



Développement d'une solution de propulsion sous-marine pour robots HYDROMEA

Antoine Wanctin

1 Résumé

J'ai réalisé un stage ingénieur de 16 semaines dans le cadre de ma formation d'ingénieur en robotique. J'ai été employé en tant que stagiaire en mécatronique par Hydromea, une start-up suisse spécialisée dans la conception et production de robots sous marins. Mes missions principales ont consisté en la conception et l'amélioration de bancs d'essais pour qualifier la performance de moteurs. J'ai également conduit en parallèle, un certain nombre de tests afin de résoudre des problèmes rencontrés par la clientèle de l'entreprise. Cela m'a amené à m'intéresser à des domaines variés allant de l'électronique au moulage de moteurs.

2 Abstract

I completed a 16-week engineering internship as part of my robotics engineering training. I was employed as a mechatronics intern by Hydromea, a Swiss start-up. My main missions were the design and improvement of test benches to qualify the performance of engines. In parallel, I also conducted a number of tests to solve problems encountered by the company's customers. This led me to work in various fields ranging from electronics to engine moulding.

3 Remerciements

Je remercie toute l'équipe d'Hydromea de m'avoir accueillie durant ces quatre mois. Leur entrain, leur gentillesse et leur patience face à mes nombreuses questions ont transformé mon stage en une expérience enrichissante, très humaine et éclairante pour mon avenir professionnel. Je remercie tout particulièrement mon maître de stage Martin VAN ESSCHE pour son soutien inconditionnel, ses conseils pertinents et sa constante bonne humeur.

Table des matières

1	Résumé	1
2	Abstract	1
3	Remerciements	2
4	Présentation de l'entreprise	4
4.1	Historique et activités	4
4.2	Missions initiales	8
5	Projets menés	10
5.1	Production du DiskDrive	10
5.2	Campagnes de mesures	11
5.3	Contrôleurs de moteurs	12
5.3.1	VESC	12
5.3.2	BLHeli32	13
5.4	Tests d'abrasion et d'endurance	14
5.5	Testeur de courant de Foucault	19
5.5.1	Conception 3D	19
5.5.2	Réalisation et contrôle	20
6	Apports du stage	22
6.1	Plan technique	22
6.2	Plan humain	23
7	Conclusion	24
	Glossaire	26
	Bibliographie	27
	Annexes	28

4 Présentation de l'entreprise

4.1 Historique et activités

Hydromea est une start-up installée dans la région lausannoise, au bord du lac Léman. Elle a été créée par Alexander BAHR et Félix SCHILL, deux ingénieurs allemands ayant travaillé sur le même projet de recherche lors de leurs études. Voyant le potentiel de la robotique sous-marine au début des années 2000, ils se sont alors associés dans l'optique de développer une solution d'essaim de robots afin de réaliser des mesures environnementales. C'est alors que VERTEX, le premier robot de l'entreprise, a vu le jour en partenariat avec l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Cependant, pour des raisons principalement commerciales, le développement d'un essaim a été mis en pause pour se concentrer sur un robot d'inspection de structures sous-marines, telles que des canalisations ou des ballasts. C'est toujours le cas aujourd'hui, avec EXRAY, un robot embarquant des technologies innovantes également développées par Hydromea.



FIGURE 1 – Deux EXRAY en attente d'être testés

En effet, en parallèle du robot, la start-up développe et vend deux autres types de produit. Hydromea a réalisé un modem de communication par la lumière, le LUMA, qui permet de faire passer des informations sous l'eau avec un débit important tout en se passant d'un câble. C'est l'origine de la devise actuelle de l'entreprise, "Cut the Cord". La portée de ce système étant d'une cinquantaine de mètres sous l'eau, celle-ci n'est pas suffisante dans toutes les situations. C'est pourquoi le système d'inspection actuellement en place comprend deux robots EXRAY, l'un connecté à la centrale de commande à l'aide d'un câble et communiquant avec l'autre EXRAY via un LUMA. Cela autorise un pilotage à distance du EXRAY détaché à l'aide notamment d'un retour vidéo.



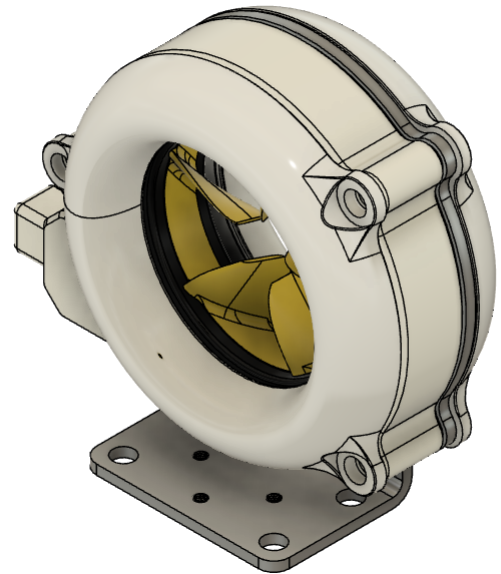
FIGURE 2 – L’assemblage complet du système d’inspection avec un LUMA en marche

Le dernier domaine d’exercice d’Hydromea se situe dans les moteurs. Les co-fondateurs ont développé un moteur brushless sans axe résistant à de très fortes pressions, grâce à un mécanisme le plus simple possible, lubrifié par l’eau amenée par l’hélice. Ils en ont pour l’instant deux types, le DiskDrive 50 et le DiskDrive 80. J’ai passé mon stage au sein de l’équipe DiskDrive, pour participer notamment au développement du DiskDrive 80.

Aussi, le premier moteur développé par Hydromea est le DiskDrive 50, qui est notamment utilisé par la start-up comme un moyen de propulsion et de direction pour les EXRAY. Il peut développer jusqu’à 2 kilogrammes de poussée. Afin de diversifier la gamme et proposer un produit plus puissant et capable de mouvoir de plus gros robots sous-marins, il a été décidé d’augmenter le diamètre du moteur, le passant de 50mm à 80mm. Ce qui me semblait au début être un changement peu significatif, octroie au moteur une poussée allant jusqu’à 8 kg, le quadruple des moteurs de base. Il est capable de fonctionner avec des tensions et courants plus importants, ce qui entraîne nécessairement une puissance finale bien plus élevée.



(a) DiskDrive 50



(b) DiskDrive modélisé avec ses Ducts

FIGURE 3 – Le DiskDrive 50

Les employés d'Hydromea suivent logiquement une répartition qui correspond à celle des produits développés. La priorité actuelle de l'entreprise étant de développer EXRAY, la majorité de l'effectif est dédiée à cette tâche. Ainsi trois employés et une pléthore de stagiaires (entre 5 et 6) réalisent des améliorations sur le robot, que ce soit d'ordre mécanique, informatique ou électronique. Concernant le DiskDrive, mon maître de stage s'occupe principalement de la recherche et développement ainsi que de la relation clients et fournisseurs. J'ai été son seul stagiaire pendant trois mois, avant d'être rejoint par mon successeur, à qui j'ai pu expliquer mon travail. Enfin, la plus petite équipe de l'entreprise est composée d'un unique employé, chargé du développement du LUMA. Il est aidé dans sa tâche par l'un des cofondateurs, qui est également directeur technique. C'est lui qui a imaginé et mis en oeuvre la majorité des infrastructures physiques et logicielles encore utilisées aujourd'hui dans l'entreprise.

Tout ce volet de recherche et développement est complété par un employé chargé de la production des DiskDrive et des LUMA et un employé s'occupant de la bonne organisation de l'atelier, de l'optimisation des procédés de production et de développement. Ce dernier se charge également de la relation avec les fournisseurs, main dans la main avec mon tuteur de stage.

Enfin, toute la partie administrative de l'entreprise est prise en charge par une

employée, le chef de l'entreprise et le deuxième fondateur, Alexander BAHR. Ce sont eux qui se chargent également de la communication d'Hydromea avec l'extérieur, de la recherche d'investisseurs et du management des équipes.

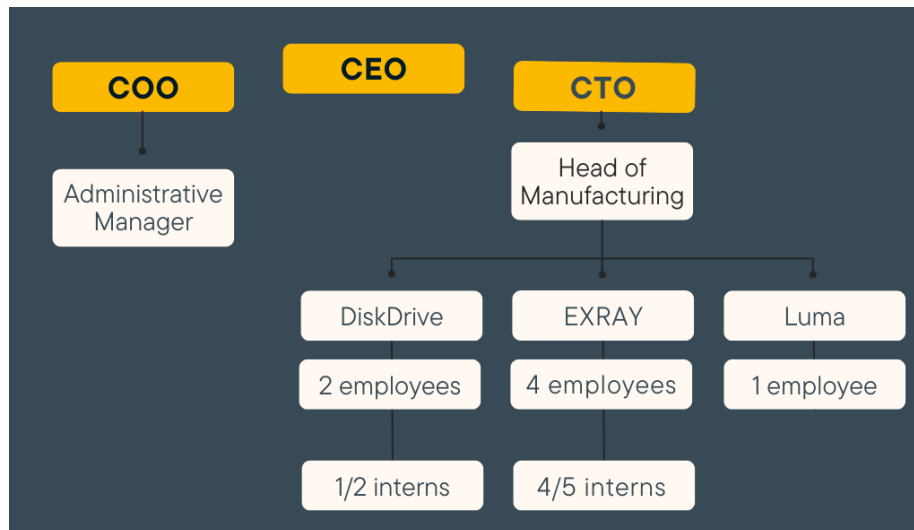


FIGURE 4 – Structure interne d'Hydromea, typique d'une start-up en développement.

C'est un management assez libre. En effet, les horaires de l'entreprise sont très souples et peu contraignantes. Le directeur technique en est l'exemple le plus extrême. Il a en effet l'habitude d'arriver entre 14h30 et 15h30 chaque jour pour repartir vers 4h le matin et cela même le week-end, ce qui n'est pas sans inconvénients en cas de question pressante.

Les avancées et la vie générale de l'entreprise sont accessibles à tous via un système de messagerie instantanée, un planning collaboratif et des réunions bi-mensuelles. Ces dernières, les "General Team Meeting" (GTM) permettaient à tous de se tenir informés des événements de l'entreprise grâce à une présentation de chacun des pôles via un déroulé des objectifs remplis, à compléter ou à envisager. Je n'ai malheureusement pu assister qu'à deux de ces réunions au cours de mes quatre mois de stage, car elles ont été temporairement suspendues.

Tous les sigles et noms de produits sont en anglais face aux nombreuses nationalités présentes au sein d'Hydromea. Au cours de ces quatre mois j'ai ainsi pu travailler au côté de personnes de nationalité suisse bien évidemment mais également française, allemande, grecque, roumaine, russe et belge. L'anglais était donc de mise au cours des réunions mais également dans toutes les dénominations et termes techniques que j'ai été amenés à utiliser au quotidien.

4.2 Missions initiales

Lors de mon stage, mes missions ont été variées et très différentes les unes des autres. Lorsque j'ai postulé pour un stage chez Hydromea, je n'avais pas d'idée précise de ce que je voulais faire dans l'entreprise. Étonnamment, c'est un des projets que j'ai réalisé en classe préparatoire qui a retenu l'attention de l'entreprise. En effet, dans le cadre des travaux d'initiative personnelle encadrés (TIPE), je me suis intéressé à l'influence des Proplets sur les performances d'une hélice de drone. Cela m'a amené à construire un banc de test de poussée, sur lequel je pouvais tester des hélices que je modélisais puis imprimais en 3D.

Ce travail était très similaire à celui qui m'a été proposé lors de mon entretien d'embauche : m'occuper de la conception de bancs de tests pour caractériser les performances du DiskDrive 80 en changeant un certain nombre de paramètres géométriques au niveau de l'hélice, du stator ou encore des aimants. Au regard de la conception innovante du moteur, j'étais emballé par l'idée. En effet, c'est un moteur brushless d'une conception extrêmement simple et ingénieuse. Il est composé d'une bobine circulaire coulée dans la résine et encadrée par deux aimants. Ceux-ci viennent également tenir l'hélice par l'extérieur dans son logement, ce qui permet à celle-ci de ne pas avoir d'axe central.

Cette architecture très simple a plusieurs avantages. Comme évoqué plus haut, le moteur n'a pas de système de lubrification interne, il est lubrifié via l'eau qui se place entre les aimants et la bobine. Ainsi il peut résister à de grandes pressions. De plus, l'architecture sans moyeu central évite à un filin par exemple de s'emmêler dans le rotor. Enfin, il est aisé de changer les aimants et l'hélice du moteur, vu que toute la fixation est faite par des aimants. Cela résulte en un produit agréable à utiliser et au design plutôt unique.

Cependant, il subsiste encore de nombreux problèmes dûs principalement à cette architecture plutôt unique. En effet, mécaniquement parlant, la surface entre les aimants et la bobine est une surface normalement recouverte par un fin film d'eau qui assure la lubrification entre le rotor et le stator. Néanmoins, les dimensions très faibles de ce film font que le moteur s'abîme vite lors de la présence d'impuretés dans l'eau. De plus, la très fine couche de résine protégeant le stator est sujette à des déformations lorsqu'elle est soumise à des changements brutaux de température. J'ai eu l'occasion de travailler sur ces problématiques, je reviendrai un peu plus tard sur ce sujet.



FIGURE 5 – Le banc de test pour le contrôle de performance des DiskDrive

Outre la mise en place de bancs de tests, mon tuteur m'a donné quelques missions au début de mon stage afin d'améliorer les conditions de production du DiskDrive. En effet, Hydromea étant encore une structure assez jeune, la plupart des étapes de production et de contrôle de qualité ont lieu sur place. L'entreprise sous-traite cependant un certain nombre de processus de production, qui doivent être vérifiés après coup avant l'envoi du moteur au client. C'est une tâche plutôt longue et fastidieuse car répétitive. Il était donc dans mes attributions d'améliorer ce processus de contrôle de qualité via notamment la création d'un testeur de courants de Foucault.

Tout au long des quatre mois, la difficulté des tâches qui m'imcombaient a augmenté graduellement. J'ai eu la chance de pouvoir être très autonome dès le début de mon stage, en ayant des tâches à accomplir que je pouvais approfondir autant que je le jugeais nécessaire. Travaillant dans la recherche et développement, cette liberté d'action inhérente à ce secteur m'a beaucoup plu. En effet, j'ai pu proposer mes propres idées et les mettre en pratique mais également découvrir de nouveaux protocoles et m'inspirer de ce qui avait déjà réalisé auparavant pour l'améliorer, l'adapter tout en acquérant de nouvelles compétences. La grande diversité des compétences que j'ai eu l'occasion de mettre en oeuvre m'a également beaucoup plu, tout comme l'apprentissage de nouveaux savoirs-faire dans des domaines que je n'aurai pas pu aborder en dehors du contexte de l'entreprise.

5 Projets menés

5.1 Production du DiskDrive

Au cours de mon stage, j'ai eu l'occasion de travailler sur des projets de durée et d'importance très différentes. Ils ont été amenés à évoluer en fonction des retours clients et des priorités du moment. C'est pourquoi, au début du stage j'ai épaulé mon tuteur pour le relayer dans ses tâches.

Après une visite de l'entreprise, de l'atelier et de la piscine au troisième sous-sol, mon tuteur m'a expliqué l'entièreté du processus de production des DiskDrive 50.

Au vu de la taille de l'entreprise, la production est encore quasiment exclusivement interne, à l'exception de la production de bobines de cuivre, des aimants, des hélices et du moulage en résine qui proviennent de prestataires extérieurs. Cependant, tout ce qui est sous-traité peut encore être réalisé chez Hydromea.

Ainsi, la première étape de traitement par Hydromea consiste en la presse des bobines de cuivres qui doivent répondre à des exigences d'épaisseur et de non-présence de courts-circuits. C'est pourquoi, elles subissent des tests, notamment de courant de Foucault. Ce fut le principal projet de mon stage. Ensuite, un câble est soudé aux bobines et elles sont munies de petites languettes de papier destinées à leur centrage correct lors de l'étape de moulage.

Après leur préparation, les bobines sont envoyées pour être moulées par une entreprise extérieure. Il est toujours possible de mouler des moteurs chez Hydromea comme j'en ai eu l'occasion, cependant pour des raisons de volume l'entreprise fait appel à des sous-traitants.

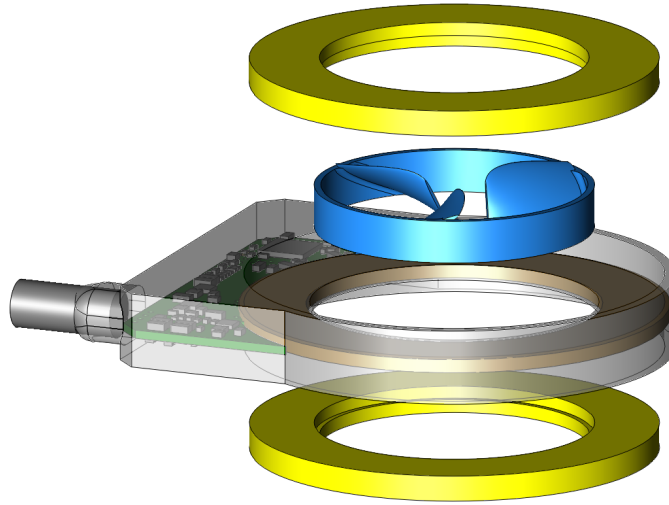


FIGURE 6 – Vue éclatée d'un DiskDrive 50 muni d'un ESC intégré

Au retour du moulage sont adjoint aux bobines les aimants et l'hélice afin de constituer les moteurs finis. Des Ducts peuvent être ajoutés pour améliorer le guidage de l'eau à travers le moteur et ainsi son efficacité.

Lorsque le moteur est complet, de nouveaux tests sont effectués. Chaque unité subit un contrôle de poussée ainsi qu'un test de courant à vide, déterminant si elle peut être vendue ou non. C'est avec les moteurs défectueux que les tests de recherche et développement sont effectués.

J'ai commencé mon stage par une modification de ce dernier banc d'essai.

5.2 Campagnes de mesures

Le banc d'essai de poussée est constitué d'un baril rempli d'eau dans lequel plonge une structure en profilés d'aluminium. Le support moteur est tenu au bâti via un axe d'une part et un capteur de force d'autre part. La poussée générée par le moteur va ainsi faire tourner la structure autour de son axe ce qui va exercer une pression sur le capteur de force, pression correspondant à la force de poussée.

Lorsque je suis arrivé, j'ai amélioré ce banc d'essai. En effet, il ne fonctionne bien que lorsque la poussée est dans un sens. Pour faire tourner un DiskDrive, il faut brancher ses trois phases à un générateur de tension. Il est ainsi facile d'inverser le sens de rotation du moteur et donc la direction de la poussée. Cependant, lors des tests c'est une perte de temps de débrancher le moteur pour le rebrancher. Je devais donc trouver une solution automatisée afin que le DiskDrive testé pousse toujours dans le bon sens. Pour ce faire, j'ai dû changer de contrôleur de moteur, car celui présent initialement, un Hobby King, ne gérait pas une commande bi-

directionnelle.

De plus, je souhaitais contrôler les moteurs en FOC. Par rapport à l'existant, il y aurait normalement un contrôle plus fin de la rotation à faible vitesse et un bruit moins important. Cependant la technologie de FOC nécessite des contrôleurs de moteur particuliers, capables de gérer les commutations sinusoïdales sans capteurs.

C'est pourquoi j'ai utilisé un VESC à cet effet. Ce contrôleur de moteur relativement onéreux est capable de réaliser du sensorless FOC tout en étant bi-directionnel. Il était déjà utilisé pour un test d'endurance situé dans la piscine au sous-sol.

En plus de devoir changer le contrôleur, je devais implémenter une fonction permettant de tracer des courbes de tous les paramètres utiles (Puissance, RPM, Poussée) en fonction du Duty cycle. L'objectif étant de pouvoir comparer et estimer la performance des moteurs.

5.3 Contrôleurs de moteurs

5.3.1 VESC

Chaque contrôleur de moteur est couplé à une carte de commande afin de pouvoir programmer et effectuer tous les tests voulus. Tout au long de mon stage j'ai utilisé une ESP32, pour différentes raisons. Tout d'abord, c'est une carte très polyvalente avec des types de connections très différents en termes d'entrée-sortie. De plus, c'est une carte avec beaucoup de RAM et deux coeurs qui peuvent fonctionner en parallèle ce qui augmente significativement la puissance de calcul et donc la complexité des tâches accomplies.

De surcroît, les cartes à ma disposition étaient équipées d'un module Wi-Fi, très pratique dans certains cas. Cependant, je n'ai pas utilisé de suite ce module, préférant m'appuyer au début sur des concepts que je maîtrisais déjà.

C'est pourquoi, lorsque j'ai implémenté mes programmes sur le banc d'essai de tests de qualité, je devais me connecter en Serial sur l'ESP32 afin de récupérer les données pour les transformer en fichier texte. Ainsi je devais lancer le programme en C++ sur l'ESP32, ouvrir la console affichant la sortie de son port série et lancer un programme python en parallèle qui récupérerait ce qui était affiché sur la console et traçait automatiquement les graphes qui m'intéressaient. Ce n'était pas très optimisé mais ça m'a donné l'occasion de lancer les premières campagnes de mesures dans la piscine du sous-sol.

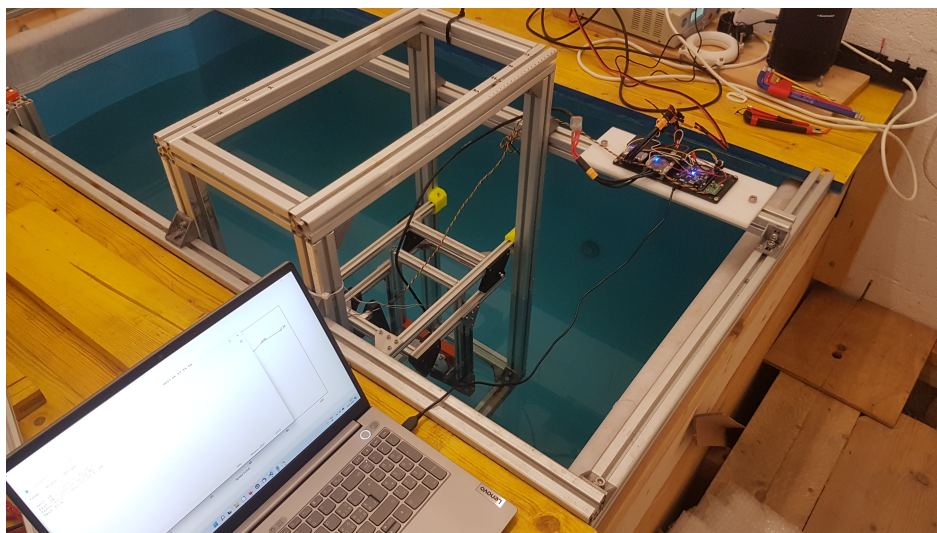


FIGURE 7 – Le banc d’essai de la piscine (avec communication par Serial)

Cette dernière accueille un banc d’essai très similaire à celui du haut, sauf qu’il mesure également les performances du DiskDrive80. J’ai ainsi réalisé de nombreuses mesures en changeant les paramètres géométriques du moteur, afin de déterminer dans quelle configuration il était le plus performant.

Au fur et à mesure de ces tests, j’ai cherché à améliorer et simplifier mon système. C’est alors que je me suis penché sur le module WiFi de l’ESP32. En suivant quelques tutoriels [Sana] et en acquérant les bases du JavaScript, du HTML et du CSS, j’ai réussi à créer une interface qui, via Internet, communiquait avec l’ESP32 et recevait toutes les données dont j’avais besoin. Je pouvais lancer les tests que je souhaitais depuis mon ordinateur et observer les graphiques qui en découlaient grâce à une fonction de traçage en temps réel. Cela rendait les tests beaucoup plus rapides et efficaces.

Cependant, plusieurs problèmes sont survenus, qui m’ont poussé à écarter cette solution. Le VESC consommait significativement plus de courant que d’autres contrôleurs de moteur et avait tendance à faire caler les moteurs à faible vitesse ou lors d’un changement de régime trop brusque.

5.3.2 BLHeli32

J’ai donc cherché à contrôler les moteurs de manière différente. Sur les conseils avisés d’un employé d’Hydromea, je me suis penché sur les ESC de drone et notamment ceux intégrant le protocole DSHOT [Law][Lia].

C’est un protocole digital de communication normalement utilisé par des drones de commerce qui se met en place ici entre le moteur et l’ESP32. L’avantage de ce

contrôleur par rapport au VESC réside dans son utilisation de courant moindre et sa robustesse dans tous les régimes possibles du moteur. Il n'est pas capable d'entraîner l'hélice à un régime aussi bas qu'avec le VESC mais ce n'était pas ce qui était voulu en termes de performances.

Cependant, l'inconvénient principal de ce protocole et du contrôleur de moteur à ma disposition réside dans le fait que la télémétrie et les commandes passaient par un seul fil. J'ai donc pris en compte le fait qu'il y avait deux tâches concurrentes qui s'exécutaient en parallèle.

De plus, le DSHOT passe par un encodage bit par bit de la commande à envoyer [Car], avec une somme de contrôle à décoder à la fin. Les commandes doivent être envoyées à des intervalles définis et rapprochés sous peine que le moteur s'arrête par faute de commande.

La complexité du programme découlant de ces contraintes ne me m'autorisait pas à garder la structure passant par le module WiFi. En effet, les processus trop gourmands et concurrents en terme de mémoire vive rendaient inopérante l'ESP32.

Pour gérer tous les processus en parallèle, je me suis alors intéressé aux systèmes d'exploitation temps réel (RTOS). C'est à l'aide d'une bibliothèque développée pour les micro-contrôleurs que j'ai géré le fait d'avoir des processus en parallèles en leur affectant un ordre de priorité. C'est cette architecture fonctionnelle qui sera utilisée pour tous les essais par la suite. Elle avait l'avantage d'être polyvalente, car le programme principal tourne dans une boucle en parallèle de toute la gestion de la commande moteur et de la télémétrie.

5.4 Tests d'abrasion et d'endurance

Au cours du stage, un des clients d'Hydromea a retourné les moteurs qu'il avait commandé. Ceux-ci présentaient des signes d'abrasion avancés après avoir tournés un long moment dans de l'eau sableuse.

Afin de comprendre le problème pour pouvoir le résoudre, une reconstitution de l'expérience a été mise en place.

Après la construction d'un banc d'essai capable d'accueillir deux moteurs, pour comparer leurs performances avec et sans Ducts dans le même temps, j'ai implémenté une solution technologique capable d'enregistrer en théorie des données s'étalant sur plusieurs jours. Afin de garder la même carte électronique et dans une logique de simplicité, j'ai tenté d'envoyer des données télémétriques via le protocole MQTT. La relative légèreté de ce système de message semblait compatible avec la gestion du DSHOT sur l'ESP32. De plus, une liaison par MQTT avait déjà

été réalisée lors du test d'endurance du DiskDrive50. Les structures nécessaires pour la bonne marche du système étaient donc déjà en place, je n'avais pas besoin de me préoccuper de la mise en place d'un Broker sur une Raspberry par exemple. Cela permettait d'avoir une interface graphique assez facilement après un passage par NodeRed, un logiciel pour la gestion de flux d'informations, servant notamment beaucoup pour l'Internet des objets.

Suite à quelques essais, je me suis rendu compte qu'au vu de la structure de programme utilisée, l'ajout de MQTT interférait avec la télémétrie provenant du contrôleur de moteur. La situation du client étant prioritaire, j'ai alors changé totalement de paradigme en modifiant directement l'électronique de mon banc de test. Tout d'abord, j'ai enregistré les données des capteurs directement sur la mémoire de l'ESP32 en utilisant SPIFFS. Cependant, cette technologie, qui correspond à une micro carte SD sur l'ESP32, ne fournissait pas suffisamment d'espace pour la longueur des tests à effectuer. C'est pourquoi j'ai rajouté un lecteur de carte SD [Sanb] pour pouvoir enregistrer autant de données que voulu. J'ai tout de même gardé une utilité au module WiFi, en donnant des titres automatiques aux fichiers de logs obtenus. L'électronique utilisée n'intégrant pas d'horloge, il était nécessaire à l'ESP32 de se connecter à un Serveur NTP distant afin de récupérer la date et l'heure.

Une fois ces préparatifs terminés et après quelques essais dans l'eau sableuse, il s'est avéré que les tests allaient finalement être beaucoup plus courts que prévu initialement. En présence d'impuretés, les surfaces internes des aimants et la résine couvrant la bobine s'abîmaient très vite.

Plusieurs pistes d'améliorations ont alors été explorées en commençant par une approche géométrique. J'ai testé la résistance des moteurs en leur ajoutant des Ducts ou non, en perçant des trous dans les Ducts ou l'hélice, en changeant la géométrie des Ducts... J'ai également modifié le stator du moteur en lui retirant plus ou moins de matière afin que le sable s'évacue plus facilement.

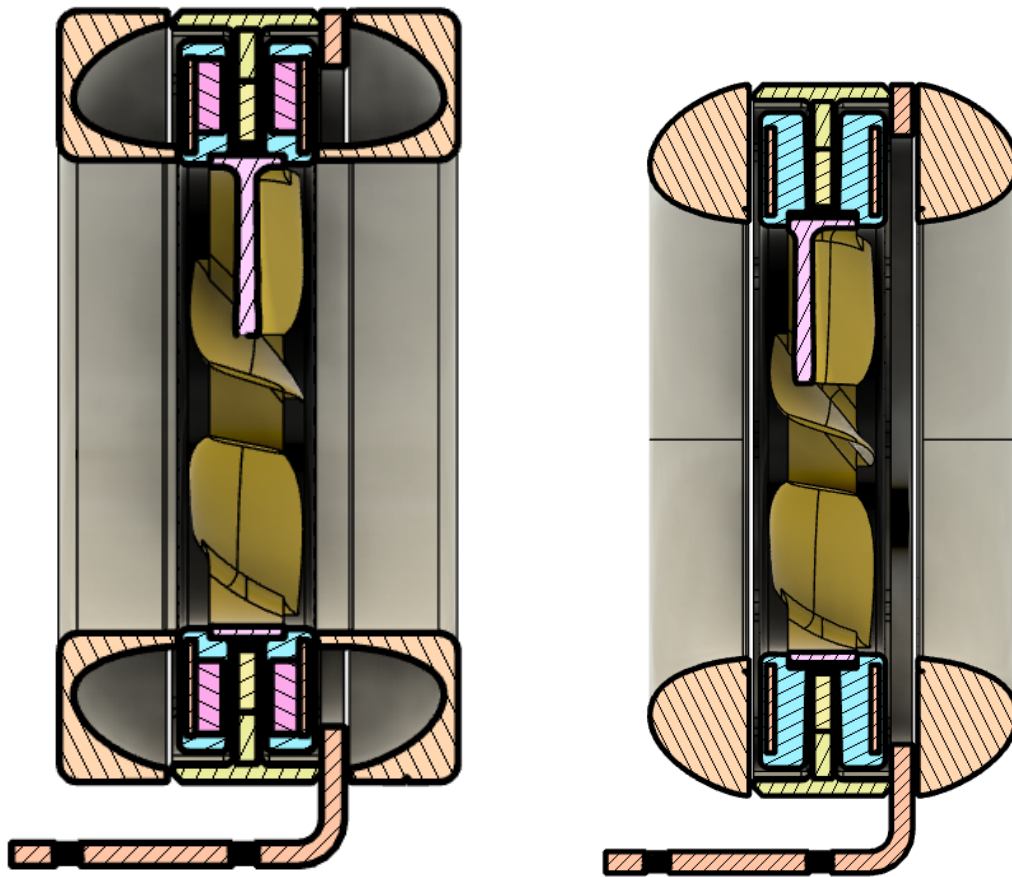


FIGURE 8 – Deux géométries de Ducts différentes

Devant le manque d'efficacité de ces méthodes, nous nous sommes alors intéressés avec mon tuteur à la composition de la résine. En la rendant plus résistante à l'abrasion, il nous semblait possible de résoudre le problème.

Nous avons essayé différents mélanges, en variant les proportions, en changeant la résine utilisée ou encore en lui ajoutant des additifs. Afin d'économiser du temps et de la matière, la résine à tester était moulée sous la forme de petits cubes. Pour pouvoir tester la résistance à l'abrasion de ces cubes, j'ai adapté un équipement de chez Hydromea qui servait auparavant à poncer les marques d'injecteurs sur les aimants du DiskDrive. Il suffisait alors de visser le cube à tester dans la pièce 3D imprimée à cet effet, puis de le laisser reposer sur un aimant en rotation recouvert de papier de verre pour pouvoir comparer les mélanges de résine entre eux.

Après de nombreux essais, nous avons moulé des moteurs complets en utilisant les mélanges les plus prometteurs. Cela a donné des résultats plus ou moins

convaincants, que je n'ai malheureusement pas eu l'occasion de tester sur banc, mon stage se terminant.

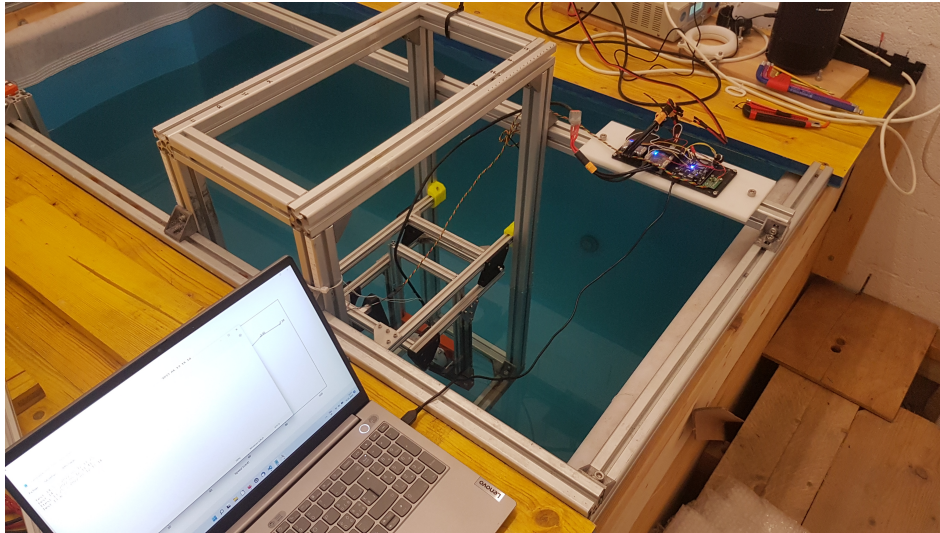


FIGURE 9 – Le banc d'essai d'abrasion. Le cube à tester vient s'insérer dans la pièce noire

En amont et en parallèle de ces tests d'abrasion, j'ai mené d'autres expériences. Lorsque je suis arrivé chez Hydromea, le test d'endurance classique du DiskDrive50 venait d'être arrêté après avoir tourné plus de 7000 heures. Cependant, outre l'endurance pure, il y a d'autres paramètres pour tester la résistance d'un moteur.

Après quelques temps, j'ai mis en place un test visant à éprouver l'endurance dynamique d'un moteur. Durant plusieurs jours, il a subi des accélérations à pleine puissance dans un sens puis dans l'autre. Cela n'a pas mené à une détérioration visible des performances, cependant les chocs répétés sur la structure du banc d'essai l'ont cassé ce qui m'a amené à le réparer, à grand renfort d'impressions 3D.

Dans le même esprit, j'ai cherché à alterner les périodes de chaud et froid sur un moteur. Le but était de reproduire une situation vécue par un client d'Hydromea qui avait des problèmes de gonflement de moteur. Le moteur suivait une alternance de cycles où il tournait à vitesse maximale puis s'arrêtait pour se refroidir. Malgré un test s'étalant sur plusieurs jours, le moteur ne semblait pas s'abîmer au fur et à mesure des cycles. La seule manière de reproduire ce défaut a été trouvée par hasard par le stagiaire qui allait me remplacer. Par erreur, il a envoyé une commande à un DiskDrive50 alors qu'il n'avait pas ses aimants, ce qui a amené la bobine du moteur à se comporter comme une résistance et donc à chauffer très fort, le tout en dehors de l'eau.

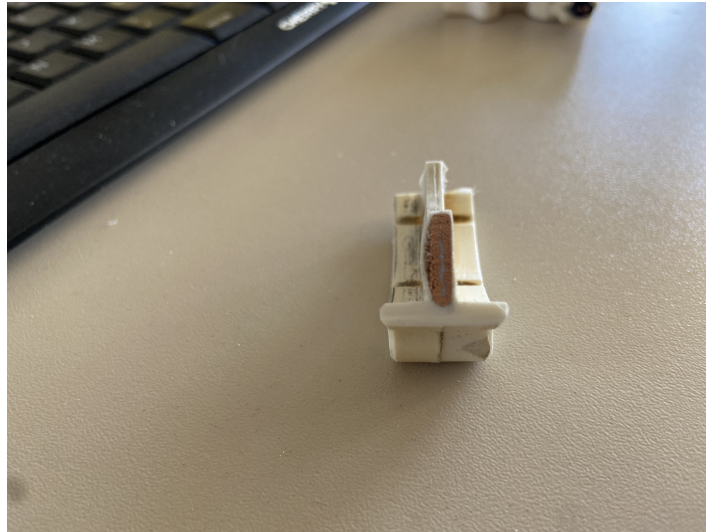


FIGURE 10 – Décollement de la résine et de la bobine dû à la chaleur

En termes de construction de structures, j'ai également conçu un banc d'essai de poussée à la verticale, après l'avoir entièrement modélisé sous Fusion 360. Au final, on obtenait des résultats similaires ou moins bons que le test de poussée à l'horizontale. De plus, le banc utilise un pèse-valise pour mesurer la poussée du moteur, ce qui est peu pratique car il a tendance à s'éteindre et à se tarer de manière intempestive.

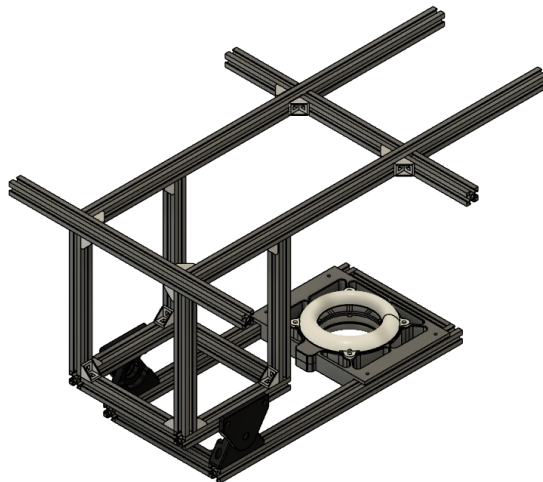


FIGURE 11 – Banc d'essai calculant la poussée verticalement

Enfin, le dernier type d'essai que j'ai été amené à réaliser a été un test de résistance à l'eau salée. Toujours dans l'optique de répondre à une sollicitation d'un

client, j'ai reproduit le test d'endurance dynamique, non pas dans la piscine comme j'avais pu le pratiquer, mais dans un seau de 80 litres d'eau salée. La présence de cristaux de sels dans l'eau, malgré un brassage fort, abîmait les moteurs, comme le sable dans une des expériences précédentes. La nature du problème n'étant pas chimique mais physique. Ainsi, si le problème d'abrasion du sable était résolu, celui du sel le devenait par conséquent aussi.

De nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de moulage étaient en cours d'essai lorsque je suis parti et semblaient prometteuses.

5.5 Testeur de courant de Foucault

En dehors des tests de performance et résolutions de problèmes rencontrés par des clients, le projet qui a servi de fil rouge à mon stage fut la conception puis la réalisation d'un testeur de courant de Foucault.

Il en existait déjà un lors de mon arrivée chez Hydromea. Cependant il était peu précis et très sensible aux perturbations extérieures.

Une bobine était alimentée et entraînait deux aimants l'un sur l'autre montés sur un axe. Une carte électronique récupérait la vitesse de rotation de cet axe via un système de messagerie MAVLink et il était alors possible de détecter de possibles changements de vitesse lorsqu'une bobine à tester était approchée des aimants en rotation. Les potentiels courts-circuits dans la bobine sont en effet responsables de la génération de courants de Foucault qui viennent s'opposer à la rotation, ce qui par conséquent diminue la vitesse de rotation.

5.5.1 Conception 3D

Lors de la conception du testeur de courant de Foucault, mon but était d'avoir un appareil dont les résultats puissent être reproductibles et proches de la réalité géométrique d'un DiskDrive50. Dans ce cadre, j'ai imaginé une structure qui viendrait coulisser des deux côtés de la bobine à tester. Chacune des deux parties de la structure contient un aimant, tenu par une toupie qui vient autoriser la rotation de l'aimant.

Pour respecter la géométrie du moteur, j'ai essayé le plus possible d'inclure dans le testeur, les dimensions caractéristiques de la bobine et des aimants. Afin d'obtenir des performances similaires en test et en conditions réelles, il était important que les aimants soient situés à une certaine distance l'un de l'autre. La bobine devait pouvoir se placer entre les deux sans qu'il y ait de frottement. Ces contraintes étaient assez fortes car l'espace entre un aimant et la bobine est de moins de 0.5mm. De la fibre de verre a finalement été utilisée, car c'était le seul matériau suffisamment fin et résistant qui convenait.

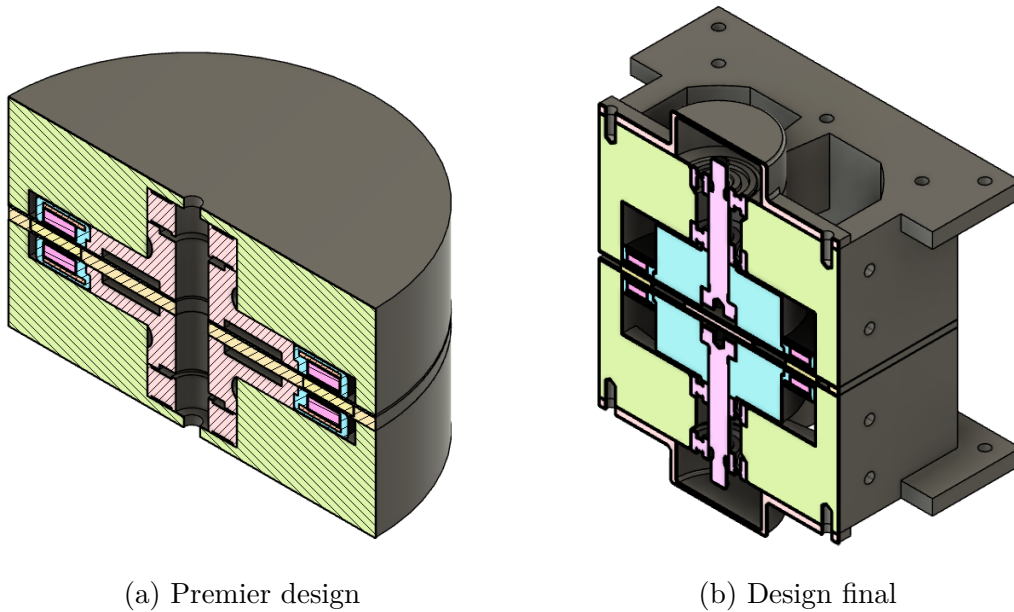


FIGURE 12 – Évolution du testeur de courant de Foucault

La première idée de conception reliait ces deux parties par un système de charnière pour assurer le centrage. La forme globale de la structure était cylindrique, avec un décroché au niveau de la jointure pour assurer le centrage. Cependant, cette solution technique ne semblait pas satisfaisante, de par la difficulté d’avoir un axe de charnière bien positionné, un centrage bien réalisé et surtout répétable.

Après un certain nombre de revues du design, je suis arrivé à une conception différente. Le centrage des deux parties sur le même axe provient de deux facteurs. Tout d’abord, les deux pièces sont montées sur deux glissières, qui accordent une translation de la pièce du haut pour qu’elle puisse se séparer de celle du bas. Ensuite, les deux aimants présents dans chacune des pièces vont s’assurer du centrage de manière plus fine, par l’attraction qu’il exercent l’un sur l’autre.

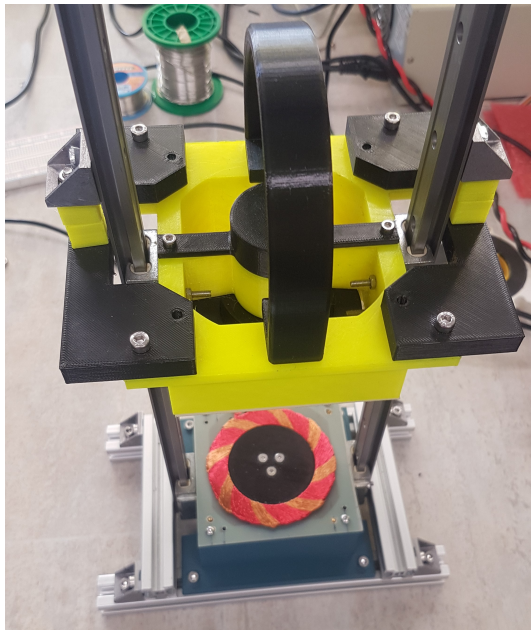
5.5.2 Réalisation et contrôle

Suite à l’étape de conception, j’ai mis en place un certain nombre d’aménagements afin que les pièces deviennent montables. Pour toutes les pièces en impression 3D, il a fallu que je prenne en compte les tolérances de l’imprimante, ce qui m’a amené à imprimer de nombreuses pièces de test. Cela a été utile pour tous les trous de passage de vis, ou pour l’insertion des roulements à bille.

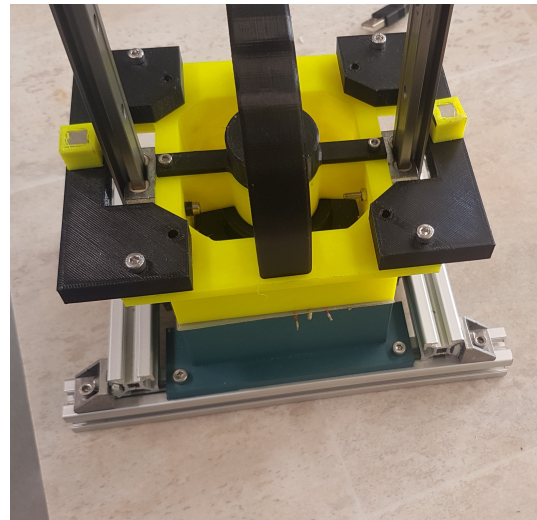
C’est au niveau de l’impression des pièces venant réaliser le centrage de la bobine par l’intérieur que les tolérances ont été un véritable problème. Ainsi, au départ, la bobine devait être maintenue au centre par une pièce en forme d’étoile, venant se déformer pour appliquer une pression uniforme sur l’intégralité de la

face intérieure. Il était possible de déformer cette pièce à l'aide d'un outil imprimé pour l'occasion. Cependant, les nombreux essais réalisés avec des pièces différentes n'ont pas été fructueux. La bobine avait soit tendance à ne pas se placer droite suite à une trop grande tension, soit à ne pas être suffisamment maintenue, ce qui la faisait vibrer.

C'est pourquoi la solution finale adoptée fut plus simple. En imprimant un cercle de diamètre correspondant exactement à celui des bobines, il n'y avait plus aucun souci pour les maintenir centrées.



(a) Testeur ouvert



(b) Bobine prête à être testée

FIGURE 13 – Testeur de courant de Foucault ouvert et fermé

Quand je suis parti, il restait cependant un problème de vibrations que je n'avais pas réussi à régler. Il venait probablement d'un défaut survenu lors du tournage des pièces supportant les aimants. A cause de la forme de ces pièces, relativement fines au niveau des aimants, il n'était pas possible de les réaliser en impression 3D pour des raisons de solidité.

Les vibrations engendrées par le système lors de la rotation des aimants pouvaient également provenir des supports en fibre de verre. En effet, ils étaient potentiellement bombés à cause d'un léger décalage dans le positionnement des vis qui les maintenaient. Le stagiaire qui m'a remplacé au sein de l'équipe DiskDrive a été amené à retravailler ces problématiques afin de les résoudre.

La partie commande du testeur de courant de Foucault repose sur le système MAVLink. C'est un système de messages entre le moteur et la carte de contrôle qui

autorise une grande flexibilité dans les informations envoyées, allouant le contrôle et le suivi d'un grand nombre de paramètres. C'est un protocole utilisé principalement dans le secteur des drones grand public via des logiciels comme Mission Planner ou QGroundControl qui gèrent l'intégration de ce protocole en interne. Couplé à une documentation peu claire, la prise en main de ce système est assez délicate ce qui m'a pris un certain temps [Lóp]. Pour arriver à mes fins, j'ai réglé les problèmes de compatibilité de certaines bibliothèques entre différentes versions de Python et utilisé un simulateur de drone pour tester les programmes sans utiliser l'ordinateur dédié à la production.

J'ai au final réussi à obtenir une interface graphique pouvant commander l'amplitude de la commande donnée à la bobine et affichant la vitesse de rotation des aimants en temps réel. Un système similaire existait déjà dans l'entreprise, mais n'était pas directement accessible depuis la base de données, au contraire de mon implémentation. Cette dernière présentait aussi l'avantage de prendre en compte le temps d'arrêt des aimants après l'envoi de la dernière commande, ce qui peut potentiellement fournir des données plus précises sur les courants de Foucault à l'oeuvre dans la bobine. Cependant, ce temps était faux au moment de mon départ de l'entreprise. Ce n'est qu'un mois après que le problème fut réglé par mon successeur en changeant une partie du programme présent dans la carte électronique commandant le courant arrivant dans la bobine.

6 Apports du stage

6.1 Plan technique

Ce stage m'a énormément apporté dans des domaines techniques très différents. J'ai, durant quatre mois, câblé des montages électroniques, dessiné et imprimé des pièces en 3D, tourné du plastique ou encore coulé du silicone afin de réaliser des moules de moteurs et les utiliser ensuite. La grande diversité de missions qui m'étaient attribuées m'a donné l'occasion d'appréhender une grande partie des domaines techniques que mon tuteur de stage avait l'occasion d'utiliser au quotidien. J'ai ainsi pu lui rendre son travail plus facile en le secondant. J'ai également découvert une facette différente de ma formation. En effet, c'est toute une partie transverse de la robotique sur laquelle j'ai eu l'occasion de travailler. Ces parties beaucoup plus techniques sont nécessaires à la fois pour que le robot développé par Hydromea soit performant, mais également que leurs produits vendus répondent à des exigences de qualité drastiques. Toute la partie de production se devait donc d'être exemplaire et réactive face au moindre problème.

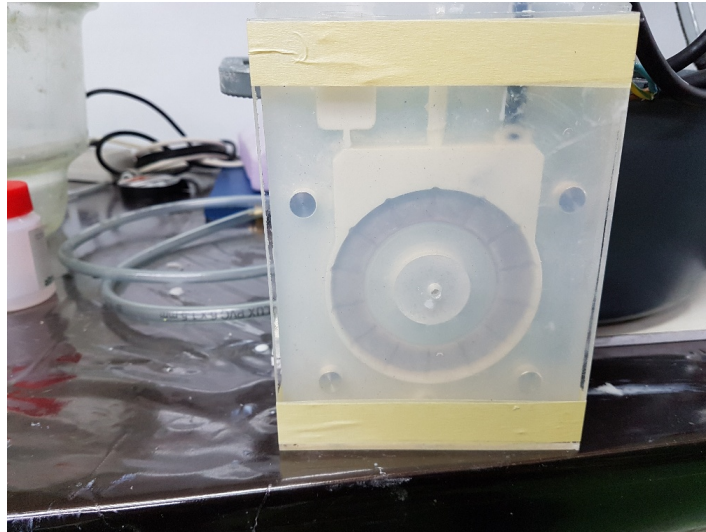


FIGURE 14 – Un DiskDrive 50 en train d’être moulé

Dans ce cadre, la formation de l’ENSTA Bretagne a été déterminante, j’avais à ma disposition tous les outils que j’ai mobilisé dans mon stage. Cela incluait aussi des compétences que je n’avais pas encore acquises comme le maniement du Javascript ou du langage HTML. J’ai cependant ressenti un manque dans tout ce qui était création de cartes électroniques. Cela ne m’a pas permis d’approcher ce domaine qui semble pourtant très intéressant en robotique.

6.2 Plan humain

Mon stage a été très riche en interactions humaines. Que ce soit mon tuteur de stage qui était toujours là pour m’orienter en cas de besoin ou les autres employés de la société prêts à répondre à mes nombreuses questions, j’ai été bien entouré. Lors de ma recherche de stage, je voulais absolument travailler dans une entreprise afin d’avoir une vision plus claire sur l’orientation que je pouvais donner à mon avenir. Ces quatre mois en Suisse m’ont été très profitables et ont affiné ma vision de l’entrepreneuriat, les dynamiques internes de l’entreprise, ce qui engendrait les leviers de motivation au travail ainsi que les secrets pour souder une équipe .

J’ai eu la chance d’assister à un changement de rythme dans l’entreprise. En effet, lors de mon arrivée, les salariés travaillaient à un rythme bien établi, sans perturbations notables. Cependant, la présence début septembre, soit dix jours avant mon départ, d’un test de robot très important pour Hydromea a subtilement changé les comportements de travail. Les réunions bimensuelles portant sur l’organisation générale de l’entreprise et impliquant l’ensemble de la masse salariale ont notamment été supprimées pour un souci de gain de temps. La priorité de l’entreprise s’est progressivement concentrée sur l’équipe s’occupant d’EXRAY, afin que tous leurs systèmes soient fonctionnels au plus vite. J’ai aimé découvrir

plus en détail les soucis inhérents à la robotique sous-marine et les moyens à disposition pour les régler, malgré les horaires de travail décalés de notre responsable technique, dont il était alors difficile de faire part des obstacles majeurs rencontrés au cours de la journée.



FIGURE 15 – Une équipe fort sympathique

J’ai eu la chance d’être autonome et de me voir attribuer des responsabilités. J’ai notamment été partiellement en charge de la formation du stagiaire me remplaçant, une façon unique de transmettre et reformuler les connaissances acquises lors de cette expérience. La taille restreinte de l’équipe fait d’Hydromea une entreprise à taille humaine, avec une ambiance très conviviale, dans laquelle il est agréable de travailler. Le mélange de cultures dans l’entreprise était un atout majeur. J’ai également observé une double dynamique de travail. En effet, j’ai été engagé pour de la recherche et du développement sur le DiskDrive 80, tâches qui ont été petit à petit remplacées par d’autres visant à satisfaire des besoins clients. La logique de développement de nouveaux produits a cédé le pas à une logique de renforcement des produits existants, via de nombreux tests.

7 Conclusion

Ce stage chez Hydromea fut une expérience riche et constructive. J’ai eu en effet l’opportunité de développer en parallèle, à la fois mes compétences techniques, mais aussi interpersonnelles en travaillant dans un environnement dynamique et innovant. J’ai développé des connaissances et un savoir-être qui me seront d’une grande utilité dans mon futur métier. J’ai également pu toucher à une multitude de domaines différents, dont certains inattendus pour l’image que je me faisais

d'un roboticien. En rentrant chez Hydromea, je ne m'attendais pas à apprendre à couler de la résine par exemple. Mon séjour en Suisse m'a conforté dans mon envie future de travailler en entreprise, dont la structure flexible et adaptative me plaît particulièrement. Je n'exclus toutefois pas l'idée d'une thèse, qui serait un complément utile à ma formation. L'adaptation à un contexte international, l'apprentissage constant de nouveaux concepts et la recherche sans cesse renouvelée d'une satisfaction client optimale, sont autant de défis qui ont rendu cette expérience professionnelle déterminante lors de la poursuite de mon parcours académique.

Glossaire

- Broker** programme chargé de la réception des données publiées par des capteurs pour les envoyer aux clients abonnés.. 15
- DSHOT** Protocole de télémétrie pour les ESC de drone utilisant un encodage bit par bit. . 13, 14
- Ducts** Protusions géométriques pouvant être assemblées sur les DiskDrive pour améliorer leur performance en optimisant l'écoulement pour le diriger sur l'hélice.. 6, 11, 14–16
- EXRAY** ROV assurant l'inspection de ballasts et structures sous-marines. Il peut être déployé en mothership et commandé en filaire ou bien déployé en flyout pour être commandé par le mothership via le LUMA.. 4–6, 23
- FOC** Field Oriented Control. Méthode de contrôle d'un moteur venant utiliser des sinusoïdes à la place du duty cycle.. 12
- LUMA** Module d'émission réception de flashes lumineux permettant une transmission d'informations sans fil à haute fréquence.. 4–6
- MAVLink** Protocole de communication par messages, utilisé principalement dans les drones grand public.. 19, 21
- MQTT** Message Queuing Telemetry Transport. Protocole de communication, généralement d'une unité centrale de drone vers ses composants. Il utilise un système de messages assez similaire à celui de ROS.. 14, 15
- NodeRed** Outil de développement par flow qui permet de gérer tous les messages passant par le réseau, notamment en MQTT.. 15
- Proplets** Ajouts géométriques présents sur certaines hélices d'avion venant améliorer leurs performances, comme le font les winglets pour les ailes.. 8
- RTOS** Real Time Operating System. Système de gestion du temps et des processus autorisant une gestion fine des tâches et de leur priorité.. 14
- Serveur NTP** Network Time Protocol. Serveur donnant un temps exact après une requête. . 15
- SPIFFS** Serial Peripheral Interface Flash File System. Système de fichiers basique présent sur un ESP32.. 15
- VERTEX** AUV destiné au swarming, ancêtre d'EXRAY. 4
- VESC** Vedder Speed Electronic Controller. Un ESC évolué possédant un software paramétrable et existant sous plusieurs versions.. 12, 14

Bibliographie

- [Car] CARBON255. *RMT implementation of the DSHOT protocol*. URL : <https://github.com/Carbon225/esp32-dshot>.
- [Law] David LAWSON. *DSHOT in the Dark*. URL : <https://dmrlawson.co.uk/index.php/2017/12/04/dshot-in-the-dark/>.
- [Lia] Oscar LIANG. *The Best BLHeli32Settings*. URL : <https://oscarliang.com/best-blheli-32-settings/>.
- [Lóp] Juan Pedro LÓPEZ. *MAVLink and Arduino : step by step*. URL : <https://discuss.ardupilot.org/t/mavlink-and-arduino-step-by-step/25566>.
- [Sana] Rui SANTOS. *ESP32 Plot Sensor Readings in Charts*. URL : <https://randomnerdtutorials.com/esp32-plot-readings-charts-multiple/>.
- [Sanb] Rui SANTOS. *MAVLink and Arduino : step by step*. URL : <https://randomnerdtutorials.com/esp32-microsd-card-arduino/#writeFile>.

Merci de retourner ce rapport par courrier ou par voie électronique en fin du stage à :
At the end of the internship, please return this report via mail or email to:

ENSTA Bretagne – Bureau des stages - 2 rue François Verny - 29806 BREST cedex 9 – FRANCE
☎ 00.33 (0) 2.98.34.87.70 / stages@ensta-bretagne.fr

I - ORGANISME / HOST ORGANISATION

NOM / Name Hydromee SA

Adresse / Address Avenue de Longemelle, 11
1020 Renens Suisse

Tél / Phone (including country and area code) + 41 76 217 11 30

Nom du superviseur / Name of internship supervisor

VAN ESSCHE Martin
Fonction / Function Mechatronic Development Engineer

Adresse e-mail / E-mail address martin.vanessche@hydromee.com

Nom du stagiaire accueilli / Name of intern

WANCTIN Antoine

II - EVALUATION / ASSESSMENT

Veuillez attribuer une note, en encerclant la lettre appropriée, pour chacune des caractéristiques suivantes. Cette note devra se situer entre A (très bien) et F (très faible)
Please attribute a mark from A (excellent) to F (very weak).

MISSION / TASK

❖ La mission de départ a-t-elle été remplie ? A B C D E F
Was the initial contract carried out to your satisfaction?

❖ Manquait-il au stagiaire des connaissances ? ☐ oui/yes ☒ non/no
Was the intern lacking skills?

Si oui, lesquelles ? / If so, which skills? Antoine apprend très vite même dans des domaines qui ne lui sont pas familiers. Il est très autonome.

ESPRIT D'EQUIPE / TEAM SPIRIT

❖ Le stagiaire s'est-il bien intégré dans l'organisme d'accueil (disponible, sérieux, s'est adapté au travail en groupe) / Did the intern easily integrate the host organisation? (flexible, conscientious, adapted to team work)

A B C D E F

Souhaitez-vous nous faire part d'observations ou suggestions ? / If you wish to comment or make a suggestion, please do so here _____

COMPORTEMENT AU TRAVAIL / BEHAVIOUR TOWARDS WORK

Le comportement du stagiaire était-il conforme à vos attentes (Ponctuel, ordonné, respectueux, soucieux de participer et d'acquérir de nouvelles connaissances) ?

Did the intern live up to expectations? (Punctual, methodical, responsive to management instructions, attentive to quality, concerned with acquiring new skills)?

Ⓐ B C D E F

Souhaitez-vous nous faire part d'observations ou suggestions ? / *If you wish to comment or make a suggestion, please do so here* très heureux de découvrir de nouvelles choses / compétences

INITIATIVE – AUTONOMIE / INITIATIVE – AUTONOMY

Le stagiaire s'est-il rapidement adapté à de nouvelles situations ?

(Proposition de solutions aux problèmes rencontrés, autonomie dans le travail, etc.)

Ⓐ B C D E F

Did the intern adapt well to new situations?

(eg. suggested solutions to problems encountered, demonstrated autonomy in his/her job, etc.)

Ⓐ B C D E F

Souhaitez-vous nous faire part d'observations ou suggestions ? / *If you wish to comment or make a suggestion, please do so here* très autonome

CULTUREL – COMMUNICATION / CULTURAL – COMMUNICATION

Le stagiaire était-il ouvert, d'une manière générale, à la communication ?

Was the intern open to listening and expressing himself/herself?

Ⓐ B C D E F

Souhaitez-vous nous faire part d'observations ou suggestions ? / *If you wish to comment or make a suggestion, please do so here* _____

OPINION GLOBALE / OVERALL ASSESSMENT

❖ La valeur technique du stagiaire était :

Please evaluate the technical skills of the intern:

Ⓐ B C D E F

III - PARTENARIAT FUTUR / FUTURE PARTNERSHIP

❖ Etes-vous prêt à accueillir un autre stagiaire l'an prochain ?

Would you be willing to host another intern next year?

☒ oui/yes

☐ non/no

Fait à Lausanne, le 24/08/2021
In _____, on _____



Signature Entreprise _____
Company stamp _____

Signature stagiaire _____
Intern's signature _____

A. Wartin

Merci pour votre coopération
We thank you very much for your cooperation