertical, qui se serait retrouvé en dessous de la coque. Il aurait risqué de frotter les fonds et aurait empêché de poser le sous-marin au sol.

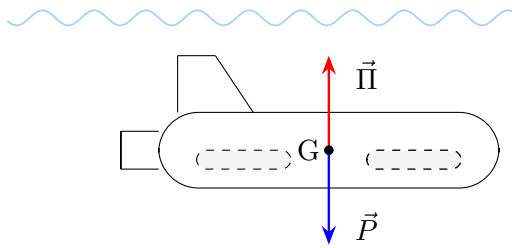
2.2.2.2. Flottabilité : lests et ballasts

Le principe même du sous-marin repose sur le fait d'augmenter la masse de ce dernier pour lutter contre la poussée d'Archimède. Ainsi, il semble évident qu'il est nécessaire d'établir précisément la masse du sous marin, ballasts à moitié remplis pour qu'il soit à la limite de la flottaison et permettre à l'engin de plonger.

Il nous a semblé facile et pratique de lester le sous-marin avec un matériau aisément accessible dont la densité massique est la plus importante possible : le fer ($\rho_{fer} = 7800 \text{ kg/m}^3$). Nous nous basons donc sur des barres d'acier de $\varnothing 20 \text{ mm}$. Reste encore à savoir combien de barres, leur longueur et leur positionnement.

Le nombre de barres N de $\varnothing D$ et de longueur L peut alors être calculé. Nous supposons les grandeurs connues :

- $m = m_{sans} + m_{barres}$ la masse du sous marin
- $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{fer} = 7800 \text{ kg/m}^3$
- V_{SM} le volume du sous-marin



En appliquant le *Principe Fondamental de la Dynamique* au sous-marin noté "SM", et en supposant l'équilibre atteint

$$m\vec{a} = \vec{0} = \vec{\Pi} + \vec{P} + \vec{R}_p \quad (2.5)$$

En projetant sur l'axe \vec{z} , vertical vers le haut, dont l'origine est à la surface de l'eau nous avons

FIGURE 2.8 – Schéma du problème

$$0 = \rho_{eau} \cdot V_{SM} \cdot g - m \cdot g \Leftrightarrow m = \rho_{eau} \cdot V_{SM} \quad (2.6)$$

De là, nous pouvons alors exprimer N en fonction des autres paramètres du problème sachant que $V_{barre} = N \times \pi \frac{D^2}{4} \times L$

$$N = \frac{(\rho_{fluide} \cdot V_{SM} - m_{sans}) \cdot 4}{\rho_{fer} \pi D^2 L} \quad (2.7)$$

Ce calcul nous amène à **6 barres de longueur 32cm et 6 de longueur 23cm**.

Une fois les barres dimensionnées, le logiciel de CAO sert à vérifier la position des centres de gravité en procédant en 3 étapes.

1. Reprendre le modèle en remplaçant le volume du sous-marin par de l'eau et faire calculer le centre de masse **(1)**.
2. Utiliser *Fusion 360* pour calculer le centre de masse du sous-marin sans le lest **(2)**.
3. Modéliser les barres et leur position dans le modèle et refaire calculer le centre de masse **(3)**.

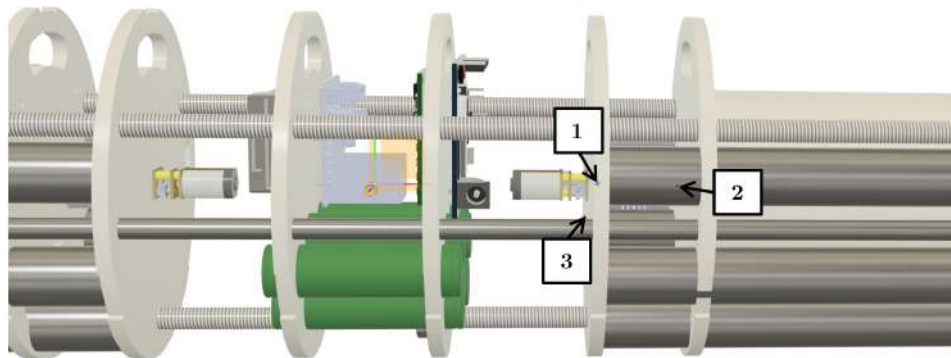


FIGURE 2.9 – Positions des centres de masse

Nous constatons que verticalement le centre de poussée d'Archimède **(1)** et le centre de masse final **(3)** sont quasiment alignés, ce qui garantit l'absence de basculement du sous-marin en statique. La petite différence sera compensée par l'asservissement d'assiette en remplissant différemment la seringue à l'avant de celle à l'arrière.

2.2.2.3. Étanchéité

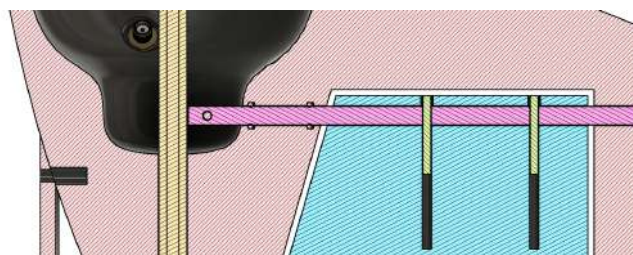


FIGURE 2.10 – Vue de coupe des solutions de jointage

L'étanchéité est une problématique essentielle pour notre projet, et a été d'ailleurs particulièrement difficile à traiter.

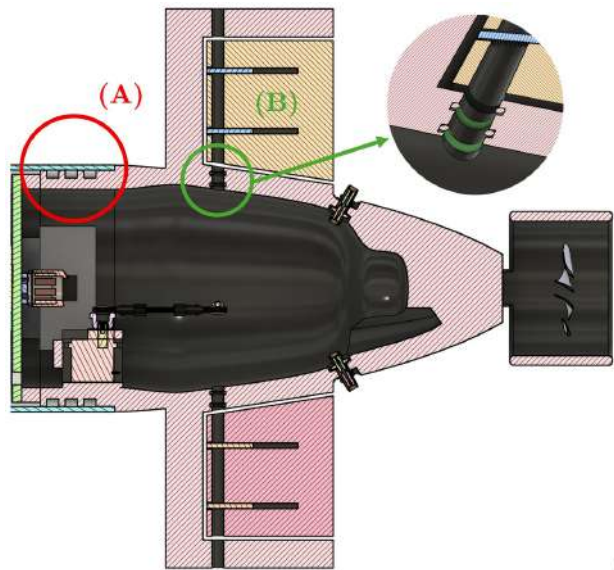


FIGURE 2.11 – Solutions de jointage dans la CAO

L'emmanchement en (A) n'a pas besoin de verrouillage fort du fait que la pression à l'extérieur sera supérieure à celle à l'intérieur du sous-marin, garantissant donc le positionnement des pièces en pression sur l'épaulement.

2.2.2.4. Modularité

La force de notre montage résulte du fait que chaque partie peut facilement être cloisonnée et chaque module peut être assemblé à part avant d'être glissé sur les tiges filetées. Les fonctions et composants associés à chaque module sont listés dans le tableau ci-dessous :

Module et fonction	Composants associés
Alimentation	Cellules li-ion 18650, BMS
Calculateur	Arduino, gyroscope, CAN, contrôleur moteur ballasts, récepteur radiocommande
Ballasts (×2)	Seringues, vis/écrou, potentiomètre, motoréducteurs
Propulsion et direction	Moteur brushless, ESC (contrôleur moteur), servomoteurs
Caméras	Kit caméra drone, émetteur radio

TABLE 2.1 – Groupe fonctionnel des modules du sous-marin

La figure FIGURE 2.12 montre l'intérêt des tiges filetées associées aux disques. Elles permettent à la fois un support des composants et un réglage de position des disques les uns par rapport aux autres afin de s'adapter au mieux lors de l'assemblage.



FIGURE 2.12 – Exemple de module : ballasts

2.2.2.5. Mécanique de l'asservissement du ballast

L'objectif ici est de garantir une position précise du piston de la seringue afin de maîtriser la quantité d'eau qui se trouve dans le ballast.



Pour cela, il y avait deux possibilités : compter le nombre de tour de vis ou implanter un potentiomètre linéaire indiquant la position. Nous avons choisi cette deuxième solution pour des raisons de coût.

FIGURE 2.13 – Potentiomètre de 128 mm

L'implémentation mécanique est décrite sur la FIGURE 2.14, à savoir :

- Un motoréducteur 12 V de 30 tr/min couplé à la tige filetée par un coupleur mécanique, qui tolère les erreurs de coaxialité.
- Le piston de seringue entièrement redessiné du fait de la course limitée. Il intègre le joint en caoutchouc d'origine et de l'autre côté comporte une noix filetée qui accueille la tige. Il comporte une cavité interne qui permet à la tige filetée de s'y loger lorsque le piston s'y déplace.
- Enfin, le potentiomètre a un index qui est fixé sur le piston par une bride. De plus, ce potentiomètre permet de verrouiller la rotation du piston. En effet, il traverse le disque de base de la seringue et est fixé sur le disque de support du moto-réducteur, et il ne lui est donc pas possible de tourner.

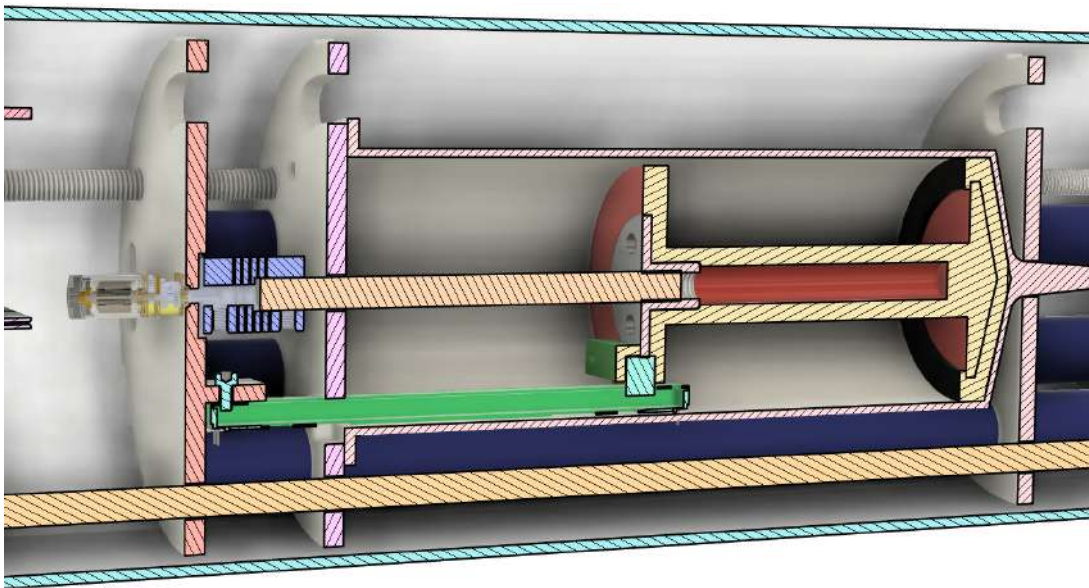


FIGURE 2.14 – Coupe de la partie seringue

Remarques : Chaque seringue a une contenance originelle de 500 mL dont seule la moitié est accessible. Dans la mesure où l'équilibre de flottaison est réalisé à mi-course pour pouvoir aussi bien remonter que plonger, le volume d'eau dans le sous-marin sera donc de $250 \text{ mL} \pm 250 \text{ mL}$

2.3. Partie électronique

2.3.1. Carte électronique

Afin de contrôler toute la partie électronique par radiocommande, une carte électronique est nécessaire.



FIGURE 2.15 – Carte Arduino Uno R4

Le choix de la carte électronique s'est fait naturellement : nous connaissons tous bien les cartes *Arduino*, et nous avons la possibilité de récupérer une carte *Arduino Uno R4* facilement pour le projet, issue du projet de S5 MINUTO. Véritable cerveau du sous-marin, elle nous permet d'implémenter le système d'asservissement et de traiter les données renvoyées par la radiocommande. Ainsi tout au long du projet, il a été crucial de comprendre quels types de communication étaient mises en place et attendues par la carte comme par les différents composants, car le nombre de pins est une ressource fortement limitante au vu du nombre de composants.

Dès lors, un point sur les différents types de signaux est nécessaire.

2.3.2. Les différents types de signaux

Concentrons-nous donc sur la communication de données, et laissons de côté la partie alimentation. Il existe deux grands types de signaux : analogique et numérique. Un signal analogique prend tout un continuum de valeurs tandis que le numérique n'en prend que deux, un état haut et un état bas.

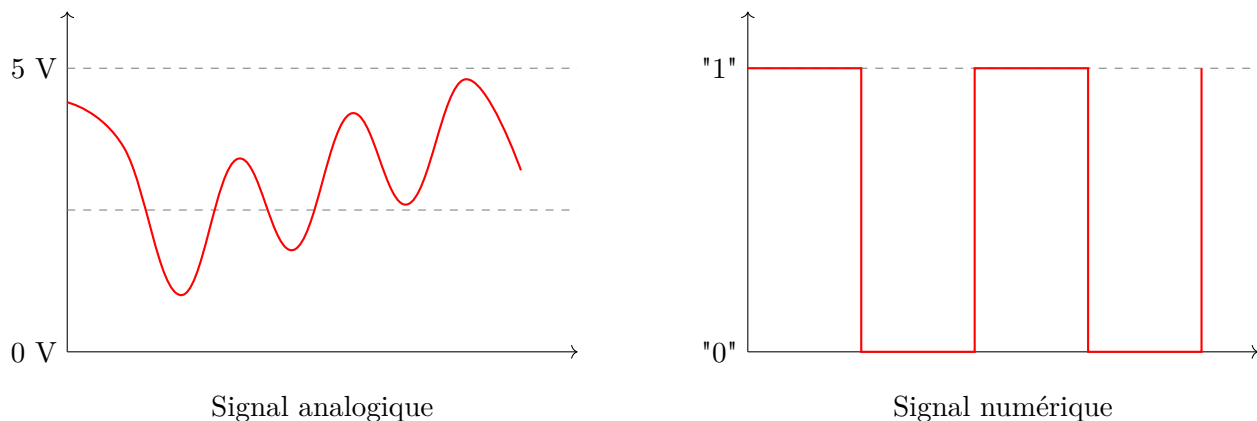


FIGURE 2.16 – Signal analogique et signal numérique

Tout l'enjeu est alors de savoir comment transmettre de l'information avec ces signaux.

Dans le cas de la transmission d'une information simple, à une dimension, et bornée, l'analogique est tout à fait adapté, cependant, tous les systèmes ne sont pas capables de fournir un signal analogique, le signal est sensible aux chutes de tension au sein des fils et surtout la transmission de données plus complexes n'est pas possible.

Dès lors, cela participe à expliquer l'avantage d'un signal numérique, puisque les états du fil étant au nombre de deux, les variations sont beaucoup plus faciles à détecter. Nous pouvons dès lors voir deux méthodes de transmission, une reprenant le principe du signal analogique et une autre permettant la transmission des données dites complexes.

2.3.2.1. Qu'est ce qu'un signal PWM ?

Un signal Pulse Width Modulation (PWM), c'est l'équivalent numérique du signal analogique, en jouant sur la durée d'une impulsion plutôt que sa hauteur. Ainsi, les installations adéquates récupèrent la moyenne du signal, le temps d'une impulsion étant bien moins sensible que sa hauteur, cette méthode est adoptée pour plusieurs composants tels que nos servomoteurs, moteur brushless et sorties de radio-récepteur.

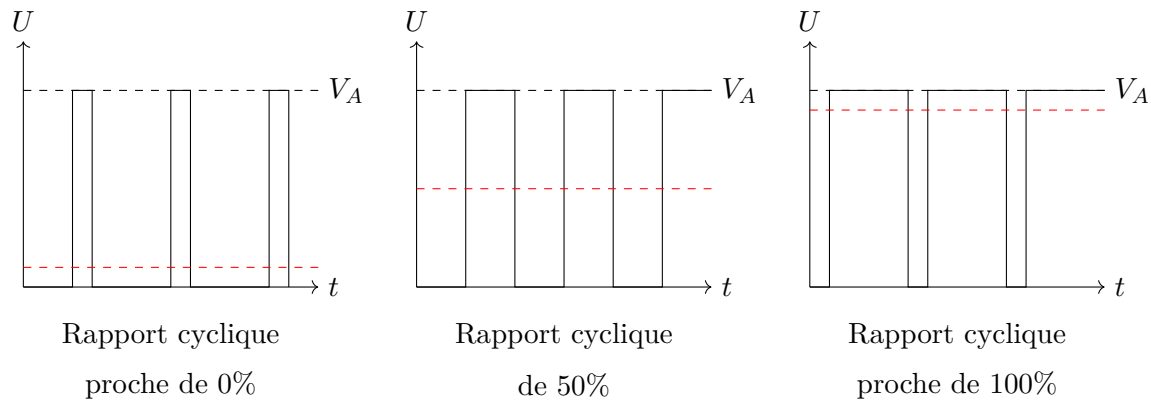


FIGURE 2.17 – Fonctionnement d'un signal PWM

2.3.2.2. Synchroniser données et front d'horloge

Mais imaginons maintenant que vous vouliez transmettre plusieurs données indépendantes en même temps par l'intermédiaire d'un même câble (la rotation \vec{x}, \vec{y} et \vec{z} de l'accéléromètre par exemple). Vient la nécessité de transmettre des unités élémentaires de données (des bits), et donc de discrétiser votre signal. Et c'est là tout le problème, comment échantillonner un signal avec une seule connexion ? Comment différencier deux états hauts de suite puis un état bas d'un état haut puis d'un état bas ?

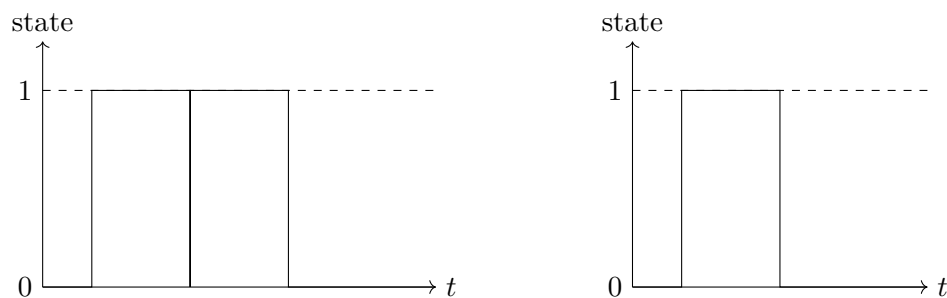


FIGURE 2.18 – Comment les différencier ?

Pire, la représentation, théorique n'en fait pas mention, mais le passage d'un état à un autre prend un certain temps, pendant tout ce temps l'état est indéterminé et tout échantillonnage ici résulterait en une valeur faussée.

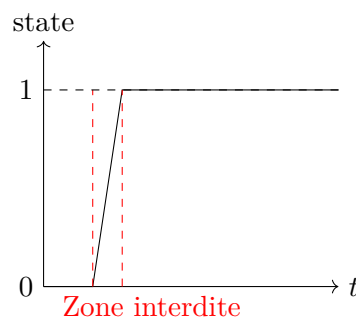


FIGURE 2.19 – Attention aux changements d'états

Ainsi, un signal de synchronisation est très important, indiquant à quel moment précis chaque composant doit échantillonner ou envoyer une donnée, il permet de pallier aux problèmes précédents. Apparaît alors le signal d'horloge, la convention veut que l'état haut corresponde à une durée pendant laquelle l'émetteur peut lire la valeur du bus, et l'état bas un moment pendant lequel l'émetteur peut écrire la prochaine valeur devant être lue par le récepteur pendant le prochain état haut. A tout instant, seul l'émetteur impose une tension au bus.

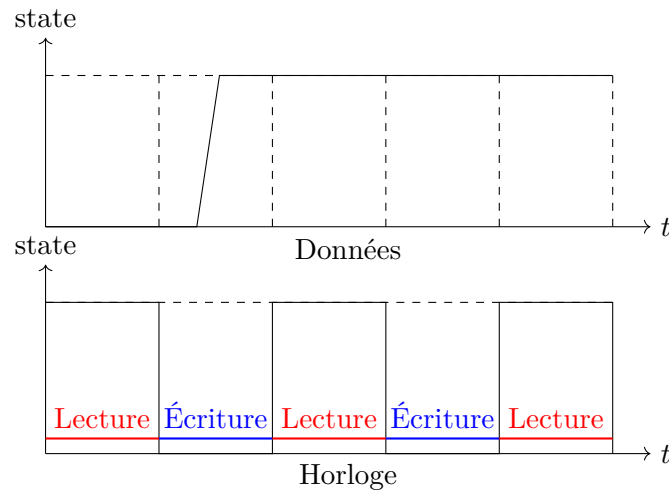


FIGURE 2.20 – La clock pour synchroniser

La [FIGURE 2.20](#) illustre l'échantillonnage des données par le récepteur. Ici, les données échantillonnées par le récepteur sont 0, 1, puis 1.

Nous pouvons dès lors transmettre tous les bits nécessaires à une bonne communication. C'est ainsi que fonctionne la communication avec l'accéléromètre et le convertisseur analogique-numérique à l'aide d'un protocole appelé Inter-Integrated Circuit (I2C), expliqué en [ANNEXE 3](#), où le bus de données est le Serial Data Line (SDA) et le bus d'horloge le Serial Clock Line (SCL). Cette connaissance des types de signaux nous a ainsi permis de répartir au mieux l'utilisation des pins de la carte *Arduino*. Le schéma électrique plus loin faisant état de la limitation de cette ressource (presque tous les pins sont utilisés). De plus, ces architectures se retrouvent dans les codes liés aux différents composants et nous ont permis d'en faire ce que nous en voulions.

2.3.3. Alimentation de l'électronique du sous-marin

Nous avons fait le choix d'assembler nous-même la batterie à l'aide de cellules mises en série et en parallèle, nous permettant de dimensionner une batterie qui correspondait parfaitement à nos besoins, et qui pouvait être modifiée en retirant ou en ajoutant des cellules. Le dimensionnement de la batterie consiste à évaluer le besoin du circuit et à déterminer la meilleure manière de répondre à ce besoin. Déterminer le besoin de l'électronique, c'est déterminer l'ampérage maximal qui traversera chaque portion du circuit électrique global du sous-marin ainsi que déterminer la tension devant être délivrée par la batterie pour le bon fonctionnement des composants.

2.3.3.1. Évaluation du besoin

Pour déterminer la tension nominale nécessaire en sortie de batterie, nous avons cherché les tensions acceptées par les composants alimentés par la batterie. Le moteur brushless et l'Electronic Speed Controller (ESC) pour la partie propulsion vue en [Section 2.3.4](#) ainsi que les motoréducteurs et le driver pour la partie immersion vue en [Section 2.3.5](#) acceptent des tensions sur une plage autour de 12 V.

Pour déterminer l'intensité maximale en sortie de batterie, nous avons de même cherché les intensités nécessaires pour faire fonctionner les composants. Par manque de documentation précise sur le moteur brushless utilisé, nous avons estimé son intensité de crête à

$$I_{crete} = \frac{P_{max}}{U} \approx 15 \text{ A} \quad (2.8)$$

où $P_{max} = 185 \text{ W}$ est la puissance maximale donnée dans la fiche technique du moteur et $U \approx 12 \text{ V}$ est la tension nominale de sortie de la batterie déterminée précédemment. La documentation des motoréducteurs utilisés donne une intensité de crête de l'ordre de quelques centaines de mA. Nous avons aussi estimé l'intensité nécessaire pour que le reste des composants puissent fonctionner à quelques centaines de mA. Ces composants sont alimentés par l'ESC et par le driver via un Battery Eliminator Circuit (BEC), qui permet d'alimenter un sous-système avec une tension plus basse. Tous les branchements sont détaillés dans la [Section 2.3.9](#). Au total, nous avons donc estimé l'intensité maximale en sortie de batterie à environ 16 A.

2.3.3.2. Solutions trouvées pour répondre au besoin



FIGURE 2.21 – Cellules INR18650 3500 mAh choisies

Nous avons fait le choix de prendre les très classiques cellules li-ion 18650 ayant une capacité de 3500 mAh, afin de garantir une autonomie suffisante et une grande intensité en sortie. Chaque cellule peut délivrer une tension nominale de 3.7 V et une intensité maximale de 10 A. Les estimations effectuées nous ont donc permis de dimensionner notre batterie de la manière suivante :

- Déterminer le nombre de cellules à mettre en **série** pour obtenir une tension nominale adaptée à notre circuit. La tension nominale estimée étant $U \approx 12 \text{ V}$, nous avons décidé de mettre 3 cellules en série (3S) pour obtenir une tension $U = 3 \times 3.7 = 11.1 \text{ V}$ en sortie de batterie.
- Déterminer le nombre de cellules à mettre en **parallèle** pour obtenir une intensité suffisante en sortie. L'intensité maximale estimée étant $I_{max} \approx 16 \text{ A}$, nous avons décidé de mettre 2 cellules en parallèle (2P) pour obtenir une intensité maximale $I_{max} = 20 \text{ A}$ en sortie de batterie.

La solution trouvée permettant de répondre au besoin précédemment évalué est donc une batterie 3S2P.

2.3.3.3. Nécessité d'un BMS

Pour commencer qu'est-ce qu'un BMS, ou Battery Management System ? Il s'agit d'un composant électronique qui permet à la fois de contrôler la batterie et de la protéger, notamment contre la sur-intensité, la surchauffe, la sur-tension et la sous-tension. Il est indispensable pour le bon fonctionnement d'une batterie, et garanti notamment que les éléments en série ont chacun la même charge, afin d'éviter des déséquilibres qui endommageraient l'un de ces éléments. Cet équilibrage se fait en dérivant une petite fraction de courant lors de la charge ou de la décharge, sur la base de la tension mesurée aux bornes des cellules.

Le choix du BMS est conditionné par les choix dans le dimensionnement de la batterie. Il dépend du type de cellules, de la tension nominale de sortie et de l'intensité maximale de sortie de la batterie. Ainsi, nous avons opté pour un BMS 18650 3S 40A adapté à notre type de cellules, au nombre de cellules en série et à l'intensité maximale estimée en sortie de batterie.

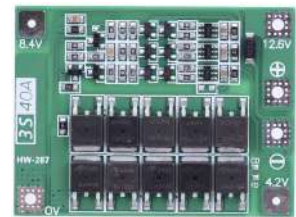


FIGURE 2.22 – BMS 18650 3s 40A

2.3.3.4. Schéma électrique

Nous pouvons à présent réaliser le schéma électrique de la batterie reliée au BMS pour comprendre la répartition du courant sur chaque fil et ensuite pouvoir réaliser les choix relatifs à l'assemblage de la batterie.

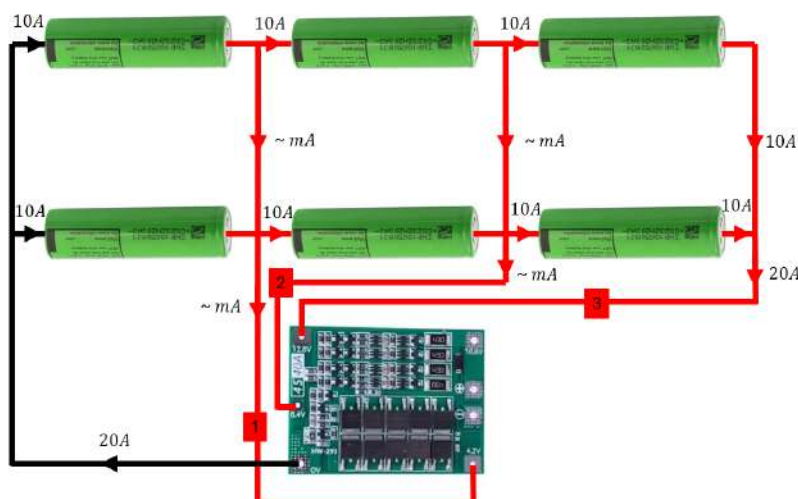


FIGURE 2.23 – Schéma électrique du lien batterie / BMS

Les intensités qui parcourent les fils du circuit de la [FIGURE 2.23](#) sont de 20 A au maximum. Cependant, seuls les fils traversés par 10 A seront réalisés à l'aide de bandes conductrices. Ainsi la référence pour l'intensité maximale à prendre est 10 A. Les fils traversés par 20 A ne poseront pas de problèmes car nous choisissons des fils ayant une section importante pouvant supporter une telle intensité. La numérotation des fils rouges de la [FIGURE 2.23](#) est reprise dans la [FIGURE 2.24](#) et les fils laissant passer 10 A au maximum ont été remplacés par des bandes conductrices.

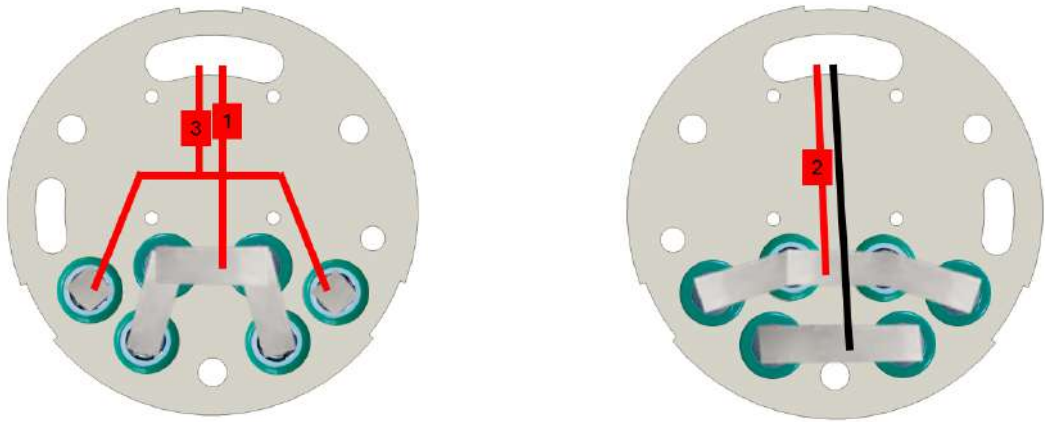


FIGURE 2.24 – Schéma électrique de la batterie sur son support d'un côté et de l'autre

2.3.3.5. Choix des bandes conductrices

Enfin, il faut bien choisir les bandes conductrices qui seront utilisées pour relier les cellules entre elles pour éviter tout problème. Le choix du matériau n'est pas le seul choix qui intervient dans la réflexion relative aux bandes conductrices utilisées. En effet, l'intensité qui peut traverser une bande conductrice dépend de sa géométrie, à savoir sa longueur, sa largeur, son épaisseur, et du matériau.



FIGURE 2.25 – Bande de nickel

Un tableau permettant de trouver l'intensité maximale pouvant traverser une bande en fonction des critères précédemment décrits est présent en [ANNEXE 2](#) et nous a permis de vérifier que la bande conductrice que nous avons à disposition était adaptée à nos besoins. En effet, nous avons à disposition une bande de nickel, de largeur 8 mm et d'épaisseur 0.4 mm. Toutes les données du tableau sont calculées pour une longueur de l'ordre de 10 cm. Nous obtenons ainsi une intensité maximale de 11 A pouvant traverser nos bandes de nickel, ce qui correspond exactement à nos besoins.

2.3.4. Propulsion du sous-marin

Pour la propulsion du sous-marin, nous avons fait le choix d'une solution technique parmi beaucoup d'autres : une propulsion à l'aide d'un moteur faisant tourner une hélice. Pour le moteur, deux choix s'offraient à nous : un moteur brushed, ou un moteur brushless. Le tableau ci-dessous résume les avantages et inconvénients de chacun des types de moteur.

Moteur brushed	Moteur brushless
Pas de contrôleur externe nécessaire	Contrôleur externe nécessaire
Bon marché	Plus cher
Efficacité de 75 à 80%	Efficacité de 80 à 90%
Durée de vie plus courte	Longue durée de vie
Vitesses moyennes	Rapide
Un peu plus bruyant	Un peu plus silencieux en fonctionnement
Couple plus faible	Couple élevé

TABLE 2.2 – Comparaison des deux types de moteur



FIGURE 2.26 – Moteur brushless 750 KV choisi

Le choix du moteur brushless s'est fait à la fois sur la longévité et sur le couple élevé. Ce choix impliquait aussi de se procurer un contrôleur moteur externe. Pour le détail du dimensionnement du moteur, il a été traité en [Section 2.2.1.4](#) et a donné lieu au choix du moteur visible sur la [FIGURE 2.26](#). Pour le choix du contrôleur externe, nous avons opté pour un ESC. En effet, un ESC peut être commandé facilement par une carte *Arduino* et être alimenté très facilement par un courant continu. L'ESC est en réalité un onduleur dont la fréquence des 3 phases de sortie est commandable par la carte *Arduino*. Cette fréquence va correspondre à la vitesse de rotation du moteur : c'est la **condition de synchronisme**.

Ce choix découle donc naturellement de nos choix précédemment expliqués en [Section 2.3.1](#) pour la carte électronique et en [Section 2.3.3](#) pour la batterie. Nous avons finalement choisi un ESC pouvant supporter 30 A en entrée visible sur la [FIGURE 2.27](#), en accord à la fois avec les composants détaillés dans les vidéos que nous avons visionnées et avec l'estimation du besoin en courant du moteur brushless effectuée dans la [Section 2.3.3](#). Au vu de l'estimation faite, nous aurions pu choisir un ESC supportant 20 A uniquement, mais pour plus de sécurité nous avons opté pour un ESC 30 A.



FIGURE 2.27 – Contrôleur moteur ESC 30 A choisi

2.3.5. Immersion du sous-marin et asservissement de l'assiette



FIGURE 2.28 – MPU 6050

L'électronique derrière l'immersion et la gestion de la profondeur du sous-marin repose sur les motoréducteurs et le driver. L'asservissement de l'assiette du sous-marin repose sur les données du capteur MPU, autrement appelé centrale inertielle.

Le MPU-6050 est un capteur inertiel qui combine un accéléromètre 3 axes et un gyroscope 3 axes dans un seul module. Il permet ainsi de mesurer à la fois les accélérations linéaires (comme les mouvements ou l'inclinaison) et les vitesses angulaires (les rotations) dans l'espace. Il communique généralement via une interface I2C et intègre un processeur de mouvement numérique (DMP) qui peut traiter les données en interne pour fournir directement des angles (pitch, roll, yaw), réduisant ainsi la charge sur le microcontrôleur hôte.

Contrairement à un accéléromètre, un gyroscope mesure une variation angulaire $\Delta\theta$ dans le temps t . En combinant les deux fonctionnalités, les bibliothèques *Arduino* fournissent toutes les grandeurs nécessaire pour mesurer l'angle.

2.3.6. Gestion de la direction du sous-marin

Pour commander les gouvernails actionnés par des servomoteurs comme décrit dans la [Section 2.2.2.1](#), nous avons dû réfléchir au type de servomoteur à utiliser et à la manière de les relier au circuit global. Il existe deux principales catégories de servomoteurs : un servomoteur à **rotation continue** permet un contrôle en vitesse ainsi que du sens de rotation, tandis qu'un **servomoteur classique** permet un contrôle en angle avec une grande précision. Nous avons donc opté pour les servomoteurs classiques afin de contrôler précisément l'angle des servomoteurs et donc des gouvernails.

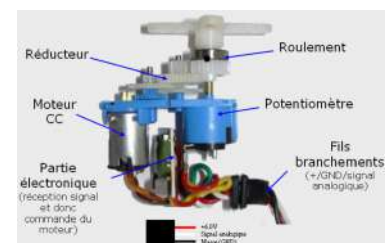


FIGURE 2.29 – Intérieur d'un servomoteur

Il faut noter que le servomoteur est un système asservi en interne, qui associe au moteur et son réducteur un potentiomètre rotatif donnant la position de l'index. Ainsi la commande va spécifier la position à atteindre et le servomoteur va se mettre en mouvement jusqu'à atteindre cette position.

2.3.7. Transmission de signaux

Un des défis à relever pour le bon fonctionnement d'un sous-marin télécommandé réside dans la transmission des informations. En effet, l'eau est un milieu dans lequel les ondes ne se propagent pas comme dans l'air. La portée d'un signal wifi à 2.4 GHz dans l'eau est de l'ordre de la dizaine de centimètres, rendant la communication entre l'utilisateur et le sous-marin impossible avec une antenne placée dans le sous-marin. Cette nécessité de sortir l'antenne de réception de l'eau amène avec elle un lot de contraintes non négligeable. La solution technique que nous avons cherché à mettre en œuvre consiste à placer l'antenne de réception sur une bouée qui flotte à la surface de l'eau. L'antenne est reliée au sous-marin par un câble, ce qui signifie que la bouée doit être tractée par le sous-marin lorsque celui-ci se déplace. Une situation de fonctionnement de la transmission des signaux est schématisée sur la [FIGURE 2.30](#).

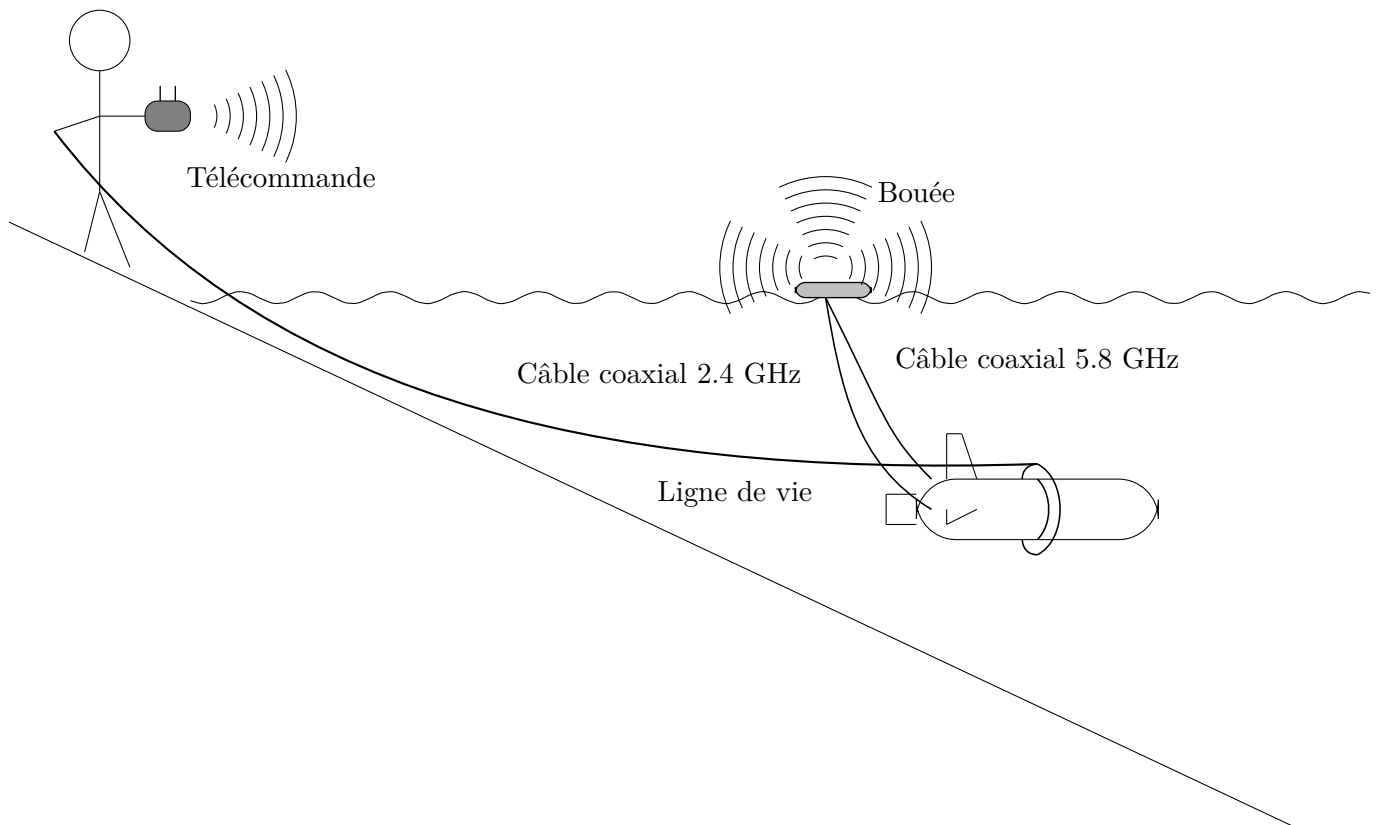


FIGURE 2.30 – Schéma du principe de fonctionnement de la transmission de l'information entre le sous-marin et l'utilisateur

La transmission des commandes se fait donc par une télécommande tenue par l'utilisateur selon le diagramme de séquence présenté en [FIGURE 2.31](#).

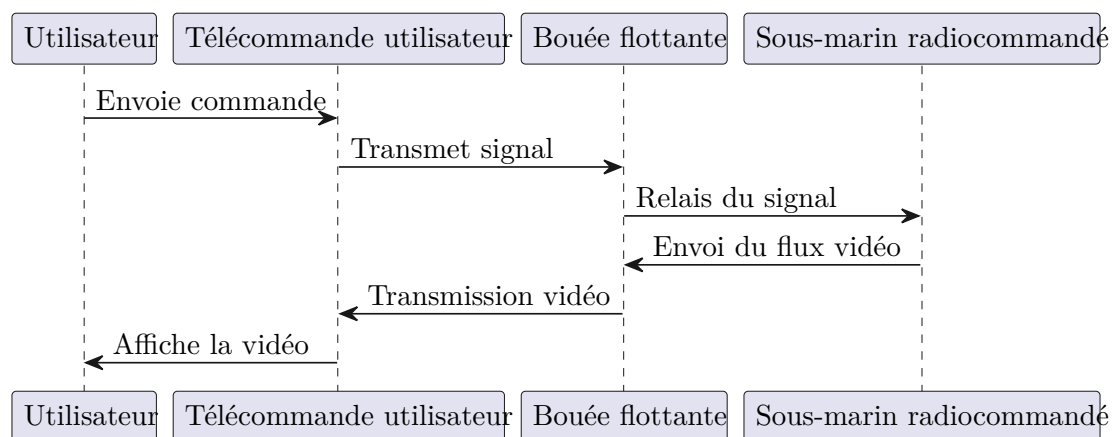


FIGURE 2.31 – Diagramme de séquence.

2.3.8. Radiocommande

Pour transmettre les commandes, nous avons choisi une radiocommande *FlySky i6*. Notre choix s'est orientée vers elle, grâce à sa renommée et sa forte utilisation dans des projets RC (acronyme de radiocommandés), son nombre suffisant de canaux, et son écran qui permet d'afficher certaines informations intéressantes.

Néanmoins, avant de pouvoir l'utiliser et de l'intégrer dans notre projet, il fallait comprendre son fonctionnement.



FIGURE 2.32 – Radio commande FlySky i6



FIGURE 2.33 – Récepteur FlySky FS-iA10B

La télécommande communique avec le récepteur (*FlySky FS-iA10B*) en 2.4Ghz et envoie des informations sur 6 canaux différents. Chaque canal correspond à une commande physique sur la télécommande. Pour savoir quelle commande correspond à quel canal, il est possible d'aller dans le Menu *Display* et d'observer l'influence de nos actions.

A noter que les sorties du récepteur sont conçues pour produire des signaux PWM, PPM, i-BUS, S.BUS.

2.3.9. Circuits électriques

Une fois tous les choix réalisés, il faut relier les différents composants entre eux pour obtenir le résultat voulu. Le plus logique et le plus simple est dans un premier temps de mettre au point des circuits indépendants pour chaque composant, ce qui nous permet d'effectuer les tests unitaires, et d'avoir une meilleure compréhension des composants. Ensuite, nous relierons ces circuits en un grand circuit final.

2.3.9.1. Circuits indépendants

Nous commençons par des circuits indépendants, plus simples à comprendre que dans le circuit global.

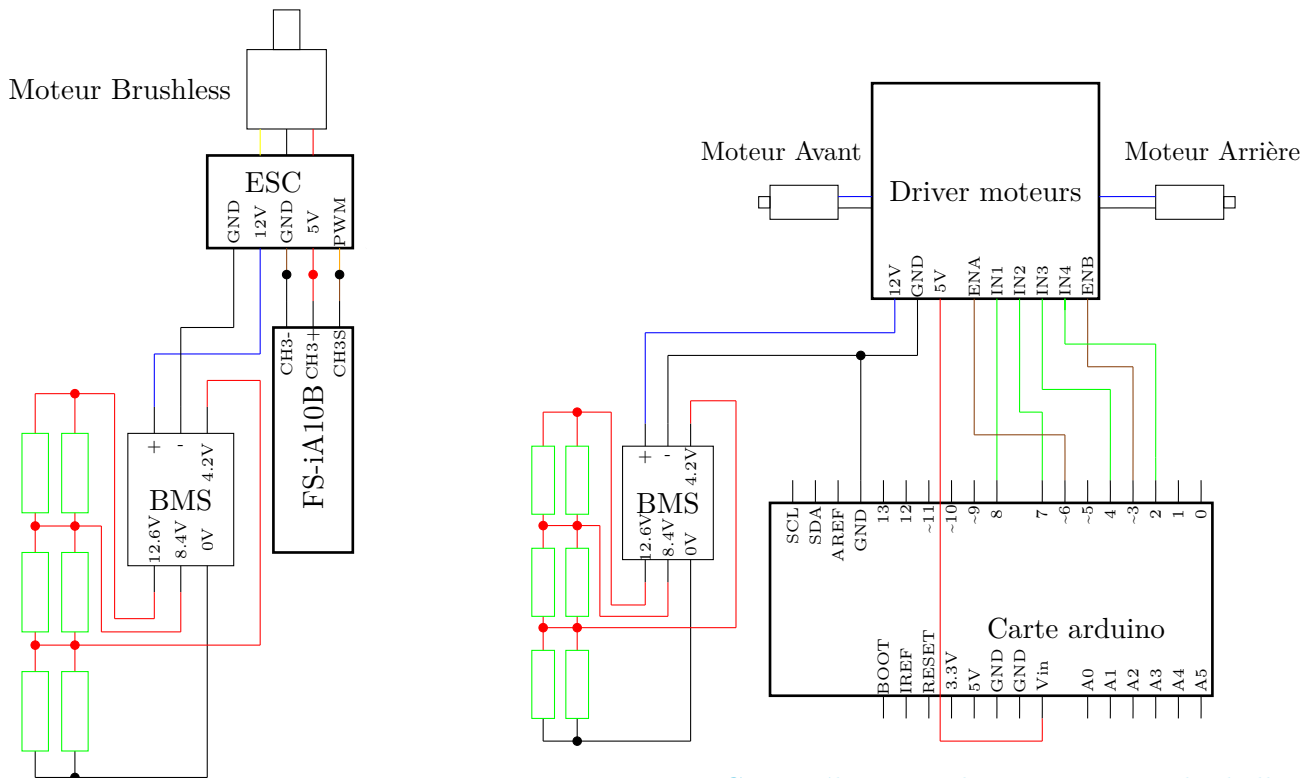


FIGURE 2.34 – Circuit électrique du moteur brushless

FIGURE 2.35 – Circuit électrique des moteurs pour les ballasts

Pour que le moteur brushless fonctionne, l'ESC doit être alimenté par la batterie. Il sert à alimenter le moteur, et à lui transmettre le signal PWM, qu'il reçoit grâce au récepteur *FS-iA10B*. L'ESC permet également d'alimenter le récepteur avec une tension de 5 V. Les branchements sont décrits sur la [FIGURE 2.34](#).

La [FIGURE 2.35](#) présente le montage pour piloter les moteurs qui vont contrôler le remplissage des ballasts. Leur driver doit être alimenté par la batterie. Le driver sert à alimenter les moteurs, et à leur transmettre les signaux PWM, qu'il reçoit depuis la carte *Arduino*. Le driver permet également d'alimenter la carte *Arduino* avec tension de 5 V sur le pin V_{in} .

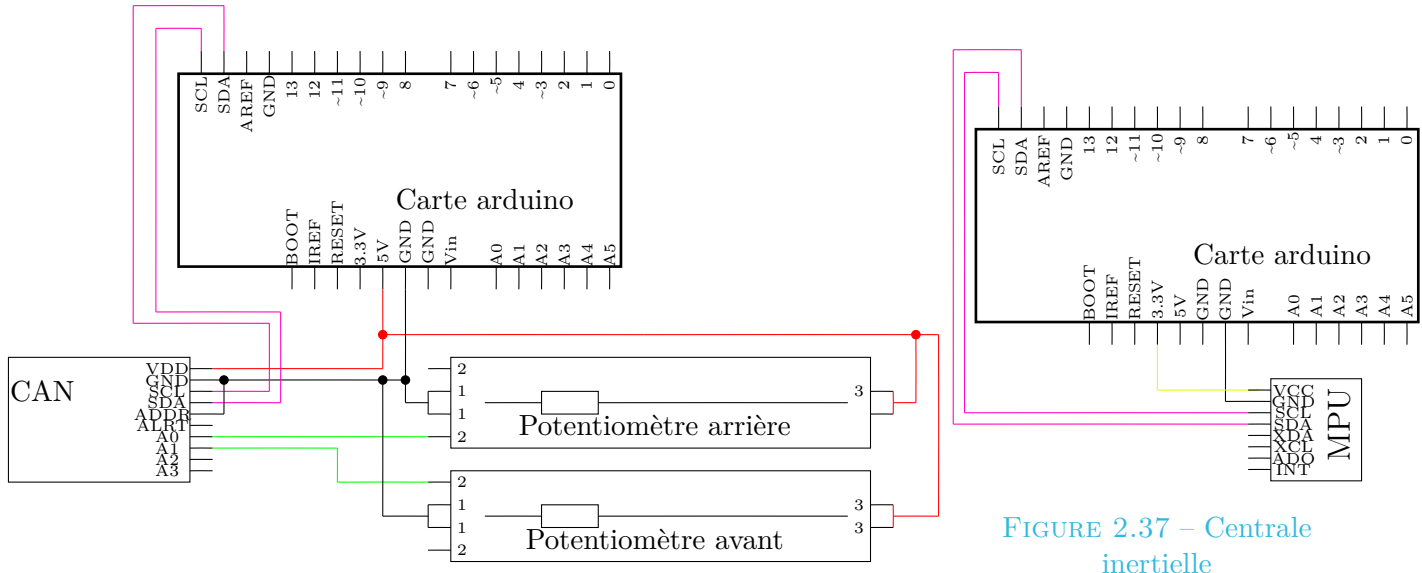


FIGURE 2.36 – Schéma électrique des potentiomètres et du CAN

En [FIGURE 2.36](#), nous présentons le circuit utilisé pour contrôler les deux potentiomètres utiles dans l'asservissement.

Finalement, la [FIGURE 2.37](#) montre les branchements du MPU sur la carte Arduino, via le bus I2C.

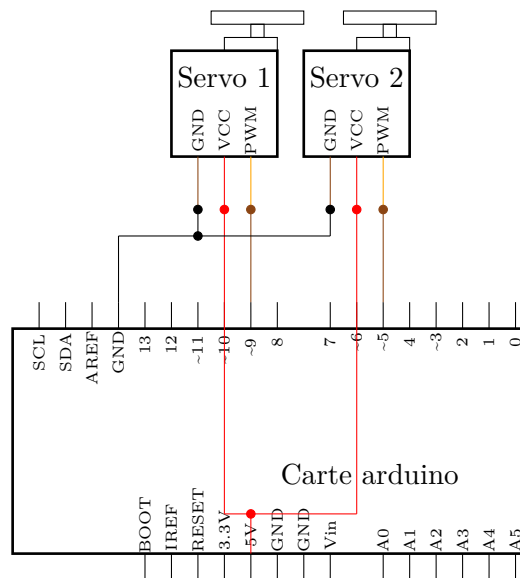


FIGURE 2.38 – Schéma électrique des servomoteurs

2.3.9.2. Caméras et visualisation vidéo

La transmission vidéo en direct fait effectivement partie de nos objectifs de projet. Pour satisfaire cette exigence, nous avons cherché les meilleures références en terme de qualité/prix et nous sommes tombé sur une référence utilisée pour les drones First Person View (FPV) de course, présenté en [FIGURE 2.39](#).

Le sous-système caméra n'a pas été acheté entièrement, pour des raisons de temps et de budget. Cependant, nous savons que :

- L'émetteur fonctionne à 5,8 GHz avec une puissance de 600 mW. Ceci représente donc une puissance d'émission

$$P_e = 10 \log(600) = 27 \text{ dBm} \quad (2.9)$$

- La plupart des récepteurs disponibles sur le marché sont capables de recevoir correctement un signal dont la puissance est de $P_r = -120 \text{ dBm}$
- Les pertes maximale admissibles pour la transmission de l'émetteur au récepteur sont donc de $P_t = +27 - (-120) = 147 \text{ dBm}$. Ces pertes vont se répartir entre les pertes dans les câbles qu'il faudra quantifier et l'émission dans l'air entre l'antenne sur la bouée et celle du récepteur.



FIGURE 2.39 – Kit caméra de drone FPV

2.3.9.3. Circuit final

Pour améliorer la lisibilité du schéma et du circuit réel et ainsi éviter de potentielles erreurs, nous avons choisi un code couleur, présent dans le coin supérieur droit du schéma ci-dessous. Ici, la couleur des fils dépend du type de signal qui les traverse.

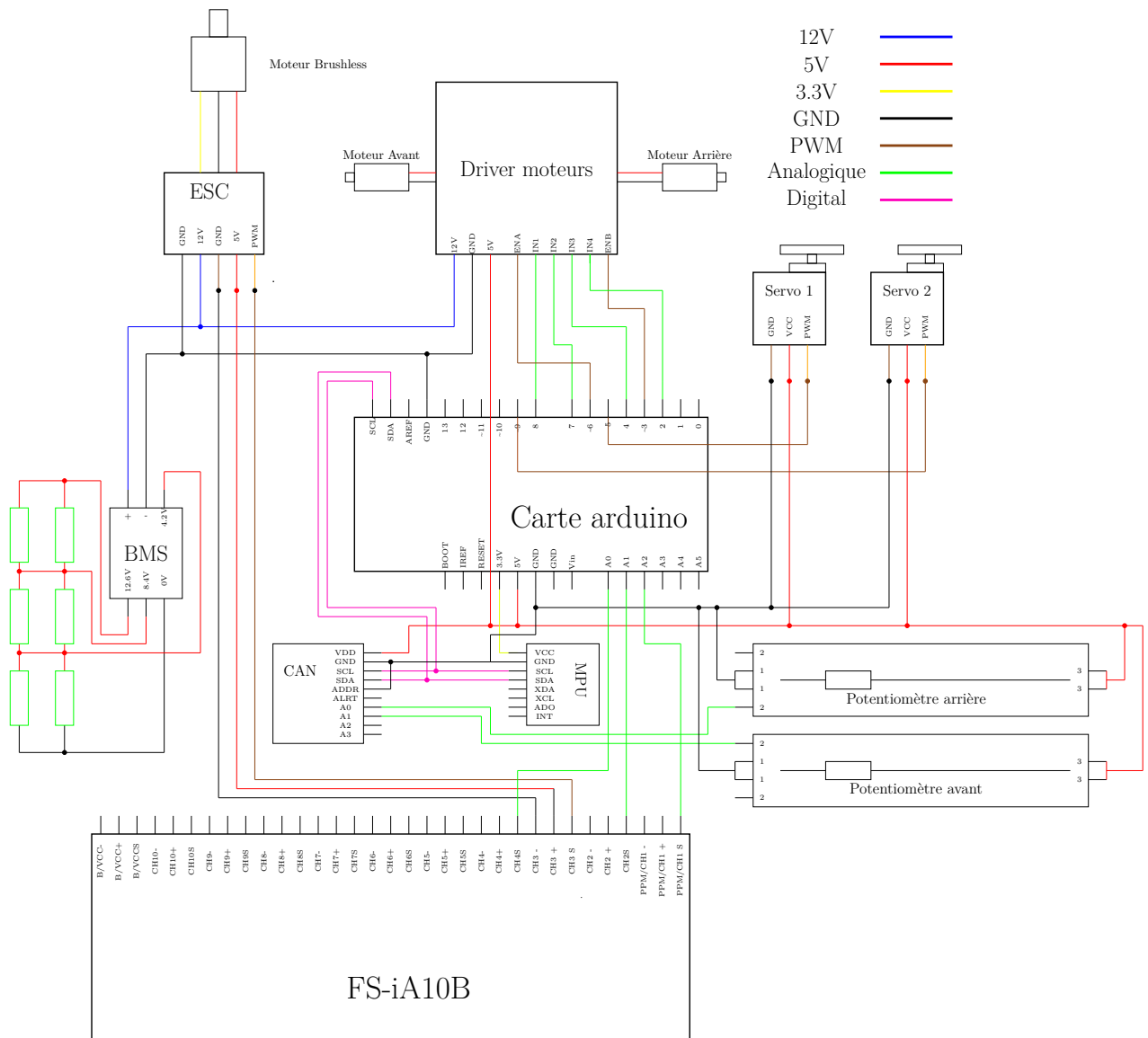


FIGURE 2.40 – Circuit électrique complet du sous-marin

Réalisation, développements et tests unitaires

Après avoir passé quelques semaines de mise au point de la CAO et des schémas électriques, il était temps de tester nos composants tout en commençant les premiers usinages, additifs (impression 3D) ou soustractifs (fraisage, tournage), nécessaires pour tester unitairement les sous ensembles.

3.1. Ordre et dépendance des opérations

Le principe décrit plus haut a été appliqué dès le début du projet : l'équipe mécanique, après avoir terminé la CAO a commencé à imprimer les disques en priorité et à les compléter par toute la quincaillerie nécessaire. En parallèle, l'équipe électronique embarquée teste tous les composants dans leurs montages unitaires, selon le déroulement suivant présenté en [FIGURE 3.1](#) :

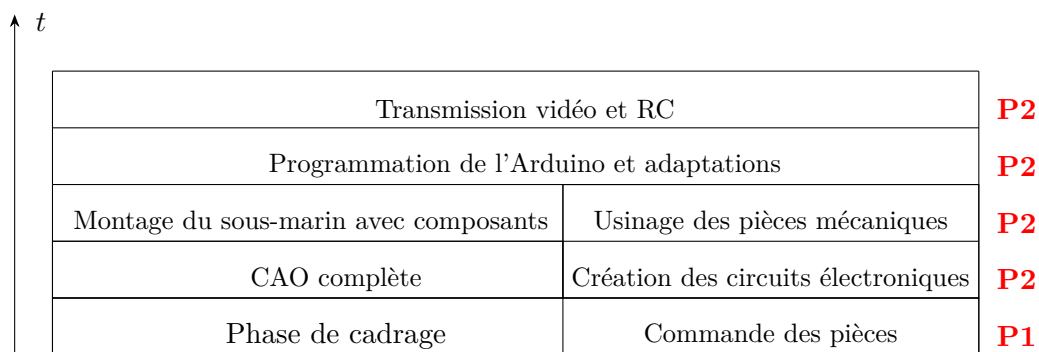


FIGURE 3.1 – Étagement du projet

3.2. Réalisations pratiques

3.2.1. Impressions 3D

L'impression 3D est aujourd'hui un des moyen de prototypage les plus démocratisés et abordables. L'impression 3D consiste à imprimer des couches de plastique successivement les unes sur les autres en fondant un filament à travers une buse. Nous pouvons se demander si les couches garantissent une étanchéité ou non. Un test est donc nécessaire : un cylindre imprimé creux et fermé aux deux extrémités est plongé dans le Dellec pendant 24 heures. Une pierre permet de le maintenir sous la surface de l'eau.

Résultat : il est rempli à 5% d'eau

Analyse : l'eau est rentrée par la jonction entre le couvercle supérieur et les côtés du cylindre du fait d'un manque de support lors de l'impression à la verticale, résultant en une impression défectueuse

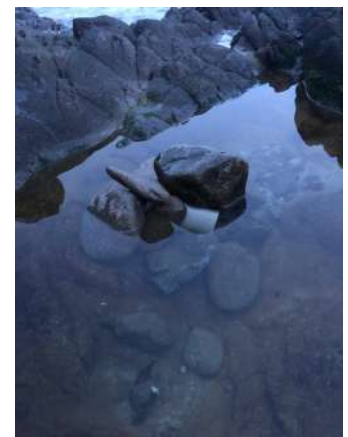


FIGURE 3.2 – Test au Dellec

Conclusion : il faut que les parois soient d'une épaisseur suffisante pour empêcher le passage de l'eau.

Dès lors, nous procédons à un deuxième test. Nous ôtons le couvercle supérieur du cylindre et nous le remplissons d'eau. Nous relevons le niveau et il s'avère qu'après 72 heures d'attente, le niveau n'a pas bougé. Le PLA peut donc être étanche.

3.2.1.1. Disques

Les disques sont des constituants essentiels au projet, ils ont donc en premier retenu notre attention.

Plusieurs points nous semblent primordiaux pour garantir un assemblage durable, solide et esthétique



FIGURE 3.3 – Disques imprimés

- Les disques, comme toutes les parties imprimées en 3D sont en PLA, par la facilité d'impression et sa résistance mécanique correcte par rapport à notre besoin. L'épaisseur des murs est volontairement définie plus large dans le logiciel trancheur de l'imprimante.
- Lorsque les disques doivent contenir des composants (comme les cellules li-ion 18650), la cote de perçage du diamètre possède un jeu de 0,3 mm comme toutes les autres pièces imprimées en 3D. Cette valeur est optimale selon les précédents tests de certains membres du groupe et les préconisation trouvée en ligne.
- Certains composants disposent de trous pour pouvoir les fixer. Nous utilisons de la visserie M3 mécanique. Au lieu d'imprimer des filetages dans la pièce, qui ne seraient pas suffisamment précis, nous décidons d'y intégrer des inserts filetés chauffés au fer à souder et noyés.
- Nous avons prévu des passages de câble assez larges, de l'avant à l'arrière du sous-marin.

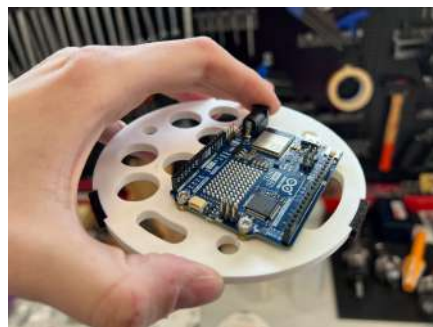
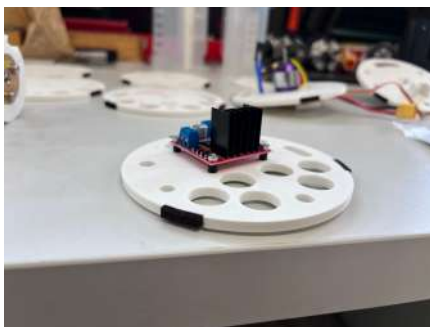


FIGURE 3.4 – Exemple de certains disques (à gauche, celui supportant le contrôleur moteur, éloigné de la surface par des entretoises elles aussi imprimées et à droite, celui tenant l'Arduino)

3.2.1.2. Ogives avant et arrière

Le moyen le plus simple, qui combine esthétique et solidité était d'utiliser un tube en plexiglas transparent $\varnothing 128$ mm et de boucher ses extrémités par des impression 3D. Certaines conceptions comme les vidéos [4] et [5] utilisent uniquement du PLA pour la structure du drone, ce que nous voulions éviter pour deux raisons

- **L'esthétique** : disposer d'un corps transparent n'est pas possible avec de l'impression 3D. Au mieux, un filament translucide existe mais ne permet pas de voir clairement à travers. D'autre part, étant donné le mécanisme intérieur, le fait de pouvoir voir l'électronique depuis l'extérieur semblait primordial.
- Les **problèmes d'étanchéité** : il aurait fallu imprimer des tronçons (au moins 6) et les joindre entre eux. Nous multiplierions les sources de fuite.



FIGURE 3.5 – Ogive arrière, sortie d'imprimante

3.2.1.3. Réalisation de la batterie

Pour assembler la batterie 3S2P dimensionnée précédemment, il était nécessaire de commencer par placer les cellules dans le support dédié présenté en [FIGURE 2.2](#).



FIGURE 3.6 – Soudeuse par points Dcreate 756

Une fois les cellules placées, il a fallu souder les bandes de nickel permettant de relier les différentes cellules selon le schéma de la [FIGURE 2.24](#) réalisé dans la partie conception. Pour souder les bandes conductrices aux cellules, nous avons utilisé une soudeuse par point *Dcreate 756*. Nous nous sommes assurés que les bandes de nickel ne se décollaient pas pour chaque soudure en tirant sur les bandes avec une force modérée.

Une fois les bandes conductrices soudées aux cellules, nous avons soudé des fils d'une section suffisante pour supporter 20 A, toujours en respectant la [FIGURE 2.24](#).

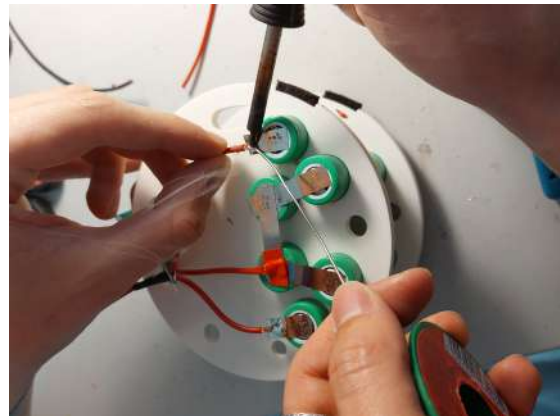


FIGURE 3.7 – Soudage par point à gauche et soudage classique à droite

Nous nous sommes aussi assurés qu'il n'y ait aucun court-circuit possible, notamment en protégeant les soudures avec des gaines thermorétractables ou du scotch d'électricien lorsqu'il était impossible de mettre une gaine.

Une fois la batterie montée, il ne restait plus qu'à souder les câbles de la batterie sur le BMS pour avoir une batterie fonctionnelle.



FIGURE 3.8 – Avant et arrière de la batterie assemblée



FIGURE 3.9 – Chauffage d'une gaine thermorétractable à l'aide d'un pistolet à air chaud

Remarque : Nous notons que le BMS dispose de points d'entrée qui correspondent à chaque électrode de chaque élément en série, afin de garantir l'équilibrage des tensions. Il est donc primordial de soigner ces connexions et de bien respecter ces correspondances. Il a fallu également chauffer énormément étant donné la section conséquente des câbles. Les soudures ne sont pas faciles à faire.

3.2.2. Gouvernails et direction

3.2.2.1. Usinage des axes

Pour la mécanique de direction, et pour permettre le pivot des gouvernails, des axes sont nécessaires, percés et taraudés de manière très précise. De toute évidence, ces axes n'allaient pas être imprimés en 3D, mais doivent être en acier. Après discussion avec Bernard Abiven, chef de l'atelier mécanique de l'école, il nous a proposé des axes en acier $\varnothing 6$ mm.



FIGURE 3.10 – Usinage sur fraiseuse des axes et montage sur les gouvernails

Nous les avons donc percé selon les cotes indiquées par le dessin technique généré dans *Fusion 360* présenté en ANNEXE 1 puis taraudé pour pouvoir y visser les biellettes commandées par les servomoteurs. Les gouvernails s'enfichent sur ces axes et sont sécurisées par des vis M3, vissées dans le PLA à travers l'axe comme présenté en FIGURE 3.10 à droite.

3.2.2.2. Tiges de commande

Pour la réalisation des tiges de commande, servant à faire pivoter les gouvernails, nous optons pour des bielles bi-rotulées permettant de garantir un assemblage isostatique, sans contraintes internes à la chaîne ouverte.

La FIGURE 3.11 présente le montage final à l'intérieur de l'ogive arrière. Sont présents :

- les supports des servomoteurs, intégrés dans la coque intérieure de l'impression 3D et qui reçoivent des inserts filetés pour y visser une plaque pour empêcher leur mouvement lorsque l'index tourne
- un des axes qui apparaît horizontalement
- la biellette excentrée qui est actionnée par les servomoteurs démontés pour la photo.

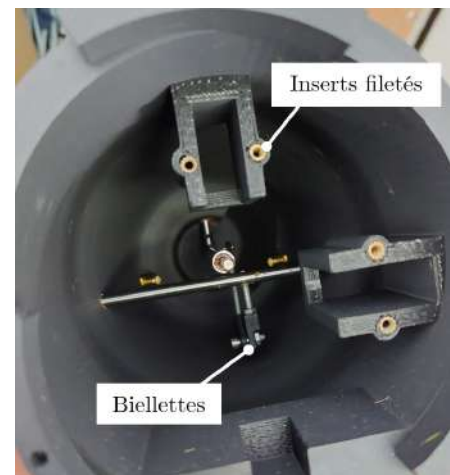


FIGURE 3.11 – Intérieur de l'ogive arrière

3.2.3. Câblages



FIGURE 3.12 – Câble coaxial final

Afin de transmettre la vidéo et les commandes depuis le sous-marin jusqu'à la bouée contenant les antennes, nous avons choisi d'utiliser des câbles coaxiaux. Notre partenaire *Alcatel Lucent Enterprise* nous a fourni un peu plus de 20 mètres de câbles RG58, que nous avons recoupés en 2 câbles de 10 mètres de long : un pour la transmission des commandes, et un pour la vidéo. Pour pouvoir les utiliser, il nous fallait des connecteurs SMA Male en chaque extrémités.

N'ayant jamais installé de tels connecteurs auparavant, nous avons suivi les indications d'un tutoriel en ligne [9].



FIGURE 3.13 – Installation du connecteur SMA Male

Pour permettre un usage classique du câble, nous avons serti des connecteurs SMA Male en chaque extrémité, fourni également par *Alcatel Lucent Enterprise*. Il faut commencer par retirer environ 1 cm de gaine extérieure. Ensuite, nous avons retiré environ 4 mm de diélectrique, pour pouvoir enfonce sur l'âme un picot métallique. Ce picot est serti mécaniquement grâce à une pince à sertir. Puis, il faut recouper un peu du blindage extérieur, afin de pouvoir insérer la partie restante du connecteur, également sertie.

Finalement, nous obtenons les connecteurs de câbles coaxiaux habituels, avec des dimensions de câbles personnalisées.

3.2.4. Test composants

Afin de s'assurer du bon fonctionnement des composants au vu de leur provenance, une série de tests unitaires a été effectuée sur chacun d'eux afin de pouvoir vérifier que chacun remplissait sa fonction primaire.

Ainsi chaque composant a pu être testé, hormis certains comme le BMS car la réalisation de la batterie fut plus tardive.

Cela nous a permis d'avoir une première compréhension des éléments mais surtout d'avoir des premières structures de codes qui nous serviront grandement dans la suite du projet comme point de départ pour le code final.

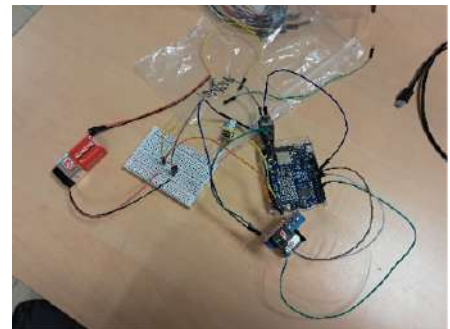


FIGURE 3.14 – Banc de test

3.2.5. Calibrage

Après cette première approche, nous avons pu en profiter pour calibrer les composants qui en avaient besoin, notamment l'accéléromètre et le convertisseur analogique-numérique, pour faire en sorte que l'accéléromètre détecte bien un angle se référant au vecteur poids ou que le CAN ait la bonne résolution. C'est d'ailleurs ainsi que nous avons pu corriger la petite erreur de 5° que nous avons présenté lors de la revue de projet.

```
// MPU calibration: set YOUR offsets here.
mpu.setXAccelOffset(-240);
mpu.setYAccelOffset(-3189);
mpu.setZAccelOffset(759);
mpu.setXGyroOffset(42);
mpu.setYGyroOffset(-31);
mpu.setZGyroOffset(-56);
```

FIGURE 3.15 – Offsets mpu

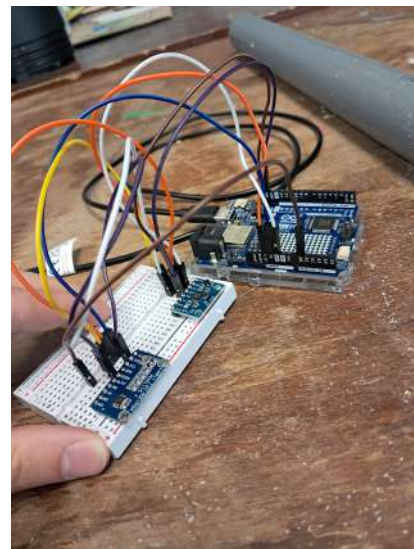


FIGURE 3.16 – Calibrage mpu et can

3.2.6. Transmission radio

Comme indiqué précédemment, la transmission d'information de l'utilisateur au sous-marin dans l'eau se fait en partie par câbles coaxiaux. Pour ce faire, nous avons utilisé des câbles RG58, adaptés aux moyennes et hautes fréquences, des connecteurs SMA utiles pour la gamme de fréquences 1 GHz-20 GHz, et les antennes associées.

Dès lors, nous avons découpés et sertis deux câbles de 10 m chacun, un destiné à la transmission des commandes de la radio (donc 2.4 GHz) et l'autre à la transmission vidéo (5.8 GHz).

Pour vérifier le bon fonctionnement de ces câbles aux fréquences voulues et tester la qualité des connecteurs, nous avons alors fait appel à Jérémie Hemery, qui, à l'aide de l'analyseur de réseau, nous a permis de nous procurer les paramètres S des éléments :

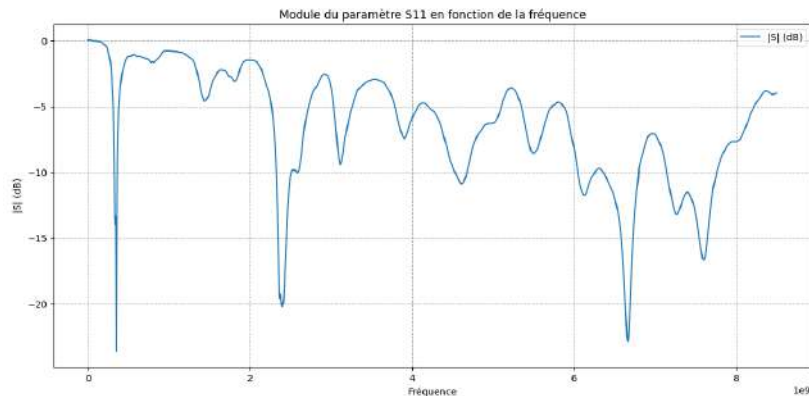


FIGURE 3.17 – Coefficient de réflexion (s_{11}) des antennes

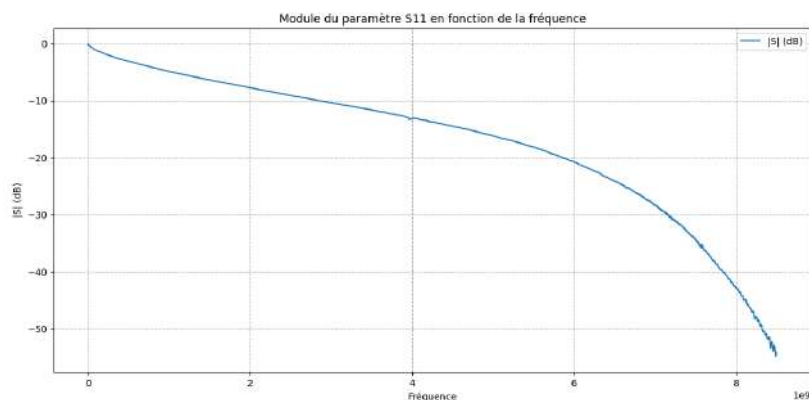


FIGURE 3.18 – Coefficient de transmission (s_{12}) des câbles

Les deux graphes sont assez encourageants pour la transmission de commande, nous observons une très faible réflexion pour les antennes à 2.4 GHz, et une transmission relativement satisfaisante pour 10 m de câble, la puissance est divisée par 10 mais le récepteur est très sensible (jusqu'à -120 dBm). De plus, les courbes pour les deux câbles différents sont presque superposables, ce qui indique ou semble indiquer que les sertissages ont été bien faits.

Cependant, un problème se pose pour la transmission vidéo, l'antenne est moins adaptée, et nous perdons un facteur 100 (-20 dB) dans le câble. Nous avons vu précédemment que l'atténuation totale entre l'émetteur et le récepteur devait être inférieure à 147 dB. Ici, nous perdons 20 dB dans le câble, il reste donc 127 dB pour le chemin dans l'air entre l'antenne de la bouée et l'antenne du récepteur. Or d'après Wikipédia, l'atténuation entre deux antennes sans gain est donnée par

$$A = 22 \text{ dB} + 20 \log \frac{D}{\lambda} \quad (3.1)$$

avec D la distance entre les deux antennes et λ la longueur d'onde du signal transmis (5 cm). Après application numérique, avec $A = 127 \text{ dB}$ et $\lambda = 5 \text{ cm}$, nous obtenons $D = 8900 \text{ m}$.

Intégration, tests et validation

À présent, maintenant que les modules individuels ont été testés, il reste à faire l'assemblage global. Nous attaquons cette partie de manière sereine et méthodique, en suivant scrupuleusement la 3D faite sous logiciel.

4.1. Assemblage

4.1.1. Environnement de travail

Nous avons la chance d'avoir été mis en contact avec Bernard Abiven pour les usinages mécaniques détaillés dans les parties précédentes, et il nous a proposé une table de travail dans son atelier pour disposer de tous les outils à l'assemblage.



FIGURE 4.1 – Table de montage dans l'atelier mécanique de IMT Atlantique et machine d'usinage

Nous avons passé la quasi totalité du montage dans son atelier et nous le remercions chaleureusement pour son accueil et ses précieux conseils.

4.1.2. Méthodologie de montage

Pour l'assemblage du sous-marin, nous commençons par pré-assembler toute l'électronique qui va se glisser dans le tube de plexiglas.



FIGURE 4.2 – Rangement des composants

Une fois les tiges filetées découpées à la bonne longueur et le tube en plexiglas coupé proprement à la scie à métaux, nous pouvions alors attaquer le montage mécatronique.

Il s'agissait alors de repartir de la conception 3D sur *Fusion 360*, et d'assembler les disques en respectant les intervalles. Au préalable, nous disposons tous les composants mécaniques et électroniques, visible en FIGURE 4.2, sur l'établi pour les identifier clairement et ne rien oublier.

La position des disques est définie par des écrous/contre-écrous qui les positionnent et les maintiennent fermement.

Les disques pré-équipés de leurs composants électroniques, puis assemblés, sont alors montés sur les tiges filetées et visibles sur la figure suivante :



FIGURE 4.3 – Électronique assemblée

La séquence d'assemblage de la section des ballasts fut la plus complexe : il fallait usiner le corps des seringues au Dremel pour permettre le passage des barres de lest, ainsi qu'assembler l'index du potentiomètre dans le piston avant de tout monter sur le disque.

Remarques : Nous voyons ici que la CAO, bien que très utile, ne suffit pas pour anticiper les séquences de montage, sauf à faire un travail en amont d'imagination de cette séquence. Plus généralement, il faut toujours réfléchir aux accès pour positionner les outils (serrer une vis au tourne vis, ou un écrou à la clef plate), qui nécessitent souvent un dégagement bien plus important que celui de la vis ou de l'écrou.

4.1.3. Câblage et soudures

A présent, il reste encore à interconnecter les modules. L'objectif est de pouvoir démonter facilement car nous sommes encore en phase d'essai. Nous mettons donc en place des connecteurs JST et DuPont, les soudons en prenant soin d'isoler nos connexions à l'aide de gaine thermo-rétractable.

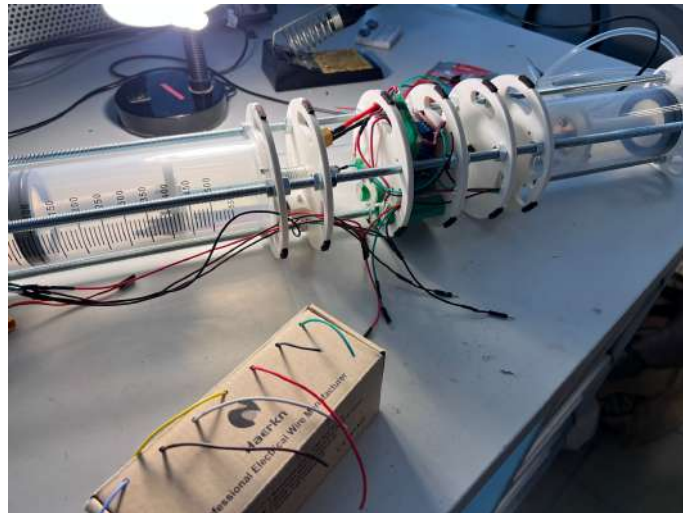


FIGURE 4.4 – Câblage sur sous marin

Les câbles qui ont été utilisés pour le projet sont de section variable en fonction du courant qui les traverse. Les connecteurs, eux aussi doivent supporter ces courants et sont relativement encombrants.

4.1.4. Autres usinages



FIGURE 4.5 – Découpe à la scie des lests

Finalement, nous avons utilisé quelques autres techniques pour remplir les exigences imposées par certaines pièces.

Les lests, dimensionnés précédemment, sont issus d'une barre brute d'acier extrudée au diamètre final ($\varnothing 20$ mm). Elles sont coupées à la scie alternative, qui reproduit la scie à métaux manuelle en gérant automatiquement l'avance et qui s'arrête lorsque la coupe est terminée, permettant à l'utilisateur de vaquer à d'autres occupations pendant ce temps.

Les faces sont alors dressées au tour à métaux, et les arrêtes chanfreinées pour un résultat plus propre.

D'autre part, nous voulions implanter les caméras dans la partie avant du sous-marin. Elles y sont placées au contact d'une fenêtre transparente de plexiglas de 5 mm d'épaisseur, dont la forme est circulaire pour des raisons de symétrie. Cette découpe peut être faite précisément et facilement grâce à une découpeuse laser.

Le choix du matériau est très important pour de la découpe laser. En fonction de l'indice d'absorption du matériau, il est soit découpé proprement, soit il brûle. C'était malheureusement le cas pour notre première découpe des disques, initialement prévus en plexiglas. C'est pourquoi nous nous sommes rabattus sur de l'impression 3D.



FIGURE 4.6 – Découpe laser de la fenêtre de caméra

4.2. Tests et résultats

4.2.1. Tests d'étanchéité de l'ensemble

L'une de nos principales préoccupations dès le début du projet était de vérifier, une fois la coque extérieure du sous-marin montée, si elle s'avère au final étanche ou non. Pour se faire, nous avons pensé à deux protocoles de test :

- Puisque les parents d'Antonin étaient en vacances quelques jours en Bretagne, non loin de IMT Atlantique et que leur location disposait d'une piscine, c'était donc l'endroit parfait pour tester l'étanchéité dans des conditions stables
- D'autre part, suite à un échec lors de la première salve de tests, nous prévoyons une grande poubelle remplie d'eau



FIGURE 4.7 – Tests en bac

À l'issue de ces tests, plusieurs constats sont faits :

Durant le premier test en piscine, il s'avère que les ogives avant et arrière fuient. Dès que l'ensemble est plongé dans l'eau, nous identifions des micro-fuites venant pour la partie avant des joints d'étanchéité toriques et pour la partie arrière de l'articulation des gouvernails et des joints.

Pour pallier à ce problème, nous décidons de coller les joints toriques avec du silicone dans les gorges : nous pensons que le problème vient de la porosité du PLA qui pourrait faire passer de l'eau par l'arrière du joint.

Après avoir refait les tests, cette fois-ci dans des bacs d'eau, comme le montre la [FIGURE 4.7](#), nous constatons que l'ogive avant est totalement étanche, il ne reste aucune micro fuite. Cependant, il reste des fuites à l'arrière.

Nous en venons à un constat clair : le PLA dans certains cas, avec des pièces anguleuses, est poreux et laisse passer l'eau à travers sa structure.

4.2.2. Test de l'asservissement et du remplissage des ballasts

Afin d'assurer au mieux le remplissage des ballasts et l'asservissement du système, nous avons réalisé des tests hors de l'eau, qui nous ont permis d'ajuster et de peaufiner notre code *Arduino*. En effet, le code *Arduino* permet de contrôler la vitesse des moteurs pour remplir les ballasts. Quand nous voulons faire couler ou remonter le sous-marin à la surface. La zone morte de l'asservissement et la vitesse à laquelle sont remplis les ballasts lors de l'asservissement sont aussi gérés par le code. Pour ces différents tests, nous avons à chaque fois plongé les tuyaux en silicone reliés aux seringues dans un grand seau d'eau.

4.2.2.1. Remplissage des ballasts

Pour le remplissage des ballasts sans la partie asservissement, il faut s'assurer que les deux ballasts se remplissent bien. Lorsque nous observons leur fonctionnement, nous constatons que les ballasts ne se remplissent pas exactement à la même vitesse. Cela peut venir du fait que les composants ne sont pas parfaitement identiques, ou d'une différence de frottements avec la paroi des seringues. Cette légère différence est corrigée par la partie asservissement.

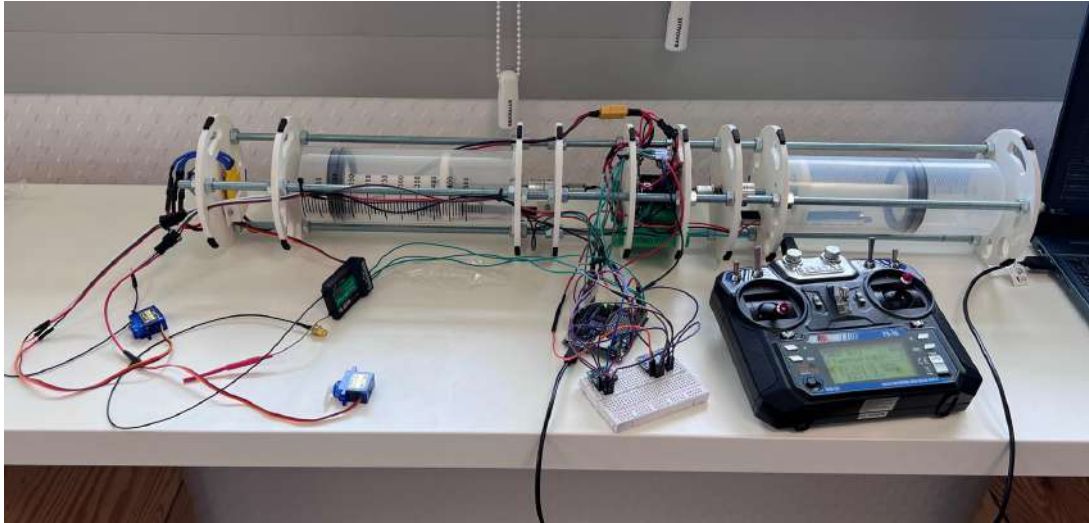


FIGURE 4.8 – Montage de test pour le remplissage des ballasts

4.2.2.2. Asservissement de l'assiette

Pour peaufiner l'asservissement, nous accrochons le sous-marin en son centre, à l'aide de 2 fils accrochés aux tiges filetées, afin de voir l'inclinaison du sous-marin et les effets des remplissage des ballasts. Pendant ces tests, nous avons ajusté la zone morte dans le code *Arduino*.

Chapitre 5

Communication : réalisation de notre site internet



FIGURE 5.1 – Capture d’écran du site

Site accessible depuis le lien suivant : <https://abyssse.netlify.app>

5.1. Objectifs du site internet

Le principal objectif de notre site internet est de présenter et valoriser notre projet de sous-marin auprès d’un public varié, allant des encadrants et enseignants aux autres étudiants, voire au grand public. Le site sert de vitrine numérique pour expliquer notre démarche, les aspects techniques du projet, présenter les membres de l’équipe ainsi que l’évolution du prototype. Il constitue également un support de communication clair et structuré, permettant à toute personne intéressée de découvrir notre travail de manière accessible et attractive.

5.2. Conception du site

5.2.1. Choix de l’architecture

Nous avons opté pour une architecture de site dynamique, pensée comme une véritable expérience immersive pour l’utilisateur. Plutôt qu’un simple site vitrine classique, nous avons conçu une interface fluide et interactive, où l’internaute peut découvrir l’ensemble du projet en un simple scroll vertical. Ce choix permet une narration continue et intuitive, renforcée par de nombreuses animations visuelles qui accompagnent les différentes sections. Afin d’accentuer l’immersion, nous avons également intégré une ambiance sonore discrète en fond,

composée de bruits marins et d'un sonar, qui plongent le visiteur dans l'univers du sous-marin dès son arrivée sur le site. L'objectif est que la navigation elle-même fasse écho à l'identité du projet : technique, fluide, et captivante.

5.2.2. Contenus préparés

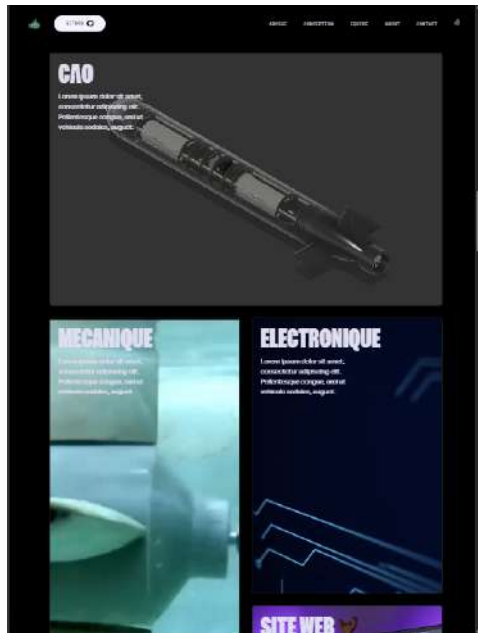


FIGURE 5.2 – Partie sur le fonctionnement du sous-marin

Le site regroupe divers contenus soigneusement organisés afin de présenter le projet de manière complète et engageante.

Une section est dédiée à la présentation de l'équipe, permettant de découvrir les rôles et contributions de chaque membre. Une autre partie décrit en détail le fonctionnement du sous-marin, ses caractéristiques techniques, ainsi que les choix de conception réalisés.

Nous y avons également intégré une visualisation 3D interactive du modèle du sous-marin, offrant aux visiteurs une vue réaliste et manipulable de notre prototype. Pour illustrer l'avancement du projet, une galerie photo regroupe des images des différentes étapes de fabrication et de tests.

Enfin, un lien vers notre dépôt GitHub permet d'accéder librement à l'ensemble des fichiers, ressources et codes sources, renforçant la transparence et le partage autour de notre démarche.

5.3. Réalisation technique

5.3.1. Technologies utilisées

5.3.1.1. Langages utilisés

Pour la réalisation de notre site internet, nous avons choisi d'utiliser les technologies web modernes afin de garantir une interface à la fois dynamique, responsive et facile à maintenir. Le site a été développé avec React, une bibliothèque JavaScript qui facilite la création de composants interactifs et réutilisables. Pour le design et la mise en page, nous avons utilisé Tailwind CSS, un framework utilitaire qui nous a permis de styliser rapidement le site tout en conservant une bonne cohérence visuelle. Nous avons également intégré GSAP (GreenSock Animation Platform) pour apporter des animations fluides et améliorer l'expérience utilisateur.

5.3.1.2. Modélisation 3D

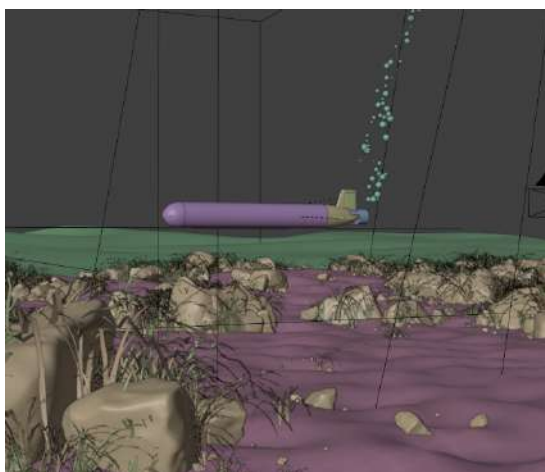


FIGURE 5.3 – Modélisation 3D sur Blender

Afin de rendre notre site internet plus immersif et visuellement attrayant, nous avons réalisé une modélisation 3D complète du sous-marin à l'aide du logiciel Blender. Cette modélisation a servi de base à plusieurs animations intégrées au site, illustrant le sous-marin dans différentes scènes et environnements sous-marins. Nous avons accordé une attention particulière au réalisme visuel, en reproduisant des effets de lumière filtrée, la présence de particules en suspension dans l'eau, ainsi que des mouvements fluides du sous-marin. Chaque scène a été pensée pour renforcer l'immersion de l'utilisateur, comme s'il suivait le sous-marin dans son exploration. Ces animations permettent non seulement de mettre en valeur notre travail technique, mais aussi d'offrir une dimension presque cinématographique à la navigation sur le site.

5.3.2. Hébergement

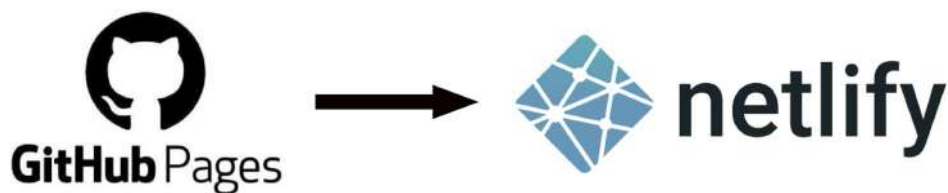


FIGURE 5.4 – Déploiement sur Netlify grâce à Github

Le site internet du projet a été hébergé gratuitement sur la plateforme Netlify, qui offre une solution simple et efficace pour déployer des sites web statiques ou basés sur des frameworks comme React. Grâce à l'intégration avec GitHub, Netlify récupère automatiquement le code depuis notre dépôt Git à chaque mise à jour. Cela nous permet de bénéficier d'un déploiement continu : dès qu'une modification est poussée sur la branche principale du projet, le site est automatiquement reconstruit et mis à jour en ligne. Ce système d'hébergement nous a permis de maintenir facilement une version à jour du site sans intervention manuelle, tout en assurant une bonne accessibilité et disponibilité pour les visiteurs.

Chapitre 6

Retour d'expérience et axes d'améliorations

6.1. Gestion de projet

6.1.1. Retour d'expérience sur la gestion de projet

6.1.1.1. Planification temporelle

Voici l'évolution de notre planification au cours du projet :

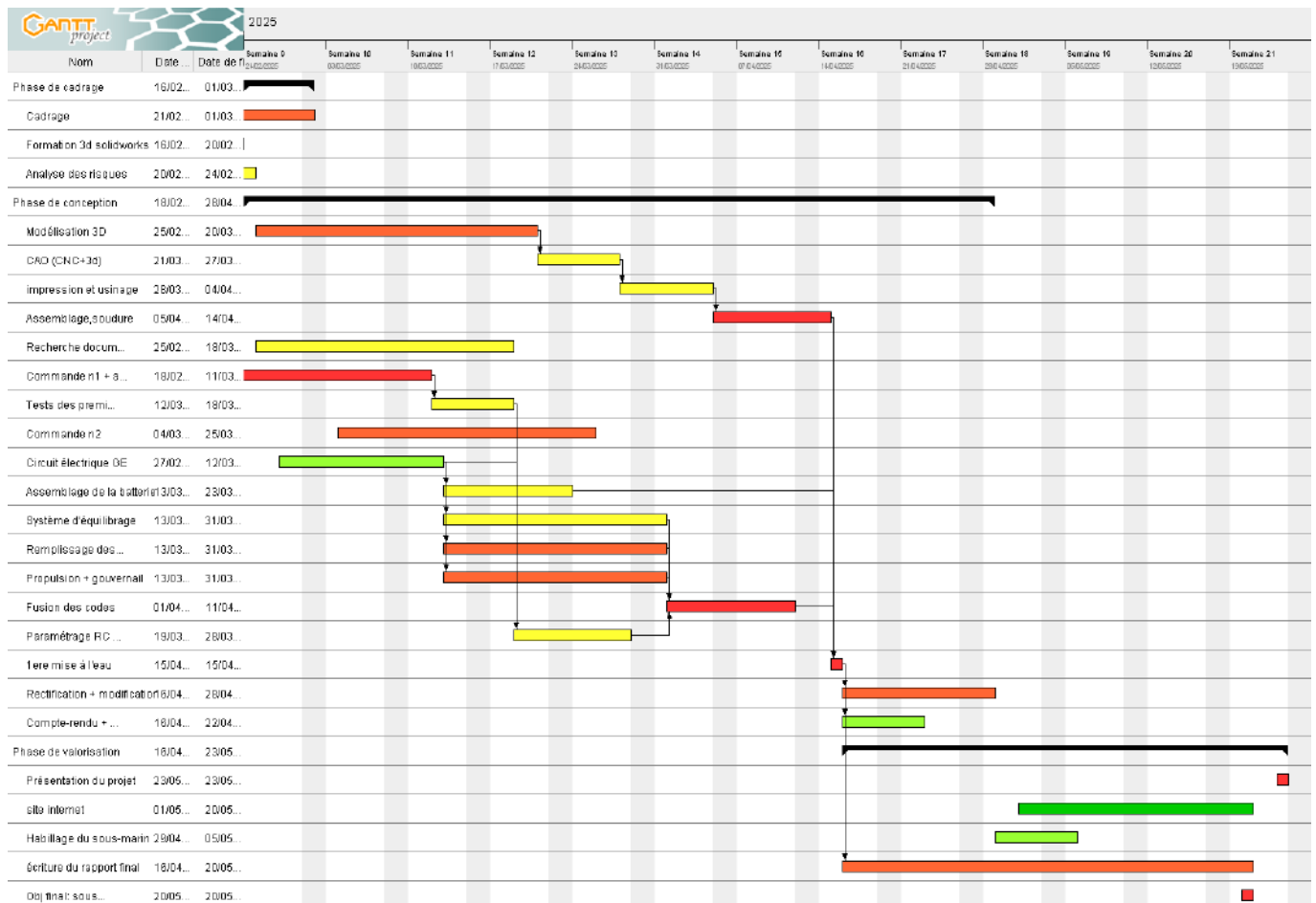


FIGURE 6.1 – Gantt initial

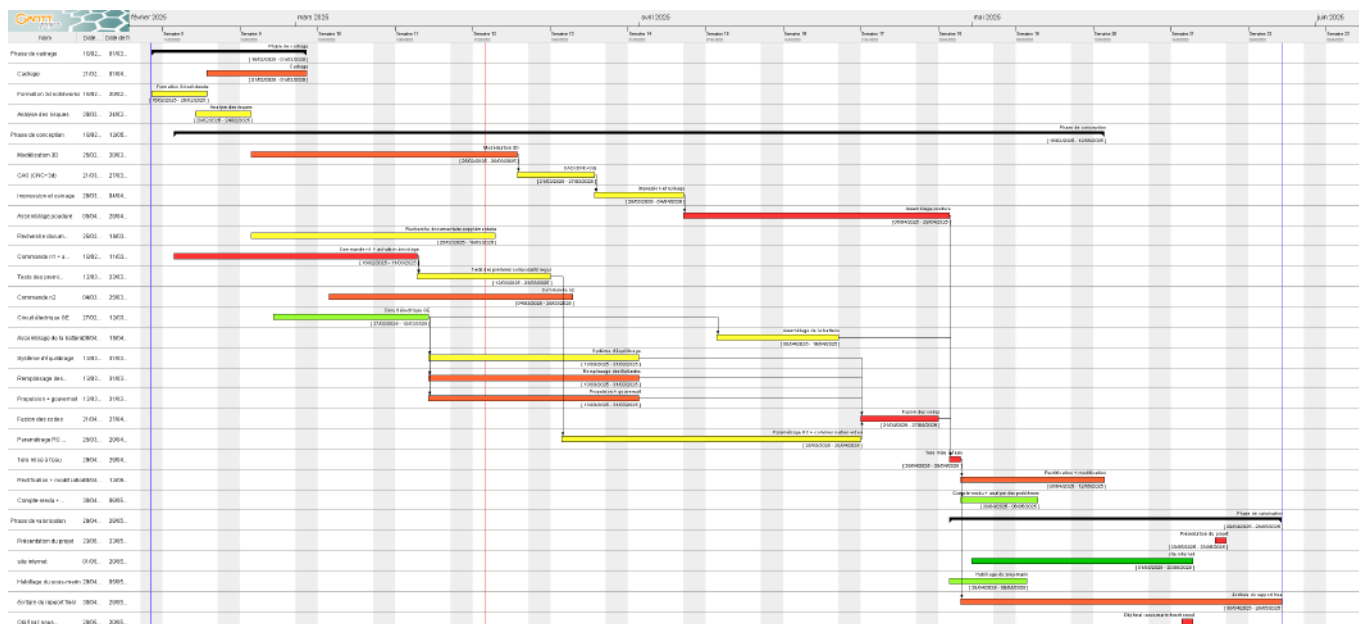


FIGURE 6.2 – Gantt mi-projet

Entre le Gantt initial et le Gantt mi-projet :

- Assemblage de la batterie : décalé de S11 à S15.
- Assemblage et soudure : durée allongée, fin repoussée de S15 à S18.
- Fusion des codes : décalée de S14 à S17.
- Paramétrage RC et radiocommande : fin décalée de S14 à S17.

Au final, c'est toute la phase de conception dont la fin est décalée de S18 à S20.



FIGURE 6.3 – Gantt final

Entre le Gantt mi-projet et le Gantt final :

- Paramétrage RC : décalé à S19.
- Assemblage soudure, assemblage de la batterie, fusion des codes : tous décalés d'une semaine.
- Ajout d'étapes finales : fabrication de la bouée flottante, installation de la ligne de vie, et première mise à l'eau.
- Création du site : période allongée jusqu'à la fin du projet.

Nous étions au début sceptiques vis-à-vis de l'utilité des tableaux Gantt. Mais ils se sont révélés très utiles. C'est très sain de commencer par cette planification qui permet de se rendre compte des échelles de temps, de poser toutes les étapes de la conception et de démarrer directement efficacement. Ensuite, il faut l'actualiser régulièrement pour s'adapter aux problèmes qui apparaissent tout en gardant en tête les échéances. GanttProject est très utile et tous les membres de l'équipe Pronto envisagent sérieusement de l'utiliser à l'avenir pour d'autres projets.

6.1.1.2. Gestion des risques

Nous avons en premier lieu tenté de prévoir et d'éliminer les potentiels risques, que nous pouvions envisager, en amont. Cela a pu notamment être réalisé grâce à la CAO 3D qui a été très rigoureuse. De cette manière, l'assemblage s'est bien déroulé et a permis d'éviter de gaspiller des composants. Le risque principal était l'étanchéité et nous avons donc concentré nos efforts là-dessus ces dernières semaines. Mais malgré nos précautions, nous n'avons pas réussi à écarter ce risque (pour plus de précision, voir la partie Test).

Ensuite, il y a eu des risques qui sont apparus sans que nous les ayons envisagés. Par exemple, nous avons initialement récupéré une BMS 4s pour la batterie, mais il s'est avéré que nous avions besoin d'une BMS 3s. L'équipe d'électronique a donc dû démonter la batterie et refaire le montage avec le BMS 3s après que nous l'ayons acheté. Il est aussi arrivé parfois que le risque qui apparaît nous force à changer de solution technique. Ainsi, alors que nous voulions mettre initialement 4 gouvernails au sous-marin, nous avons pensé autrement la tringlerie des gouvernes pour pouvoir laisser passer l'axe moteur. De fait, nous avons opté pour une solution avec 3 gouvernails.

Ainsi, nous avons tenté d'anticiper et de limiter au maximum l'apparition de problèmes inattendus, et cela a été très efficace, bien que difficile. Pour ce qui est des problèmes imprévus, nous avons changé de solution technique quand c'était possible ou alors nous avons dû changer de composants. Au final, parmi les problèmes traités, il n'y a que pour l'étanchéité que nous n'avons pas trouvé de solution complète.

6.1.2. Axes d'amélioration de la gestion de projet

6.1.2.1. Axes d'amélioration de la planification temporelle

Pour ce qui est de la planification temporelle, nous savons utiliser Ganttproject et nous avons bien cerné son intérêt fondamental. Néanmoins, nous avons aussi pris connaissance en début de projet de Trello, un autre outil de planification des tâches que nous avons abandonné. Mais cet outil peut s'avérer très utile, comme complément à Gantt, dans le cadre d'un projet plus long et avec plus de personnes. En effet, Trello est très intéressant pour suivre plus précisément les tâches en cours, assigner des rôles et gérer le flux de travail. C'est donc un outil que les membres du groupe seraient capables d'utiliser dans le futur.

6.1.2.2. Axes d'amélioration de la gestion des risques

La gestion des risques a été globalement efficace. La modélisation 3D paramétrée a permis d'éviter un nombre incalculable de problèmes et, pour ce qui est des problèmes inattendus, notre organisation rigoureuse nous a permis de les surmonter. Les risques qui avaient été soulignés dès le début ont été le fruit de mûres réflexions et ont souvent été réglés. Toutefois, pour résoudre le problème de l'étanchéité, nous aurions eu besoin de plus de temps ou de moyens pour trouver des solutions techniques parfaites.

Ainsi, notre gestion des risques a été efficace malgré un point noir. Nous aurions dû réaliser plus de tests d'étanchéité en amont, bien que cela aurait été très chronophage.

6.2. Travail d'équipe

6.2.1. Retour d'expérience sur le travail d'équipe

6.2.1.1. Outils mis en place

Dès le début du projet, plusieurs outils ont été déployés pour structurer et suivre efficacement notre travail :

- **Partage IMT** : Plateforme de stockage collaborative permettant de centraliser nos documents (rapports, expériences, ressources). M. Le Pennec y avait également accès.
- **GanttProject** : Application utilisée pour planifier le projet à différentes échelles temporelles. Le planning a été régulièrement ajusté, nous permettant de garder une vision globale.
- **Mattermost** : Choisi pour sa dimension plus professionnelle que WhatsApp ou Discord. Nous y avons organisé les échanges et le partage de fichiers dans des canaux dédiés.
- **Liste de diffusion mail** : Utilisée pour archiver les échanges, faciliter la recherche d'informations et assurer une communication fluide avec notre encadrant.
- **Overleaf** : Plateforme collaborative idéale pour la rédaction de documents en \LaTeX . Très utile pour produire des rapports scientifiques structurés.

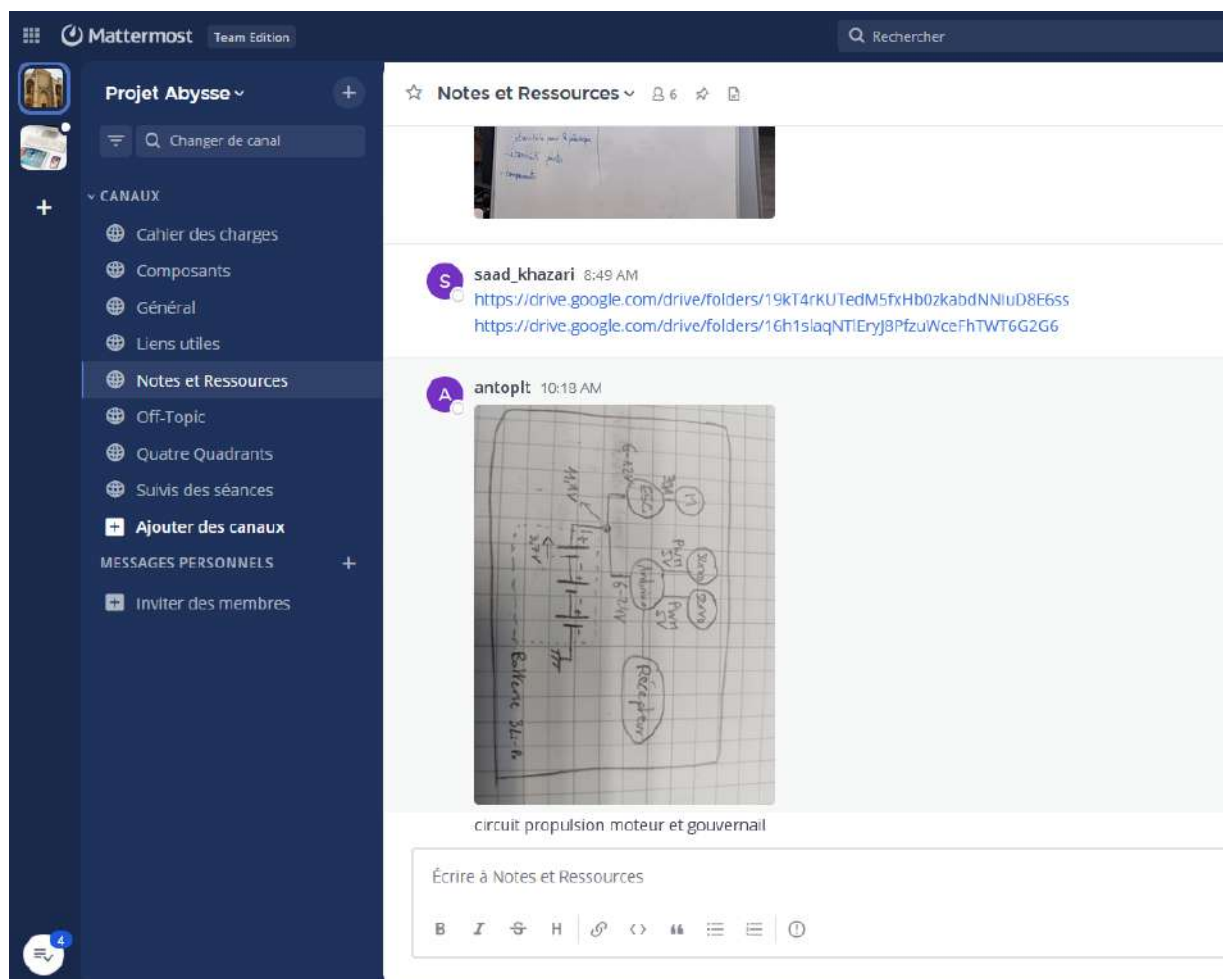


FIGURE 6.4 – Organisation du groupe Mattermost Projet Abysses avec 8 canaux

6.2.1.2. Planification

Une planification précoce a été essentielle pour avoir une vision claire du projet et adapter notre organisation en conséquence :

- **GanttProject** : Utilisé pour planifier le projet à moyen et long terme. Mis à jour régulièrement pour refléter les ajustements dus aux imprévus. L'outil permettait également à notre enseignant de suivre l'avancement. (Voir la partie planification)

6.2.1.3. Organisation

Notre organisation a été réfléchiée dès le début du projet et s'est révélée efficace :

- **Séances de travail** : Débutant par un ordre du jour et une répartition des rôles. En fin de séance, un compte-rendu est rédigé, accompagné de la définition des objectifs suivants.
- **Groupes thématiques** : Répartition selon les pôles techniques (électronique, mécanique, programmation...). Les rôles étaient redéfinis à chaque séance, souvent en binômes.
- **Recensement des compétences** : Chaque membre a identifié ses compétences et objectifs d'apprentissage. Cela a facilité la formation d'équipes motivées et complémentaires.

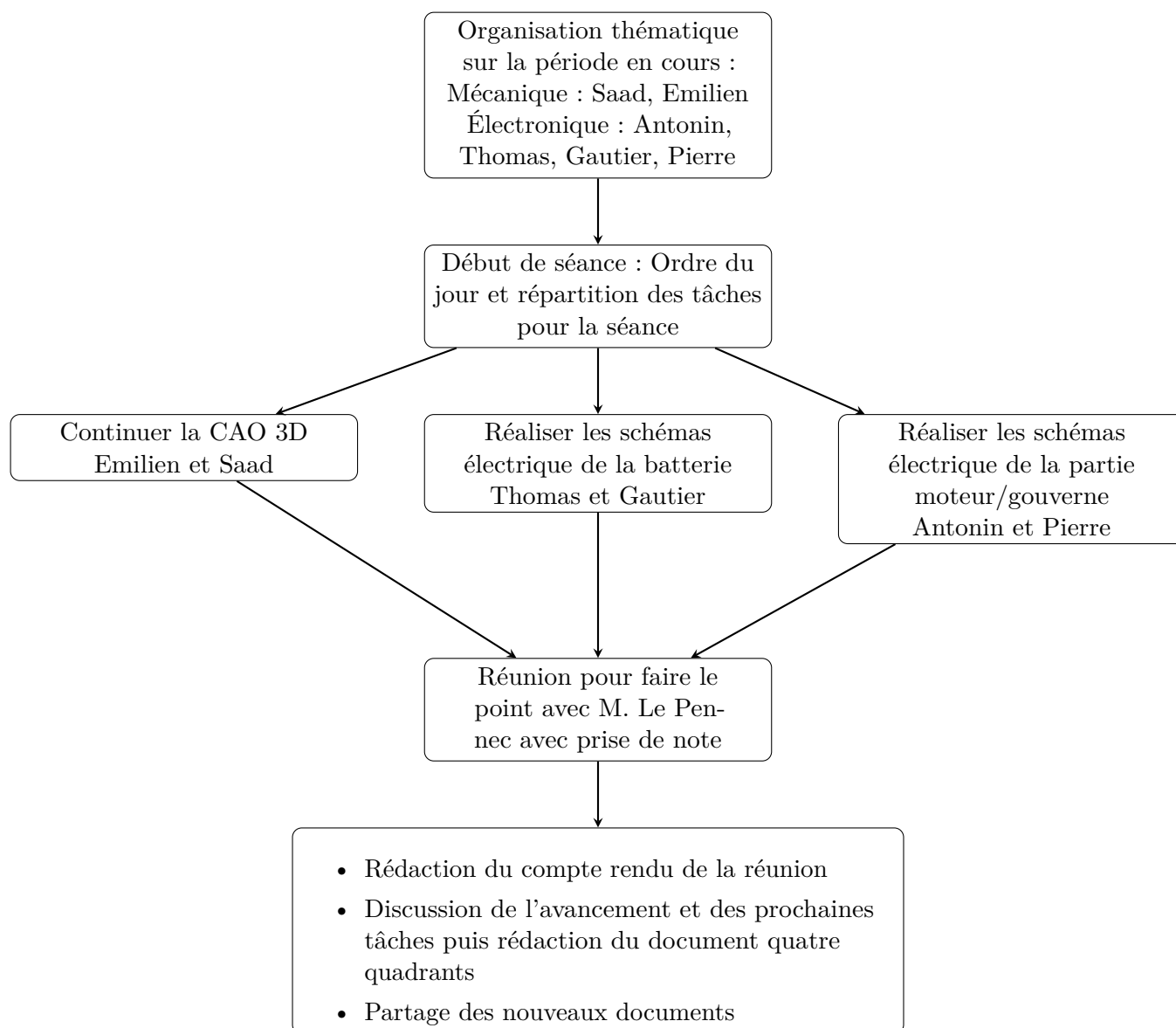


FIGURE 6.5 – Exemple d'organisation lors d'une séance

6.2.1.4. Relation avec l'enseignant encadrant

M. Le Pennec a été informé de l'avancement du projet de façon régulière, à la fois pour valider nos orientations et pour répondre à nos questions :

- **Réunions régulières** : Organisées tout au long du projet pour discuter des avancées et des difficultés rencontrées.
- **Livrables** : Transmis à chaque étape clé, ils ont permis de structurer le projet et de recueillir des retours constructifs.

- **Mise en relation** : M. Le Pennec nous a orientés vers des interlocuteurs clés comme M. Abiven (contribution essentielle), Mme Le Galle et M. Hemery, dont l'aide a été précieuse.

6.2.2. Axes d'amélioration du travail en équipe

Le travail en équipe a globalement été efficace tout au long du projet. Malgré une charge importante concentrée sur une courte période, nous avons su maintenir une progression continue. Toutefois, certains ajustements organisationnels auraient pu optimiser encore davantage notre fonctionnement.

6.2.2.1. Axes d'amélioration envisageables

- **Chef de séance** : désigner à chaque séance un chef de séance chargé de structurer le travail, de veiller au respect des objectifs, et de s'assurer que rien n'est oublié.
- **Chef de projet** : ce rôle centralise la coordination globale du projet. Le chef de projet est garant de l'avancement, tranche en cas de désaccord, et veille au respect des échéances, ce qui peut accélérer la prise de décision.

Pour conclure, une organisation plus structurée aurait pu présenter des avantages en termes d'efficacité. Cependant, notre groupe étant constitué de personnes qui se connaissent bien et ont choisi de collaborer sur un sujet commun, une hiérarchie plus formelle aurait pu générer des tensions inutiles. C'est pourquoi nous avons opté pour une organisation souple et collaborative. Néanmoins, nous avons maintenant pu expérimenter différentes organisations et nous connaissons leurs spécificités. Nous serons donc en mesure de nous organiser encore plus justement lors de projets futurs.

Conclusion

7.1. Résultats

Une fois des dizaines d’heures passées à la conception, à la fabrication, puis au montage du sous-marin et aux tests, nous arrivons au résultat présenté ci-dessous, dont nous sommes très fiers.



FIGURE 7.1 – Notre sous-marin

En résumé, nous sommes parvenu à

- Inventer et construire de A à Z une structure interne modulaire qui a montré son efficacité lors de multiples assemblages et désassemblages lors des tests
- Un dimensionnement global équilibré permettant le transport tout en embarquant l’ensemble de l’électronique nécessaire à son maniement
- Des concepts inédits de dérive fonctionnels et pilotables par télécommande radio
- Une chaîne de puissance sur mesure, correctement dimensionnée et également pilotable finement via la télécommande
- Un asservissement fonctionnel de l’assiette, combiné à un contrôle de la flottabilité via des ballasts à base de seringues
- Un prééquipement de fixation pour les caméras, dirigées vers l’avant et vers le fond et une prévision d’éclairage par leds puissantes à travers le tube transparent
- Une communication tout au long du projet

7.2. Rapport à l'objectif

Nous rappelons les objectifs fixés au début du projet en janvier 2025 :

OBJECTIF

Conceptualiser un drone sous-marin qui remplit les fonctions suivantes :

1. Piloter le sous marin à distance et le contrôler (profondeur et déplacement) de manière précise et sans fils
2. Transmettre une vidéo en direct à l'utilisateur. Nous prévoyons donc une bascule entre deux flux vidéo : l'un vers l'avant pour le pilotage et l'autre vers le fond pour l'observation

Pour le premier point, les éléments techniques sont en place, les commandes sont opérationnelles grâce au logiciel développé sur le micro contrôleur implémentant les asservissements et le transfert des commandes issues de la radiocommande. La chaîne de puissance est entièrement développée et fonctionnelle.

Les tests en milieu aquatique de la propulsion et des gouvernes reste encore à faire du fait d'un problème d'étanchéité sur l'ogive arrière provenant probablement de la technologie d'impression additive donnant des états de surface insuffisamment lisses pour l'étanchéité au niveau des joints toriques.

Pour le second objectif, il n'a pas été totalement validé, pour des raisons budgétaires et de temps. La fin de projet prépare néanmoins parfaitement une suite de l'étude. Tout est installé pour disposer les caméras, l'étude théorique a été faite, les câbles sertis.

7.3. Perspectives

Dès son lancement, ce projet ambitieux avait vocation à constituer un premier pas vers la création d'un drone sous-marin fonctionnel qui puisse explorer les fonds marins et prélever des données à l'aide de divers capteurs. La conception d'un premier prototype est un objectif qui semble atteint. Néanmoins, si le projet était prolongé, nous pourrions améliorer et corriger de nombreuses fonctionnalités du sous-marin.

7.3.1. Étanchéité

La coque actuelle du sous-marin n'étant pas étanche, il faudrait y remédier en priorité si nous avons la possibilité de continuer ce projet plus longtemps. Nous avons déjà imaginé plusieurs solutions aux problèmes d'étanchéité rencontrés, dont l'utilisation d'une peinture étanche, ou d'une résine bi-composantes à appliquer sur la coque extérieure pour remédier aux problèmes liés au matériau utilisé pour les impressions 3D.

7.3.2. Bouée et ligne de vie

Une fois l'étanchéité acquise, il faudrait mettre en pratique la conception de la bouée servant à la transmission des données ainsi que la conception de la ligne de vie qui permettrait une mise en l'eau.

7.3.3. Caméras

Comme expliqué dans le corps du texte, tout a déjà été préparé pour accueillir un système de retransmission vidéo. Il faudrait encore se procurer un récepteur 5,8GHz et implanter le circuit dans le sous-marin

7.3.4. Prévention de la rouille

Durant nos tests nous avons remarqué que les axes ont très vite rouillé. Cela vient du fait qu'il sont en acier et pas en acier inoxydable. Une des améliorations possible serait de réusinier ces axes dans un matériau inoxydable pour une plus grande longévité. Le risque est le gonflement de la pièce, à cause de la rouille qui engendrerait une casse de la pièce imprimée en 3D.

7.4. Nos impressions

Le projet Aysse a été une expérience très positive pour l'ensemble de l'équipe. Nous avons pris très à cœur ce projet et nous espérons que ce compte rendu reflétera tous les efforts que nous avons faits et tout le plaisir que nous avons pris. Ce projet aura été extrêmement enrichissant tant sur le plan technique que sur le plan organisationnel. En effet, face à la variété des domaines rencontrés, nous avons tous dû acquérir de nouvelles compétences et faire preuve de flexibilité. De fait, l'équipe n'aurait pas pu envisager de meilleur projet pour faire l'expérience de certains aspects du travail de l'ingénieur.

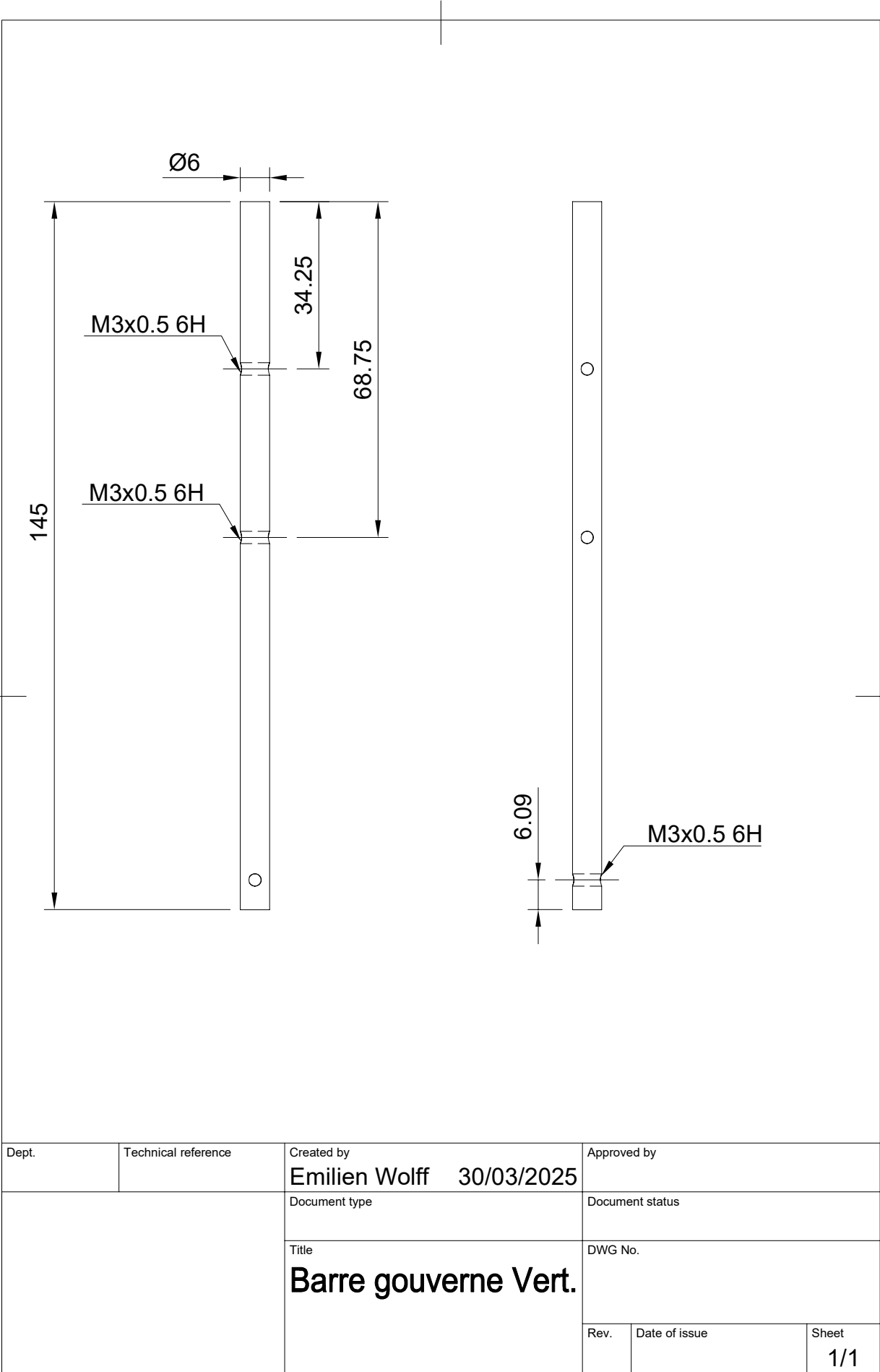


FIGURE 7.2 – L'équipe 83 PRONTO de gauche à droite : Saad, Gautier, Pierre, Thomas, Antonin et Emilien

Ce projet aura rythmé notre second semestre et, bien que nous n'ayons pas pu essayer notre sous-marin en condition réelle, nous sommes extrêmement fiers du travail réalisé. Le sous-marin produit est en lui-même une réussite technique et il ne manque pas grand-chose pour qu'il soit pleinement opérationnel. Nous espérons d'ailleurs que le projet aura un futur. Mais quoi qu'il arrive, ce compte rendu marque la fin d'un projet riche et enthousiasmant qui n'aura pas manqué d'ouvrir chez chacun d'entre nous des perspectives, tant sur le plan scientifique que personnel.

Annexes

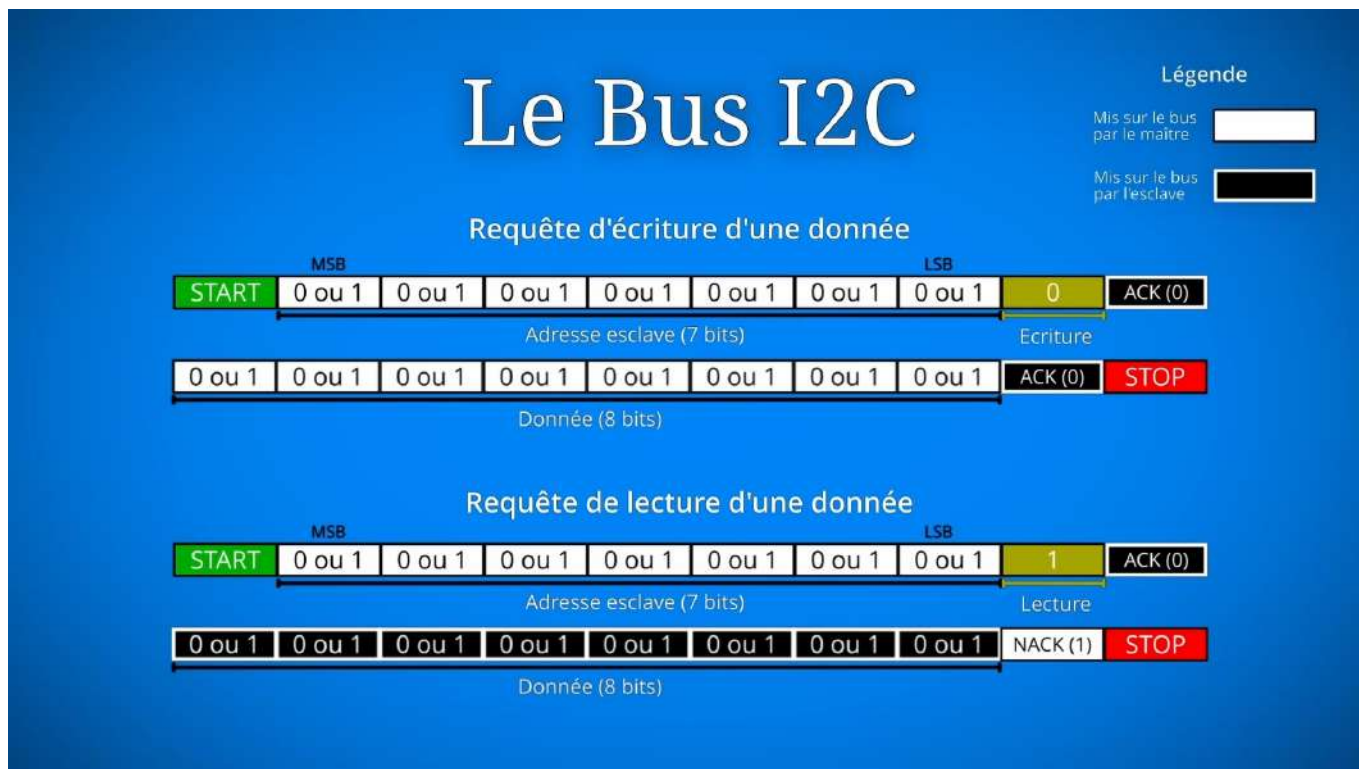
Annexe 1 – Exemple de dessin technique tracé sur Fusion 360



Annexe 2 – "Ampacity" of battery metal strips

Width of strip	Thickness of strip	Cross- sectional area of strip	Approximate Wire Gauge Equivalent [AWG]	Ampacity* (A) / Resistance (mΩ/meter) of metal strip when made of:															
				Copper		Aluminium		Zinc		Nickel		Iron		Tin		Carbon Steel [1010]		Stainless Steel [304 / 316]	
5 mm	0.1 mm	0.5 mm ²	20 AWG	9,2	33,6	5,0	56,4	2,5	118	2,1	140	1,5	194	1,4	218	1,0	286	0,22	1380
	0.15 mm	0.75 mm ²	19 AWG	12	22,4	7,4	37,6	3,7	78,7	3,1	93,2	2,3	129	2,0	145	1,5	191	0,32	920
	0.2 mm	1 mm ²	18 AWG	15	16,8	9,6	28,2	4,8	59,0	4,1	69,9	3,0	97,1	2,7	109	2,1	143	0,43	690
	0.25 mm	1.25 mm ²	17 AWG	18	13,4	12	22,6	6,0	47,2	5,1	55,9	3,7	77,7	3,3	87,2	2,6	114	0,54	552
	0.3 mm	1.5 mm ²	16 AWG	21	11,2	14	18,8	7,1	39,3	6,0	46,6	4,4	64,7	4,0	72,7	3,0	95,3	0,65	460
	0.4 mm	2 mm ²	15 AWG	27	8,40	18	14,1	9,3	29,5	7,9	35,0	5,8	48,6	5,2	54,5	4,0	71,5	0,86	345
	0.5 mm	2.5 mm ²	14 AWG	31	6,72	21	11,3	11	23,6	9,7	28,0	7,2	38,8	6,4	43,6	5,0	57,2	1,1	276
6 mm	1 mm	5 mm ²	11 AWG	48	3,36	35	5,64	20	11,8	18	14,0	13	19,4	12	21,8	10	28,6	2,1	138
	0.1 mm	0.6 mm ²	20 AWG	9,7	28,0	6,0	47,0	3,0	98,3	2,5	117	1,8	162	1,6	182	1,2	238	0,26	1150
	0.15 mm	0.9 mm ²	18 AWG	14	18,7	8,8	31,3	4,4	65,6	3,7	77,7	2,7	108	2,4	121	1,8	159	0,39	767
	0.2 mm	1.2 mm ²	17 AWG	18	14,0	11	23,5	5,8	49,2	4,9	58,3	3,6	80,9	3,2	90,8	2,5	119	0,52	575
	0.25 mm	1.5 mm ²	16 AWG	21	11,2	14	18,8	7,1	39,3	6,0	46,6	4,4	64,7	4,0	72,7	3,0	95,3	0,65	460
	0.3 mm	1.8 mm ²	15 AWG	25	9,33	16	15,7	8,4	32,8	7,2	38,8	5,3	53,9	4,7	60,6	3,6	79,4	0,77	383
	0.4 mm	2.4 mm ²	14 AWG	30	7,00	21	11,8	11	24,6	9,4	29,1	6,9	40,5	6,2	45,4	4,8	59,6	1,0	288
7 mm	0.5 mm	3 mm ²	13 AWG	36	5,60	24	9,40	13	19,7	11	23,3	8,5	32,4	7,6	36,3	5,9	47,7	1,3	230
	1 mm	6 mm ²	10 AWG	53	2,80	40	4,70	24	9,83	21	11,7	16	16,2	14	18,2	11	23,8	2,5	115
	0.1 mm	0.7 mm ²	19 AWG	11	24,0	6,9	40,3	3,4	84,3	2,9	99,9	2,1	139	1,9	156	1,4	204	0,30	986
	0.15 mm	1.05 mm ²	17 AWG	16	16,0	10	26,9	5,1	56,2	4,3	66,6	3,1	92,5	2,8	104	2,2	136	0,45	657
	0.2 mm	1.4 mm ²	16 AWG	20	12,0	13	20,1	6,6	42,1	5,7	49,9	4,1	69,4	3,7	77,9	2,8	102	0,60	493
	0.25 mm	1.75 mm ²	15 AWG	24	9,60	16	16,1	8,2	33,7	7,0	39,9	5,1	55,5	4,6	62,3	3,5	81,7	0,75	394
	0.3 mm	2.1 mm ²	14 AWG	28	8,00	18	13,4	9,7	28,1	8,3	33,3	6,1	46,2	5,5	51,9	4,2	68,1	0,90	329
8 mm	0.4 mm	2.8 mm ²	13 AWG	34	6,00	23	10,1	13	21,1	11	25,0	8,0	34,7	7,2	38,9	5,5	51,1	1,2	246
	0.5 mm	3.5 mm ²	12 AWG	39	4,80	27	8,06	15	16,9	13	20,0	9,8	27,7	8,8	31,1	6,8	40,9	1,5	197
	1 mm	7 mm ²	9 AWG	57	2,40	44	4,03	27	8,43	23	10,0	18	13,9	16	15,6	13	20,4	2,9	98,6
	0.1 mm	0.8 mm ²	18 AWG	13	21,0	7,9	35,3	3,9	73,8	3,3	87,4	2,4	121	2,1	136	1,6	179	0,35	863
	0.15 mm	1.2 mm ²	17 AWG	18	14,0	11	23,5	5,8	49,2	4,9	58,3	3,6	80,9	3,2	90,8	2,5	119	0,52	575
	0.2 mm	1.6 mm ²	16 AWG	22	10,5	15	17,6	7,5	36,9	6,4	43,7	4,7	60,7	4,2	68,1	3,2	89,4	0,69	431
	0.25 mm	2 mm ²	15 AWG	27	8,40	18	14,1	9,3	29,5	7,9	35,0	5,8	48,6	5,2	54,5	4,0	71,5	0,86	345
9 mm	0.3 mm	2.4 mm ²	14 AWG	30	7,00	21	11,8	11	24,6	9,4	29,1	6,9	40,5	6,2	45,4	4,8	59,6	1,0	288
	0.4 mm	3.2 mm ²	13 AWG	37	5,25	26	8,81	14	18,4	12	21,8	9,0	30,3	8,1	34,1	6,3	44,7	1,4	216
	0.5 mm	4 mm ²	12 AWG	43	4,20	30	7,05	17	14,8	15	17,5	11	24,3	9,9	27,3	7,8	35,8	1,7	173
	1 mm	8 mm ²	9 AWG	61	2,10	47	3,53	29	7,38	26	8,7	20	12,1	18	13,6	14	17,9	3,4	86,3
	0.1 mm	0.9 mm ²	18 AWG	14	18,7	8,8	31,3	4,4	65,6	3,7	77,7	2,7	108	2,4	121	1,8	159	0,39	767
	0.15 mm	1.35 mm ²	16 AWG	20	12,4	13	20,9	6,4	43,7	5,5	51,8	4,0	71,9	3,6	80,7	2,7	106	0,58	511
	0.2 mm	1.8 mm ²	15 AWG	25	9,33	16	15,7	8,4	32,8	7,2	38,8	5,3	53,9	4,7	60,6	3,6	79,4	0,77	383
10 mm	0.25 mm	2.25 mm ²	14 AWG	29	7,47	19	12,5	10	26,2	8,8	31,1	6,5	43,2	5,8	48,4	4,5	63,6	1,0	307
	0.3 mm	2.7 mm ²	13 AWG	33	6,22	23	10,4	12	21,9	10	25,9	7,7	36,0	6,9	40,4	5,4	53,0	1,2	256
	0.4 mm	3.6 mm ²	12 AWG	40	4,67	28	7,83	16	16,4	13	19,4	10	27,0	9,0	30,3	7,0	39,7	1,5	192
	0.5 mm	4.5 mm ²	11 AWG	46	3,73	33	6,27	19	13,1	16	15,5	12	21,6	11	24,2	8,6	31,8	1,9	153
	1 mm	9 mm ²	8 AWG	64	1,87	50	3,13	32	6,56	28	7,8	22	10,8	20	12,1	16	15,9	3,8	76,7
	0.1 mm	1 mm ²	18 AWG	15	16,8	9,6	28,2	4,8	59,0	4,1	69,9	3,0	97,1	2,7	109	2,1	143	0,43	690
	0.15 mm	1.5 mm ²	16 AWG	21	11,2	14	18,8	7,1	39,3	6,0	46,6	4,4	64,7	4,0	72,7	3,0	95,3	0,65	460
10 mm	0.2 mm	2 mm ²	15 AWG	27	8,40	18	14,1	9,3	29,5	7,9	35,0	5,8	48,6	5,2	54,5	4,0	71,5	0,86	345
	0.25 mm	2.5 mm ²	14 AWG	31	6,72	21	11,3	11	23,6	9,7	28,0	7,2	38,8	6,4	43,6	5,0	57,2	1,1	276
	0.3 mm	3 mm ²	13 AWG	36	5,60	24	9,40	13	19,7	11	23,3	8,5	32,4	7,6	36,3	5,9	47,7	1,3	230
	0.4 mm	4 mm ²	12 AWG	43	4,20	30	7,05	17	14,8	15	17,5	11	24,3	9,9	27,3	7,8	35,8	1,7	173
	0.5 mm	5 mm ²	11 AWG	48	3,36	35	5,64	20	11,8	18	14,0	13	19,4	12	21,8	9,5	28,6	2,1	138
	1 mm	10 mm ²	8 AWG	66	1,68	53	2,82	34	5,90	30	7,0	24	9,7	22	10,9	17	14,3	4,2	69,0

Annexe 3 – Exemple de requête I2C [10]



Le protocole I2C est une relation dite "maître-esclave", tous les éléments partagent le même bus, et ce bus est contrôlé par le maître (la carte arduino dans notre projet). À tout moment, ce dernier peut prendre le contrôle du bus et envoyer une requête, en envoyant premièrement un paquet de données comprenant une adresse, correspondant à l'élément avec lequel il veut communiquer, puis, selon le type de requête, le maître ou l'esclave en question partage des paquets de données sur le bus que l'autre peut récupérer, ensuite, c'est le maître qui peut mettre fin à la communication à tout instant.

Ainsi, ce protocole permet de transmettre des informations avec plusieurs éléments sur le même bus.

Annexe 4 – Retour d'expérience - Bruyère Thomas

Dans ce projet, quand avez-vous pris un risque, fait une erreur ou échoué ?

Au moment des tests est arrivé le problème du moteur brushless et de son driver, celui-ci ayant été commandé par des sites auxiliaires, il n'y avait pas de notice fournie, d'autre part nous n'avions pas accès à une alimentation adéquate, de fait les premiers tests avec une alimentation relativement douteuse à base de piles mises en série se sont montrés non-concluants.

Ainsi, une fois une alimentation fiable trouvée, je suis directement parti dans l'idée qu'il y avait un problème, et ait donc passé énormément de temps à chercher des problèmes sur le moteur là où il n'y en avait pas. En effet il s'avérera plus tard que le non-fonctionnement provenait de l'accumulation de plusieurs erreurs, à savoir l'alimentation, le branchement, et le code. Cependant, à la recherche de l'erreur, j'ai donc essayé plusieurs cas de figure possibles, que ce soit au niveau des branchements comme au niveau du voltage. Ainsi, j'en suis arrivé à changer des branchements sur la carte arduino, le driver étant censé l'alimenter en 5V, ce à quoi la carte a très mal répondu en ne s'allumant plus, nous avons pensé pendant plusieurs jours que le driver était H.S (et notamment le système d'alimentation de l'arduino, appelé EBN). Pire cela aurait pu être la carte, le driver supportant jusqu'à 30A, c'est une possibilité non négligeable. Bien qu'ayant deux drivers (mais une unique carte), nous ne pouvions nous permettre de perdre du matériel, que ce soit en termes de contraintes budgétaires ou temporelles. C'est donc un risque qui a été pris et qui s'est révélé à première vue infructueux.

Cependant, en revenant sur le montage quelques jours plus tard et en réajustant une nouvelle fois les branchements, il se trouve que le driver marchait très bien et le moteur nous a enfin montré signe de vie (signal sonore concluant). Ainsi, cela nous a permis de s'assurer du bon fonctionnement, mais cela m'a également appris à bien procéder de manière organisée lors d'un test, celui-ci ayant été très long, je me suis rendu compte au fil de ce dernier de l'importance d'une procédure précise et de la nécessité d'oser parfois changer plusieurs paramètres pour conclure sur l'élément défaillant.

Annexe 5 – Retour d'expérience - Polette Antonin

Dans ce projet, quand avez-vous pris un risque, fait une erreur ou échoué ?

Après avoir réalisé en binôme la conception de la partie électronique concernant la propulsion et la gestion de la direction du sous-marin, j'ai fait le choix de me pencher sur la conception de la batterie. Nous avons pu observer lors du premier découpage des tâches que les binômes étaient parfois utiles, dans un cas pour permettre une confrontation de positions différentes, et dans un autre cas pour permettre de valider les décisions avec plus de confiance. Cependant, les binômes ont aussi montré des faiblesses dans la répartition des tâches au sein même du binôme, et deux personnes se retrouvaient à réaliser la même tâche sans qu'il n'y ait d'intérêt particulier. Dès lors, la répartition des tâches s'est faite par personne et non plus par binôme.

Réaliser une batterie est une tâche qui requiert un nombre important de compétences, utiles dans la conception et dans l'assemblage. Il est nécessaire d'être extrêmement rigoureux dans la partie conception afin d'éviter tout problème lors de l'assemblage ou même de l'utilisation de la batterie. Pour prévenir tous les risques, j'ai fait de nombreuses recherches sur la conception d'une batterie en partant des choix qui avaient déjà été faits, à savoir le type de cellules et le BMS, composant qui permet de gérer et de protéger la batterie. La première étape est celle qui m'a demandé le plus de temps.

Il s'agissait de déterminer les besoins de notre sous-marin en terme d'alimentation. Ainsi, il m'a fallu chercher les documentations des composants électroniques dont nous disposions déjà et qui étaient présents dans les circuits électriques réalisés au préalable. Ces documentations étant souvent incomplètes, j'ai été contraint de m'en tenir à des estimations et des utilisations dans le pire cas pour éviter un sous-dimensionnement.

Néanmoins, ces estimations n'ont amené par la suite qu'une série de résultats incertains. Ce n'est qu'à quelques semaines de la fin du projet que je suis parvenu à la dernière étape du dimensionnement de la batterie, qui consiste à choisir des bandes conductrices adaptées aux besoins établis précédemment. En vérité, il ne s'agissait plus d'un réel choix mais d'une vérification de la compatibilité entre les bandes à disposition et les besoins. C'est ici que j'ai détecté un point critique. J'ai alors tenté d'avertir mon équipe Pronto d'un potentiel danger, mais l'incertitude de mes résultats ne me permettait pas d'affirmer l'impossibilité de réalisation de la batterie.

J'ai finalement trouvé une solution partielle au problème identifié en me procurant une bande conductrice plus adaptée. La solution était partielle car j'avais par la même occasion identifié un risque lié à la solution. Pourtant, malgré ce risque, le temps pressait et il était nécessaire de réaliser l'assemblage de la batterie si nous voulions faire naître un sous-marin fonctionnel dans le temps imparti. Nous avons donc décidé d'assembler la batterie, et ce que je redoutais arriva : le soudage de plusieurs couches de bandes de nickel s'avérait trop complexe, et nous ne sommes arrivés à souder qu'une seule couche sur les cellules. Négliger les couches supplémentaires revenait à prendre le risque d'avoir une batterie ne pouvant pas répondre aux besoins du circuit, voire pire, d'exposer la batterie à des intensités qu'elle ne pouvait supporter. Néanmoins, étant dans une impasse, sans autre solution, j'ai pris le risque de finir l'assemblage de la batterie et de la tester avec les composants dont nous disposions.

Fort heureusement, la batterie fonctionne très bien et les risques identifiés n'ont pas vu le jour jusqu'à présent. Cette prise de risque me paraissait nécessaire, et elle l'était dans l'objectif d'assemblage complet du sous-marin avant l'échéance finale.

Cependant, en prenant du recul, il n'était pas strictement nécessaire de prendre le risque d'abîmer les composants de la batterie. Il vaut mieux ne pas avoir de batterie fonctionnelle mais n'avoir rien endommagé et avoir identifié les failles et les risques, même si cela signifie aussi ne pas avoir de sous-marin fonctionnel. Sacrifier le résultat final au profit d'une potentielle situation critique est parfois plus sage. J'ai personnellement retenu de cette expérience qu'il est essentiel d'être méthodique dans ses recherches, car avec un peu d'acharnement j'ai pu trouver des documentations plus précises sur certains composants.

Par ailleurs, je retiens que l'objectif final peut parfois aveugler certaines prises de décisions et qu'il faut rester vigilant car bien que le risque pris n'ait pas engendré de conséquences négatives, cette expérience n'en reste pas moins un exemple sur lequel il n'est pas judicieux de se baser.

Annexe 6 – Retour d'expérience - Pauliat Gautier

Dans ce projet, quand avez-vous pris un risque, fait une erreur ou échoué ?

Pour permettre au sous-marin de tourner et de se déplacer plus aisément, il est doté de gouvernails horizontaux et verticaux. Pour faire simple, les gouvernails horizontaux sont des pièces en PLA fixées à une unique tige en métal, qui traverse donc le sous-marin. Cette tige est reliée à une biellette, elle-même pilotée par un servo-moteur. Pour assurer l'étanchéité de l'assemblage, des gorges conçues pour loger des joints toriques sont prévues dans les trous où se glisse ensuite la tige en métal.

En raison des joints et du jeu assez faible, Emilien et moi-même avons dû forcer sur la tige lors de son insertion, en allant jusqu'à lui donner des coups de marteau. À cet instant, nous craignons le pire : casser la pièce 3D en forçant un peu trop... Il nous aurait fallu réimprimer la pièce et remplacer les inserts filetés qui servent à fixer en place les servo-moteurs, soit une perte de temps mais aussi de matériel. Nous avons pris le risque, ne voyant sur le moment pas de moyen de faire autrement. Finalement rien n'a cassé, ouf !

Cependant, en se concentrant tellement sur cette crainte de casser la pièce 3D, nous avons oublié de regarder dans quel sens se mettait la tige. Nous avons une chance sur deux et malheureusement nous l'avons mise dans le mauvais sens... Après réalisation, nous nous en sommes voulu de ne pas avoir réfléchi à cela plus tôt. Mais, ce qui était fait était fait. Il fallait maintenant sortir la tige. Nous l'avons encore une fois martelée, et avons réussi à la sortir sans rien casser.

Afin de ne pas commettre les mêmes erreurs et pour que la tige se glisse plus aisément dans la pièce 3D, nous nous sommes posés un instant pour réfléchir. Nous avons au préalable lubrifié les joints et la tige. Monsieur Abiven a également chanfreiné les extrémités de la tige. Cette seconde fois, nous avons également vérifié plusieurs fois le sens dans lequel nous insérons la tige, en nous référant à la conception 3D. Enfin, l'insertion s'est très bien déroulée.

Ce qu'on peut retenir de cette erreur plutôt insignifiante à l'échelle du projet, et dont les autres membres de l'équipe n'ont pas tous connaissance, c'est que parfois, à vouloir aller vite, on prend plus de temps que prévu en faisant des erreurs. Ici, en nous hâtant, nous avons sauté des étapes de réflexion, ce qui nous a rattrapé et puni. Il faut toujours réfléchir avant d'agir, surtout quand on veut aller vite.

Annexe 7 – Retour d'expérience - Gonot Pierre

Racontez-moi une situation dans ce projet où vous étiez confronté à un problème qui avait plusieurs solutions possibles.

Lors de la conception du module moteur/gouvernail du sous-marin, nous avons été confrontés, avec Saad, à un problème complexe : concevoir l'ogive arrière de façon à intégrer la tringlerie des gouvernails et les servomoteurs, tout en permettant le passage de l'axe du moteur au centre. L'enjeu était à la fois mécanique, spatial et fonctionnel.

Inspirés par les sous-marins réels, nous avons initialement décidé d'intégrer quatre gouvernails (deux horizontaux et deux verticaux croisés). Ce choix semblait logique au départ, car il reproduisait des configurations fréquemment observées dans les projets DIY (Do It Yourself) que nous avons consultés en amont via des vidéos et forums spécialisés.

Nous avons donc réalisé un brainstorming technique à deux, en nous appuyant sur les exemples rencontrés. Une des solutions repérées présentait un système de tringlerie croisée qui paraissait particulièrement efficace. Cependant, après analyse, nous avons constaté que cette solution, bien que théoriquement intéressante, dépassait nos capacités techniques de fabrication : elle demandait une précision d'usinage que nous ne pouvions garantir, et un agencement de pièces que nous ne possédions pas.

Nous avons alors exploré plusieurs alternatives inspirées de cette première idée, mais toutes se sont heurtées à des contraintes techniques fortes :

- difficulté d'installation dans un espace restreint,
- complexité des angles de mouvement des gouvernails,
- et surtout, manque de matériel adapté pour réaliser un mécanisme fiable.

À ce moment-là, nous ne nous sommes pas remis en question sur le choix même d'avoir quatre gouvernails : nous étions enfermés dans cette hypothèse de départ.

C'est finalement Emilien, alors qu'il travaillait sur un autre module, qui a débloqué la situation. Il a proposé une approche simplifiée : utiliser seulement trois gouvernails (deux horizontaux et un vertical) sans croiser leurs axes, ce qui permettait d'éviter la tringlerie complexe et libérait de l'espace pour l'axe moteur.

Cette solution, à laquelle nous n'avions pas pensé, répondait parfaitement à nos contraintes. Elle a été mise en œuvre rapidement, avec succès, et s'est révélée fonctionnelle et fiable lors des tests.

Cette expérience m'a appris plusieurs choses importantes :

- Ne pas s'enfermer dans une idée initiale, même si elle semble "logique" ou inspirée de modèles existants.
- Multiplier les échanges avec les autres membres de l'équipe, même s'ils ne travaillent pas directement sur le même sous-système. Le regard extérieur peut apporter des solutions plus simples et pertinentes.
- Enfin, il est crucial de réévaluer les hypothèses de départ quand les contraintes s'accumulent : parfois, le vrai problème n'est pas dans les solutions, mais dans la définition du besoin.

Annexe 8 – Retour d'expérience - Khazari Saad

Racontez-moi une situation dans ce projet où vous étiez confronté à un problème qui avait plusieurs solutions possibles.

Au début du développement du site internet pour notre projet Pronto, nous avons été confrontés à un choix technique important sur lequel allait reposer toute la suite : quelle technologie et langages utiliser pour construire le site ? Il s'agissait de déterminer la meilleure manière d'allier esthétique, interactivité, maintenabilité et rapidité de développement. Plusieurs options s'offraient à nous, chacune avec ses avantages et ses inconvénients.

La première option était de créer un site entièrement statique en HTML, CSS et JavaScript pur. Cette approche avait l'avantage d'être plus simple étant donné que j'avais déjà codé des sites en HTML/CSS auparavant, qu'il n'y avait pas de dépendances externes et que c'était suffisant pour afficher des textes, des images et même intégrer quelques animations basiques. C'était une solution rapide à mettre en place, mais qui atteignait vite ses limites en termes de modularité et d'interactivité. Or, notre objectif était justement de proposer une expérience dynamique et immersive, ce que cette solution ne permettait pas de manière satisfaisante.

Nous avons également envisagé l'utilisation d'un CMS (Content Management System) comme WordPress, qui aurait facilité la gestion du contenu et l'intégration rapide de galeries, d'articles ou de pages sans trop de code. Cependant, cette solution ne convenait pas à la nature très visuelle et personnalisée de notre site. Le rendu aurait été trop rigide, trop "corporate", très limité, alors que nous voulions quelque chose de plus créatif et interactif qui ne limite pas notre imagination.

C'est alors que nous avons réfléchi à l'utilisation d'un framework JavaScript moderne, comme Vue.js ou React. Ces frameworks permettent de structurer une application web en composants réutilisables, de mieux gérer les états dynamiques de l'interface, et d'ajouter des animations complexes. Après avoir comparé Vue et React, notre choix s'est porté sur React pour plusieurs raisons : sa grande communauté, la richesse de sa documentation, et la compatibilité avec de nombreuses bibliothèques (notamment GSAP pour les animations).

Finalement, ce choix technique a été un tournant important dans le projet. Il a demandé un peu plus de travail au début, notamment pour la découverte et l'apprentissage du langage et de son fonctionnement, ou encore pour la configuration de l'environnement, mais il nous a offert une grande liberté de création et a permis de réaliser un site web qui dépasse nos attentes et dont nous sommes plus que satisfaits.

Annexe 9 – Retour d'expérience - Wolff Emilien

Décrivez une situation où vous avez pris le lead pendant ce projet.

Il faut savoir qu'avant de se pencher sur le projet d'ingénieur PRONTO, nous avons passé 4 mois à développer un capteur d'irradiance solaire à l'occasion de la mission technique de l'ingénieur MINUTO, qui fait partie de la formation à IMT Atlantique. Dans ce projet, je fus relativement leader, ayant l'habitude personnellement de projets mécatroniques en tout genre durant mon temps extrascolaire. J'ai remarqué que le fait d'apporter une expertise et de proposer un système modélisé a clairement motivé le groupe et contribué à une participation accrue de chacun. L'avant/après était clair !

Mon approche du projet PRONTO était cependant très différente. Nous sommes un groupe d'ami qui se côtoie régulièrement en dehors des cours, et je connaissais donc les aptitudes de chacun, ce qui n'était pas forcément le cas du projet MINUTO puisque nous n'avions pas l'occasion de choisir nos groupes. De fait, je ne trouvais pas nécessaire de m'imposer en leader, puisque mon apport ne serait pas directeur.

Cependant, débiter un projet de construction de A à Z d'un sous-marin radiocommandé est impressionnant et déroutant. Savoir par où commencer n'est pas intuitif et l'ampleur des tâches peut faire peur. Le document de cadrage de début de projet à aider à poser clairement les bases mais commencer techniquement le projet ne fut pas du tout aisé. C'est là que j'interviens, en prenant les devants et en proposant au groupe de modéliser le sous-marin entièrement sur *Fusion 360*.

J'ai donc passé une vingtaines d'heures de manière totalement volontaire et autonome à modéliser chacune des pièces. Puisque j'avais l'habitude d'utiliser le logiciel dans des projets annexes, j'ai pu penser la conception. Cette dernière a ensuite fait l'objet de plus amples discussion durant les séances avec l'équipe.

J'ai donc présenté la modélisation au groupe, et les solutions techniques imaginées, en apportant mon expertise technique. Elle fut bien accueillie et a d'ailleurs été vecteur d'un début actif et d'une hausse de motivation qui s'est clairement ressentie, de tous les membres de l'équipe.

En visualisant le rendu final du sous-marin, chacun savait pourquoi il travaillait et où allait se trouver sa partie de travail dans la conception finale. Durant tout le reste du projet, je n'ai pas eu besoin de reprendre le lead, mais je pense avoir servi de soutien pour certains qui avaient des doutes ou des questions soit sur l'implantation mécanique, soit sur des questions d'ordre plus technique.

Ce fut un réel plaisir de travailler avec ce groupe. Pierre, Antonin, Gautier, Thomas et Saad sont des étudiants motivés, qui n'ont pas peur de travailler, et cela m'a clairement ôté un poids, un stress, une responsabilité supplémentaire que j'avais plus ressenti durant le projet MINUTO. Je leur en suis très reconnaissant.

Bibliographie

- [1] Ministère des Armées, « Plongée et retour en surface d'un sous-marin », *Direction des patrimoines, de la mémoire et des archives*, [En ligne]. 2020. [Consulté : 20-mai-2025]. Disponible sur : <https://archives.defense.gouv.fr/content/download/599779/10113895/Plong%C3%A9e%20et%20retour%20en%20surface.pdf>
- [2] DIY Perks, « Building a DIY submarine » , *YouTube*. 3 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=pUba126uzvU>
- [3] Brick Experiment Channel, « Building a Lego-powered Submarine 4.0 - automatic depth control » , *YouTube*. 16 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=KLEH8RJsYgI>
- [4] P& P, « 3D Printed RC Submarine 1/48 EP.1 » , *YouTube*. 21 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=A_ZphXPtQ1s
- [5] P& P, « RC Submarine Ballast Tank 500ml + Dual Diaphragm Pump EP.2 » , *YouTube*. 26 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=mQC4nxo3G8g>
- [6] Instructables, « DIY RC Submarine » , *Instructables*, 13 août 2024 Disponible sur : <https://www.instructables.com/Diy-Rc-Submarine/>
- [7] Bricolage c'est cool, « Dimensionner et assembler sa batterie - Soudage par points » , *YouTube*. 9 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur : https://www.youtube.com/watch?v=9EF0y_HdcDU
- [8] Dejan. Arduino Brushless Motor Control Tutorial | ESC | BLDC. *How to mechatronics*. [En ligne]. 18 février 2022 [consulté le 25 mars 2025]. Disponible sur : <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-brushless-motor-control-tutorial-esc-bldc/>
- [9] Messi & Paoloni SRL - Coaxial Cables, « SMA Crimp Connector Installation (5mm /.200" coax) » , *YouTube*. 24 juillet 2019. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=zeGYWW-cPxx>
- [10] Comprendre l'électronique, « Comprendre le bus I2C (TWI) » , *YouTube*. 20 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=15XY4LoQyjc>

OUR WORLDWIDE PARTNERS UNIVERSITIES - DOUBLE DEGREE AGREEMENTS

3 CAMPUS, 1 SITE



IMT Atlantique Bretagne-Pays de la Loire – <http://www.imt-atlantique.fr/>

Campus de Brest

Technopôle Brest-Iroise
CS 83818
29238 Brest Cedex 3
France
T +33 (0)2 29 00 11 11
F +33 (0)2 29 00 10 00

Campus de Nantes

4, rue Alfred Kastler
CS 20722
44307 Nantes Cedex 3
France
T +33 (0)2 51 85 81 00
F +33 (0)2 99 12 70 08

Campus de Rennes

2, rue de la Châtaigneraie
CS 17607
35576 Cesson Sévigné Cedex
France
T +33 (0)2 99 12 70 00
F +33 (0)2 51 85 81 99

Site de Toulouse

10, avenue Édouard Belin
BP 44004
31028 Toulouse Cedex 04
France
T +33 (0)5 61 33 83 65



IMT Atlantique

Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom