

Rapport de Projet – Drone Marin à Hélices Contrarotatives



Sommaire :

Partie 1 : Introduction	3
I/ Sujet :.....	3
II/ Problématique :	4
Partie 2 : matériel et méthodes et gestion de projet	4
I/ Cadre de travail :	4
II/ Phases de la mission :	5
Partie 3 : Résultats	24
I/ Résultats :	24
II/ Retour critique sur le projet :	24
Conclusion :	25
Bibliographie et sitographie :.....	26
Annexes :.....	27

Partie 1 : Introduction

I/ Sujet :

Dans le cadre de notre 3ème année de BUT GMP, l'aspect professionnalisant de notre formation nous amène à découvrir et mettre en œuvre un travail de groupe de type projet. Dans notre parcours Innovation pour l'industrie, nous nous penchons sur des solutions mécaniques innovantes. Nous sommes intéressés par le domaine des transports, et nous avons identifié une technologie peu commune : les propulseurs à hélices contrarotatives. Les hélices contrarotatives sont des hélices coaxiales tournant chacune dans un sens, elles sont mises en rotation par un seul et même moteur. Nous avons décidé en 2ème année de dédier notre projet en Innovation pour l'Industrie à cette technologie. Nous avons réalisé une veille technologique qui nous a permis d'identifier les avantages et les inconvénients des propulseurs à hélices contrarotatives par rapport aux propulseurs couramment utilisés. Les avantages sont la suppression du couple induit (équilibre) par la rotation des hélices (axe de roulis) et augmentation de la poussée pour une motorisation donnée (le flux turbulent de la première hélice bénéficie à la deuxième). Les inconvénients sont une masse plus élevée car il y a plus de pièces, ce qui réduit aussi la fiabilité.

Le but global du projet est de vérifier de manière empirique les avantages de cette technologie, avec la réalisation d'un prototype proposant des solutions pour limiter les inconvénients. En 2ème année, nous avons choisi le domaine maritime pour notre application et nous avons conçu un propulseur à hélices contrarotatives et son banc d'essai. L'ensemble nous a permis de vérifier, avec une petite quantité d'eau (seau), les avantages de la technologie avec un niveau de maturité TRL4 (Validation de composants et/ou de maquettes en laboratoire).

II/ Problématique :

En 3ème année, nous avons décidé de poursuivre le projet afin d'élever le niveau de maturité jusqu'au TRL 7 : "Démonstration d'un prototype du système dans un environnement opérationnel", en réalisant un drone marin à hélices contrarotatives pour répondre à la problématique suivante :

Comment comparer les performances de propulseurs dans un environnement marin ?

Pour cela, nous avons réalisé le rétrofit du propulseur conçu en 2ème année que nous avons intégré à une coque de bateau démontable et étanche en 4 parties. Nous voulons ajouter un système de commande (à distance) pour nous permettre de diriger le drone et un système d'acquisition de données (capteurs : gyroscope, effet hall...). Nous nous sommes inspirés des drones de combat marin utilisés en Ukraine en mer Rouge. Nous avons fait le choix d'un format de type drone (proche du modélisme) qui est cohérent avec les moyens (budget, stockage, outillage) que nous avons à disposition et qui permet d'avoir des résultats exploitables. Un calcul de similitudes pourra nous permettre d'adapter l'échelle du drone et les résultats qui y sont associés.

Partie 2 : matériel et méthodes et gestion de projet

I/ Cadre de travail :

Nous avons à disposition des outils professionnels à l'atelier GMP :

- Imprimantes 3D dépôt de fil fondu
- Imprimantes 3D à bain de résine
- Machine de découpe laser
- Tours conventionnels
- Scie KASTO
- Résine polyester

Nous avons aussi à notre disposition des outils professionnels numériques :

- CATIA V5
- ULTIMAKER
- 3DExperience
- Arduino IDE

II/ Phases de la mission :

Le travail réalisé en 2ème année nous a permis d'avoir déjà une base de connaissance, en effet nous ne repartons pas de zéro. Nous devons tout de même repasser par chacune des phases de projet.

1) Veille :

Nous pouvons nous appuyer sur la veille technologique du projet de deuxième année en termes de propulseurs. En effet, la veille technologique nous a permis de faire un état de l'art pour les systèmes de propulsion de sous-marins, de bateaux mais aussi d'avions. Nous avons pu identifier différents types de propulseurs : certains sont à hélices simples, à hélices multiples ou à hélices contrarotatives.

Nous avons pu observer que les systèmes d'hélices contrarotatives sont assez peu utilisés : seulement dans l'aéronautique mais avec des limitations en termes de performance à haute vitesse. Nous avons pu voir qu'ils sont utilisés dans les torpilles pour supprimer le couple de rotation induit, comme on peut le voir sur la figure 1. En effet, les torpilles sont dépourvues d'éléments stabilisateurs.



Figure 1 : Torpille à hélices contrarotatives – Sous-marin “Le Redoutable”.

Comme nous pouvons le voir sur le schéma explicatif en figure 2, un propulseur à hélice simple est soumis à une rotation induite sur son axe de roulis. Or, dans le cas d'un propulseur à hélices contrarotatives les rotations induites par les deux sens de rotation inverses des hélices se compense : en résulte un équilibre et un couple de rotation sur l'axe de roulis nul.

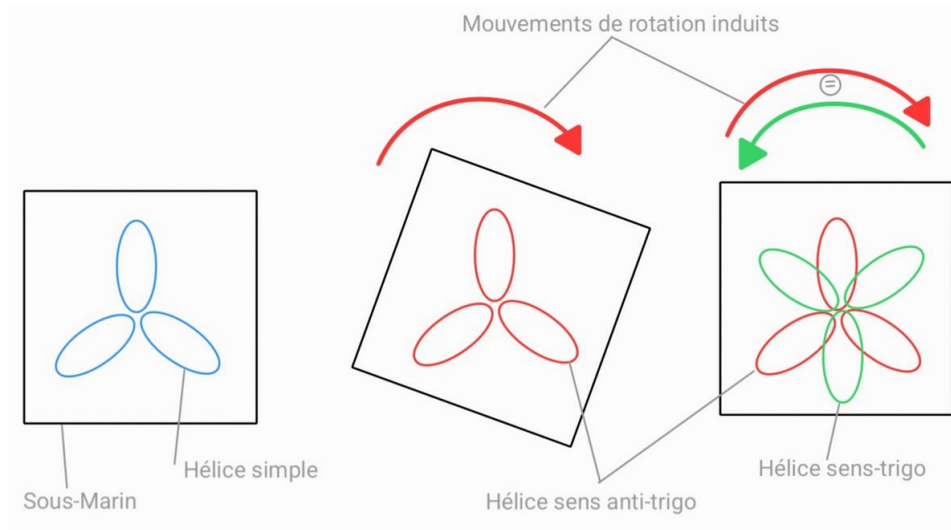


Figure 2 : Schéma comparaison propulseur hélice simple et contrarotatives.

Comme on peut le voir sur la figure 3 ci-dessous issue d'un brevet de système de propulsion à hélices contrarotatives, le flux turbulent induit par l'hélice de droite bénéficie à l'hélice de gauche : en résulte une quantité de récupération (3b). Ainsi un propulseur à hélices contrarotative est plus efficace qu'un propulseur à deux hélices désaxées.

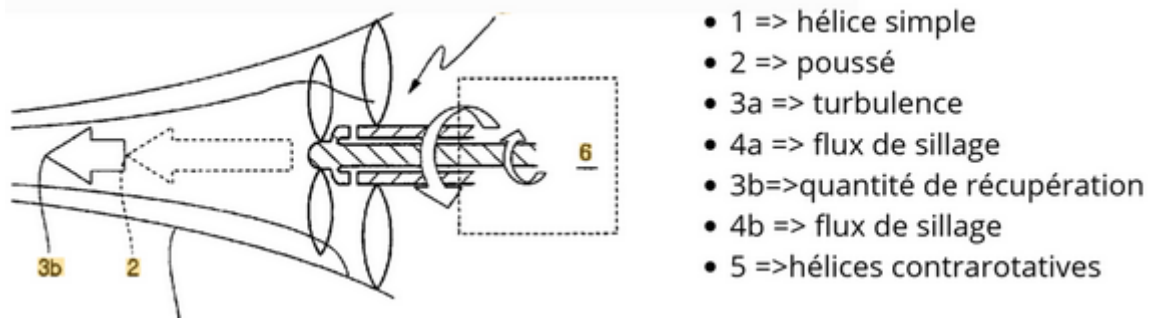


Figure 3 : Brevet helices contrarotatives – Samsung Heavy Industries Co Ltd.

Néanmoins, notre projet étant la création d'un drone marin (pour tester un propulseur en milieu marin), nous avons dû axer notre veille sur de nouveaux paramètres comme l'étanchéité, les calculs de poussée d'Archimède pour la ligne de flottaison ainsi que la partie commande à distance. Nous avons basé nos recherches sur les drones d'exploration (figure 4), de sauvetage en mer et des drones militaires (figure 5). Les systèmes de type drone sont en pleine expansion depuis une dizaine d'années pour leur faible coût et leur efficacité.



Figure 4 : IM1800 Drone de surface autonome



Figure 5 : Drone de guerre ukrainien SEA Baby

Dans cette veille, nous avons pu obtenir des données de dimensions et de puissance de systèmes existants. Nous avons pu aussi nous renseigner sur les systèmes de contrôle et les moyens de production ou matériaux mis en œuvre. Les caractéristiques de ces exemples sont proches de ce que l'on vise pour notre projet.

2) Démarches prévisionnelles :

Dans le cadre de cette démarche, nous avons choisi de mettre en place un diagramme de Gantt prévisionnel (figure 6) afin de planifier et organiser les différentes étapes du projet. De plus, ce dernier nous permet de définir une timeline à suivre.

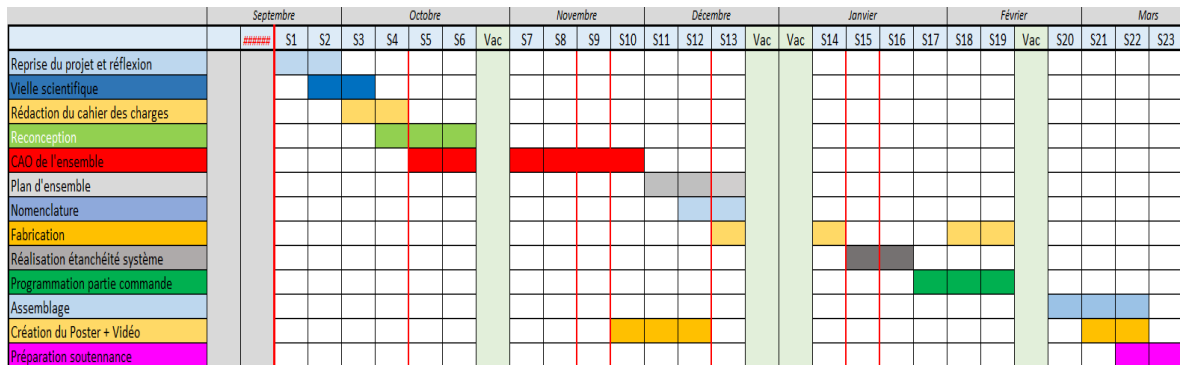


Figure 6 : Diagramme de GANTT prévisionnel.

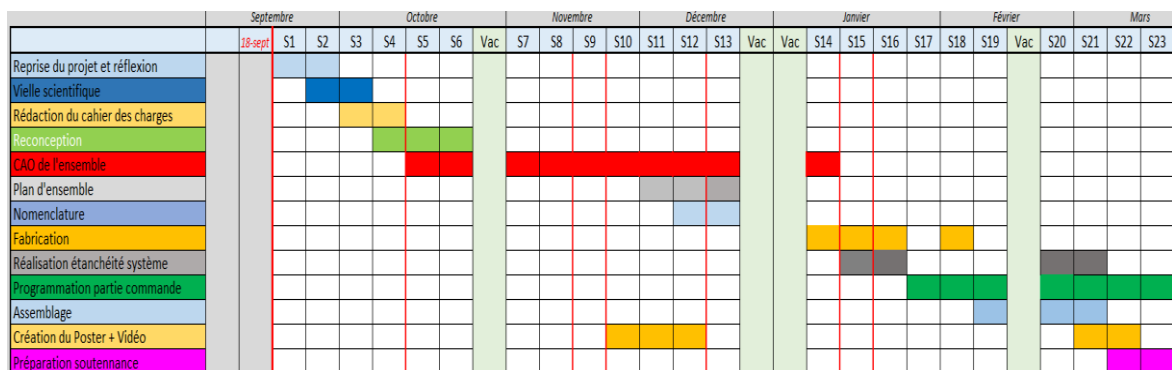


Figure 7 : Diagramme de GANTT réel.

Durant le projet, nous avons constaté que nous n'avons pas pu respecter certaines des prévisions établies dans le diagramme de Gantt prévisionnel. Nous avons alors décidé de faire un Gantt réel (figure 7) afin d'analyser les écarts et cibler leurs causes.

Notre analyse nous permet donc de remarquer que par rapport à ce qui était voulu au début :

- Notre CAO a été évolutive, 4 semaines de plus
- Nous n'avons pas eu besoin de réaliser de gammes de fabrication de pièces car nous les avons finalement faits en impression SLA
- Pour la fabrication, elle a bien duré 4 semaines mais n'a pas été réalisée au moment prévu.
- Pour l'étanchéité du système, une preuve de concept a été réalisée lors de la semaine 15 et 16 et l'étanchéité du système réel a finalement été faite lors de la finalisation de l'assemblage du prototype pendant les semaines 20 et 21.
- En ce qui concerne l'étape « Progamation partie commande », nous remarquons que nous avons sous-estimé le temps à consacrer à cette tâche.

3) Analyse Fonctionnelle :

Pour établir le cahier des charges de notre projet, nous avons réalisé l'analyse fonctionnelle du drone marin en s'appuyant sur notre veille technologique et sur le diagramme des interactions (figure 8). Cela nous permet de donner un cadre et de définir des performances attendues au travers de fonctions principales et de fonctions contraintes.

Fonctions Principales :

- FP1 : Le drone marin doit supprimer le couple de rotation (axe de roulis).
- FP2 : Le drone marin doit pouvoir être dirigé à distance.
- FP3 : Le drone marin doit avoir une vitesse d'avance contrôlable.
- FP4 : Le drone marin doit pouvoir fonctionner avec une ou 2 hélices.
- FP5 : Le drone marin doit avoir un carter facilement démontable.

Fonctions Contraintes :

- FC1 : Le drone marin doit être étanche à l'eau.
- FC2 : Le drone marin doit être réalisé comme un prototype dans un budget réduit.

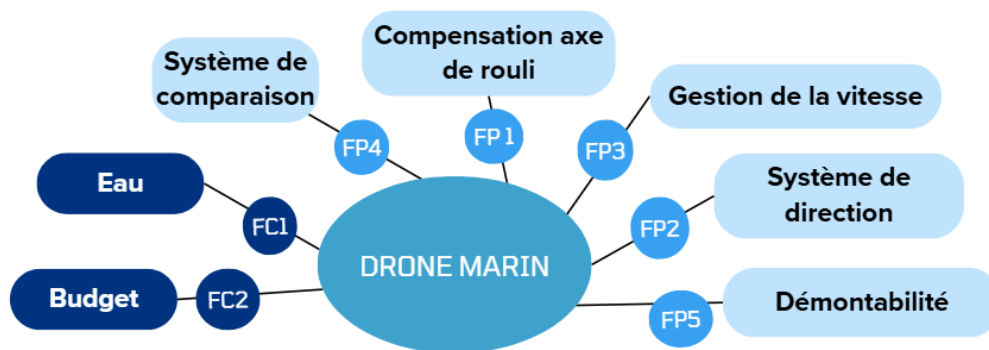


Figure 8 : Diagramme des interactions.

4) Cahier des Charges :

Nous nous sommes appuyés sur notre analyse fonctionnelle et sur notre veille pour établir le Cahier des Charges Fonctionnel du drone marin visible en figure 9. Cela nous a permis de cadrer notre travail et mettre en place des critères, niveaux et degrés de flexibilité. Nous avons par exemple la Fonction "Le drone marin doit supprimer le couple de rotation" tirée de l'analyse fonctionnelle et qui correspond à ce que l'on a pu voir dans la veille. Nous y avons associé le niveau 0N.m et une flexibilité de 0 : c'est notre fonction principale.

Fonction Principales				
Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
Le drone marin doit supprimer le couple de rotation (axe de roulis)	Valeur du couple résiduel	0 N*m	0	Observation caméra
Le drone marin doit pouvoir être dirigé à distance.	Contrôle par liaison sans fil	10 m de distance	1	Observation empirique
Le drone marin doit avoir une vitesse d'avance contrôlable.	Commande à distance	De 0 à 5 noeuds	1	Observation empirique
Le drone marin doit pouvoir fonctionner avec 1 ou 2 hélices.	Type d'interface "Vis de pression"	Oui	0	Observation empirique
Le drone marin doit avoir un carter facilement démontable.	Démontabilité	Oui	1	Observation empirique
Fonctions Contraintes				
Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
Le drone marin doit assurer l'étanchéité des composants internes.	Joints et bague d'étanchéité	100% étanche	1	Observation empirique
Le drone marin doit être piloté à distance.	Télécommande ou application	Par Bluetooth	0	Test
Le drone marin doit avoir une bonne autonomie.	Batterie	30 minutes d'autonomie	1	Test
Le drone marin doit résister à la pression de l'eau.	Bouchons et joint spécifique	2 Bar	0	Test
Le drone marin doit résister à la température de l'eau.	Matériaux (dilatations)	5°C	0	Choix des matériaux et test
Le drone marin doit respecter un prix prototype réduit.	Budget	Inf : 200 €	1	Excel des achats
Le drone marin doit fonctionner dans un milieu corrosif (Mer Méditerranée).	Fonctionnement	90% de rendement	2	Calcul à partir des tests
Fonctions d'estime				
Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
Le drone marin doit avoir une coque profilée.	Coque extérieure	Impression 3D	3	Visuel
Le drone marin doit accueillir une caméra.	Attache compatible	Oui	2	Test

Figure 9 : Cahier des Charges Fonctionnel

5) Schéma cinématique :

Nous avons débuté la conception par la réalisation d'un schéma cinématique. Ce schéma cinématique nous a permis de réfléchir à la faisabilité du concept et de réfléchir aux liaisons à mettre en place. Nous pouvons observer le schéma cinématique en figure 10 avec le carter (bâti : 0) représenté en noir. Le stator du moteur est relié au bâti par une liaison encastrement. Le rotor : 1 (en vert) est en liaison pivot par rapport au bâti, il transmet le couple moteur au reste du système. La roue conique de l'arbre vert (1) engrenée avec la roue conique de l'arbre principal (2) qui tourne dans le sens horaire et donc entraîne en rotation la première hélice, l'arbre principal est en liaison rotule et linéaire annulaire ce qui correspond à un montage de roulement en arbre long. La roue (1) engrène aussi avec l'arbre creux (3) qui tourne donc dans le sens anti-horaire, l'arbre (3) est en liaison rotule avec le bâti. L'arbre (2) et l'arbre (3) sont reliés entre eux par une liaison rotule et une liaison linéaire annulaire, chacun tournant dans un sens différent.

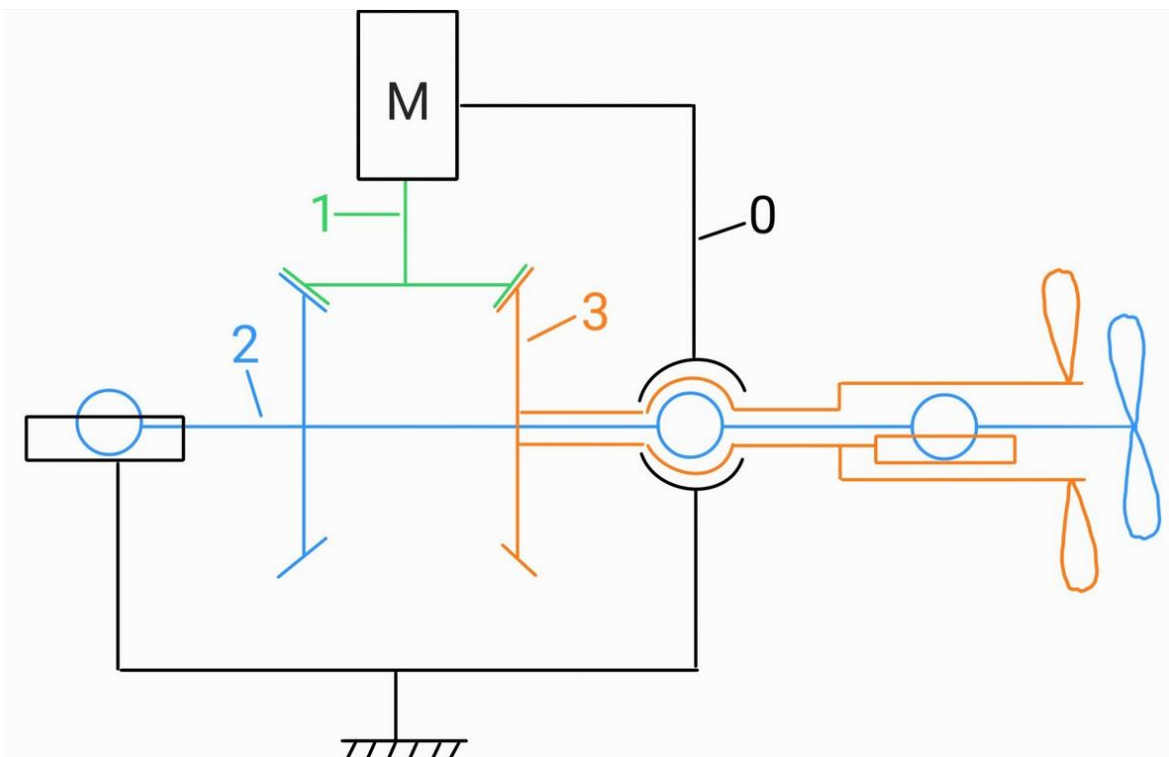


Figure 10 : Schéma cinématique.

6) Schéma de principe :

Nous avons réalisé un schéma de principe du drone qui s'appuie sur les solutions du schéma cinématique. Cela nous a permis de répertorier toutes les solutions technologiques sur lesquelles nous avons travaillé. On peut voir sur le schéma de principe en figure 11 que nous avons réfléchi au rétrofit du propulseur conçu l'année dernière. Nous pouvons voir, par exemple la solution de centrage du chapeau moteur dans le carter réalisé par un appui plan centrage court. Et la solution de maintien en position du chapeau de type bridage par vis CHC.

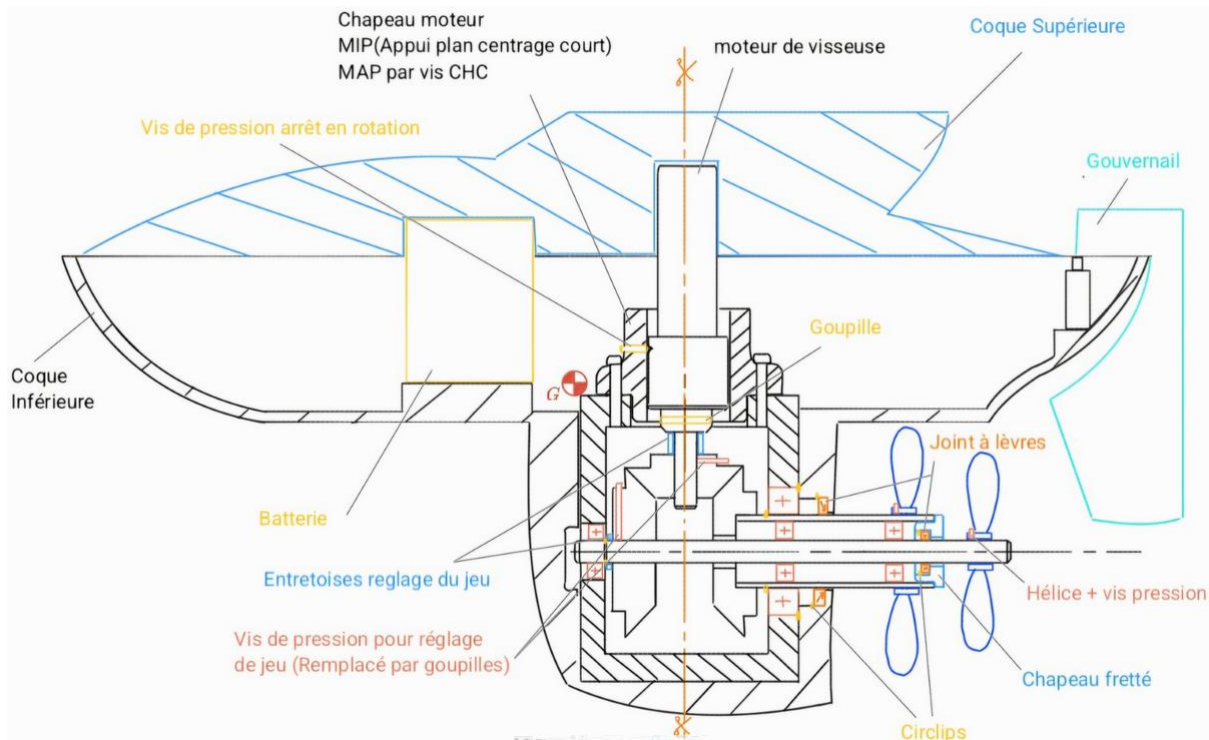


Figure 11 : Schéma de principe.

Remarque : Pour avoir un bon montage des pièces dans le carter en respectant les jeux, on décide de faire un premier montage des roues avec des vis de pression. On prend la mesure des deux entretoises à réaliser puis on les usine. On les met en place et on remplace les vis de pression par des goupilles (on pointe au pointeau sur l'ensemble monté et on démonte pour percer, puis on remonte tout avec entretoises et goupilles).

Le carter, une fois assemblé, va être inséré dans le drone avec un système de centrage dans la coque inférieure (MIP) et de maintien par la coque supérieure (MAP). Nous avons décidé de réaliser le drone en deux coques (comme on peut le voir sur la figure 12 ci-dessous) : la coque inférieure et la coque supérieure, et chacune de ces coques est réalisée en deux parties.

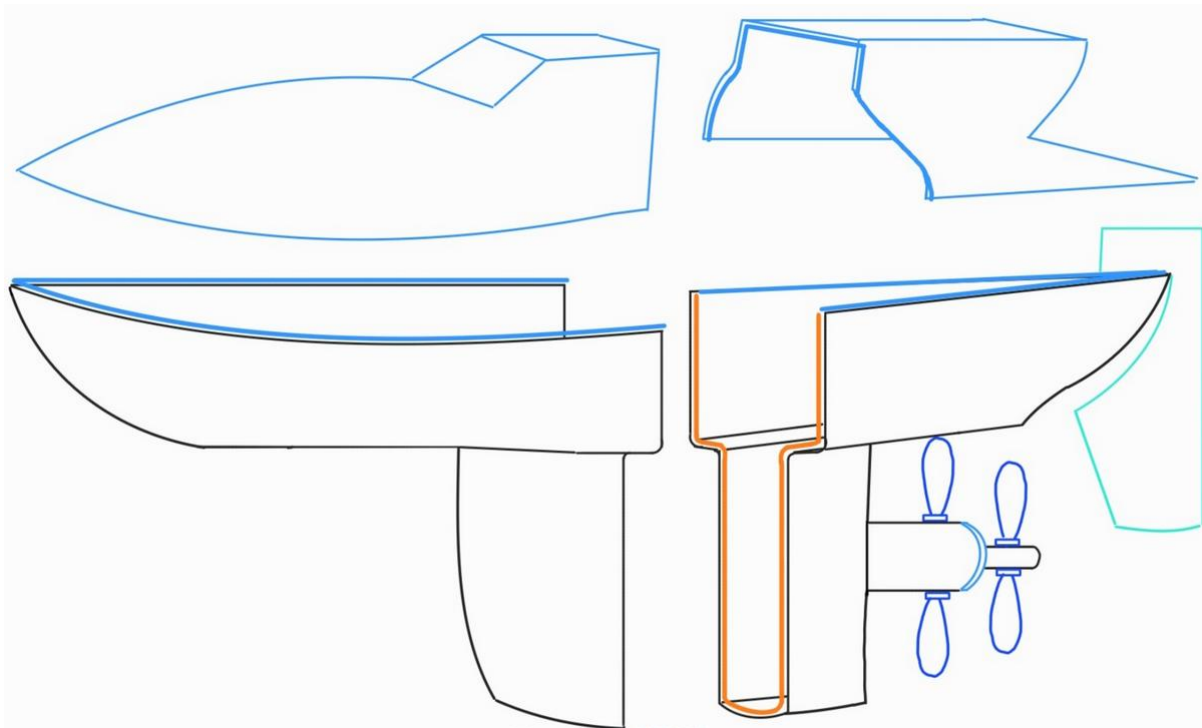


Figure 12 : Schéma de principe coques.

Le procédé et le matériau choisi pour la fabrication des coques sont l'impression 3D dépôt de fil en PLA. L'eau étant nocive pour le PLA, de plus l'étanchéité entre les couches de dépôt de fil n'étant pas parfaite, nous avons décidé de recouvrir l'ensemble des éléments d'un revêtement : de la résine polyester. Nous avons aussi réfléchi à réaliser la coque en composite mais cela aurait nécessité de réaliser un moule en impression 3D et nous aurions rencontré des difficultés à centrer les composants internes du drone. Pour relier les deux coques, nous avons choisi une MIP appui plan/centrage court avec une lèvre sur tout le profil de la coque et un MAP par vis à tête bombée et inserts. Au niveau de la jonction, nous allons réaliser 2 rainures dans lesquelles sont maintenus 2 joints toriques (étanchéité statique).

7) Dimensionnement :

- **Poussée d'Archimède :**

Pour déterminer les dimensions minimales de la coque et pour positionner la ligne de flottaison, nous avons réalisé des calculs de poussée d'Archimède visibles ci-dessous en figure 13. En effet, nous connaissons certaines dimensions issues des éléments du rétrofit et nous connaissons la masse approximative de chacun des éléments, nous pouvons donc déterminer par un système d'équation les dimensions inconnues et vérifier ces résultats en réalisant des expériences.

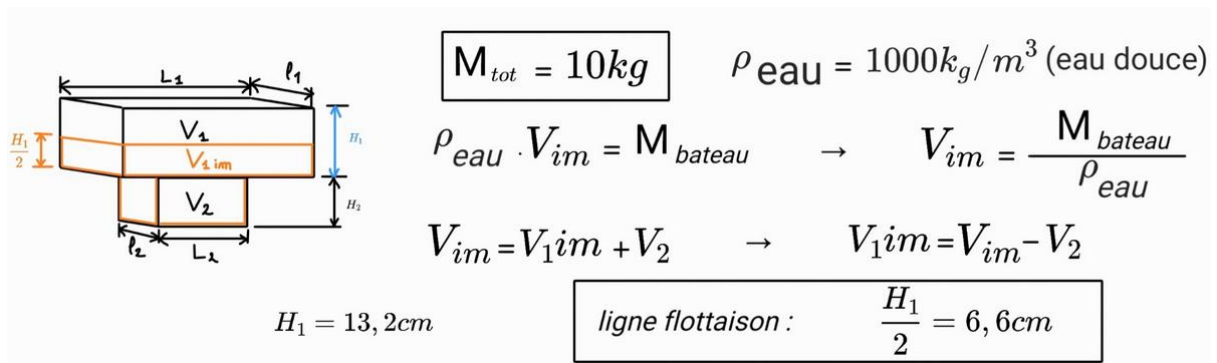


Figure 13 : Calcul préliminaire poussée d'Archimède.

Nous avons pu affiner les calculs de poussée d'Archimède à l'aide des valeurs issues de la CAO. La première itération nous a permis de déterminer les valeurs manquantes et un deuxième calcul visible en figure 14 nous a permis de valider le modèle et de positionner définitivement la ligne de flottaison.

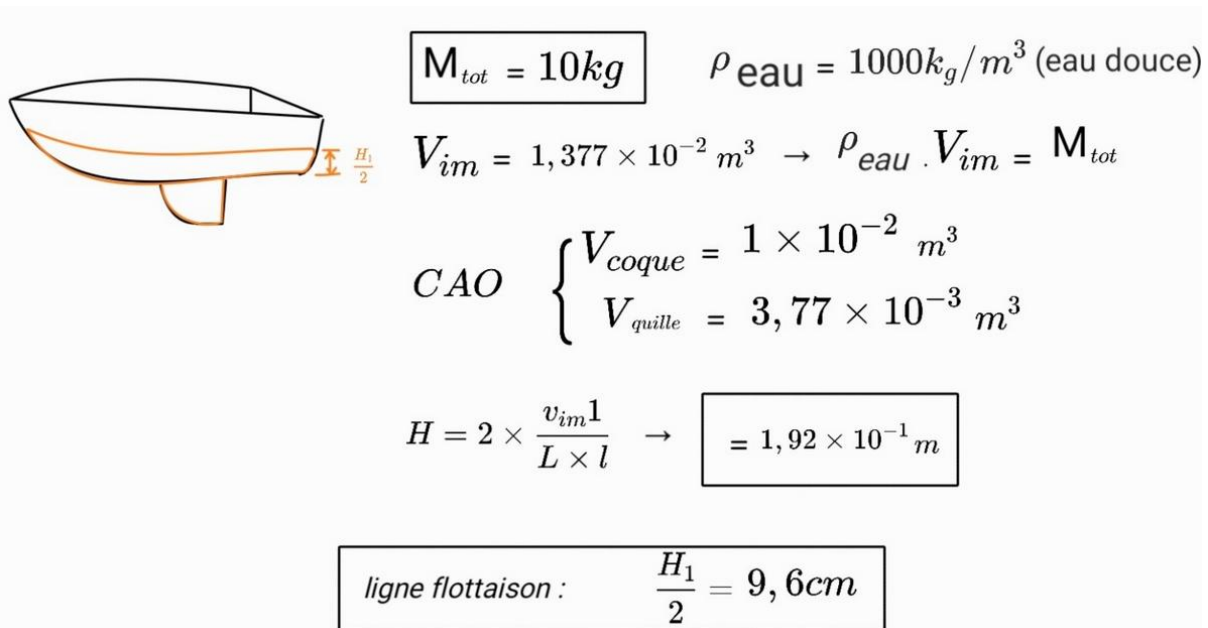


Figure 14 : Calcul final poussée d'Archimède.

Nous avons réalisé des tests sur une coque miniature en impression 3D PLA pour confirmer la cohérence du modèle. En effet, nous avons déterminé ses dimensions par le calcul précédent avec une réduction d'échelle. Nous avons choisi de positionner la ligne de flottaison à mi-coque en pleine charge. Lors du test sur la coque miniature, nous observons bien que la ligne de flottaison se situe à la moitié de la coque. Cette expérience nous a aussi permis de valider la topologie de la coque, en effet le fond plat et la quille permettent d'avoir une bonne stabilité et nous permettra de bien observer le roulis.

- **Étanchéité entre les coques :**

Nous avons cherché une solution de liaison qui soit étanche à l'eau, démontable, peu coûteuse afin de lier deux surfaces en PLA. Nous avons donc opté pour un joint torique souple entre les coques, positionné grâce à une rainure. Sur lequel s'exerce une force correspondant à 20% d'écrasement du joint. Malheureusement, après notre premier POC (proof of concept), nous avons remarqué que l'étanchéité avec 20% de pression, donc 2mm de hauteur de rainure, n'était pas suffisante. Nous avons donc augmenté cette valeur à 50%, donc 1,25mm de hauteur de rainure, qui, après un test, était beaucoup plus concluante, et ne laissait aucune goutte s'infiltrer après plus de 1H30 sur l'eau.

Ensuite, pour maintenir les deux coques, nous avons choisi de les fixer entre elles grâce à un système de vis insert. Le seul problème était de savoir le nombre d'inserts à installer. Le maintien d'une étanchéité correcte demande d'assurer une pression uniforme sur toute la rainure. Pour cela, nous avons cherché à ce que les cônes de progression des champs de pression se chevauchent tout en minimisant le nombre d'inserts. *Voir annexe n°1 Image des inserts utilisés.*

Le second POC, que nous avons réalisé avec une pièce à géométrie simplifiée et reprenant ces solutions a été concluant, on peut le voir en figure 15. En effet, l'étanchéité a été prouvée tout en gardant une montabilité simplifiée.



Figure 15 : Test de la POC de l'étanchéité statique.

- **Etanchéité au niveau des arbres :**

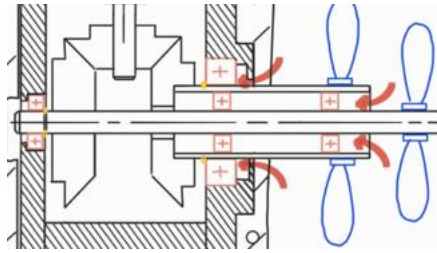


Figure 16 : Schéma visualisation de fuites dynamiques.

Les deux principaux endroits où l'eau pourrait s'infiltrer se situent au niveau de l'arbre creux et de l'arbre intérieur. Pour ce problème, plusieurs solutions s'offraient à nous :

- Solution 1 : Ne pas mettre d'étanchéité à cet endroit et laisser la partie des engrenages dans l'eau. Cette solution réduirait fortement la durée de vie du système.
- Solution 2 : Mettre en place des joints toriques, qui risqueraient de s'arracher ou de s'échauffer à cause de la rotation des arbres.
- Solution 3 : Installer un joint à lèvres au niveau de l'arbre creux et la coque, et deux joints spi en sens opposé l'un à l'autre au niveau de l'arbre intérieur pour pallier le sens de rotation inverse des deux arbres.
- Solution 4 : Mettre un joint à lèvres au niveau de l'arbre creux et de la coque, et utiliser au niveau de l'arbre intérieur un chapeau fixé sur l'arbre creux afin de permettre l'utilisation d'un joint à lèvres.

Nous avons donc pour chaque solution regardé quels étaient leur avantage et leurs inconvénients et avons finalement choisi de retenir la solution 4 avec le chapeau et le joint à lèvres au niveau de l'arbre creux pour les avantages suivants :

- Solution 1 : Cette solution permet de retenir qu'un seul sens de rotation sur l'arbre intérieur, nous avons donc qu'un point de contact qui s'effectue avec un seul joint, ce qui permet une étanchéité plus fiable.
- Solution 2 : Elle nous permet d'utiliser un joint à lèvres standard.
- Solution 3 : L'utilisation d'un chapeau nous permet de pouvoir le retirer afin de pouvoir changer le joint.
- Solution 4 : Cette solution est envisageable dans notre encombrement de 9mm.

Une fois la solution choisie, nous nous sommes penchés sur quels matériaux utiliser pour notre joint et avons finalement choisi un joint EPDM.

Pour cela, nous avons d'abord listé les contraintes auxquelles il sera exposé :

- Eau salée
- Immersion dans l'eau permanente
- Vitesse de rotation modérée

- Possible variation de température
- Vibrations

Après quelques recherches, nous avons trouvé différents types de joint (EPDM, NBR, FKM) et réalisé un tableau comparatif figure 17. Ce tableau comparatif a été établi à l'aide du GSTI (voir annexe n°2) et des sites spécialisés.

Contrainte	EPDM	NBR	FKM
Eau Salée	Excellent	Mauvais	Moyen
Dégradation dans l'eau au cours du temps	Excellent	Mauvais	Bon
Absorption de l'eau	<2%	10-20%	1-3%
Vieillessement dû à l'humidité	Très faible	Fort	Moyen

Figure 17 : Tableau Comparatif Joints

À la suite de ce comparatif, on a donc décidé de prendre un joint type EPDM.

8) CAO :

- **Récupération de la CAO existant de la 2A :**

Le projet s'inscrit dans la continuité de la deuxième année. Nous avons récupéré beaucoup d'éléments et de concepts créés durant celle-ci. C'est pourquoi la première étape a été de récupérer la CAO déjà existante afin d'optimiser le temps de la conception. Pour cela, nous avons retiré les éléments qui n'allaient plus être utilisés dans la nouvelle version. Nous avons aussi rajouté les ensembles cinématiques manquants que nous avons identifiés lors de la création des schémas cinématiques et de principe.

Beaucoup de pièces ont dû être supprimées ou modifiées pour donner suite au déplacement du moteur d'une position horizontale à vertical. *Voir annexe n°3 Arbre de conception.*

- **Optimisation des pièces pour répondre aux nouveaux besoins :**

La sélection des pièces réalisées, nous sommes passés à l'optimisation des pièces restantes afin de les rendre plus légères et plus compactes pour pouvoir les intégrer dans la future coque sans avoir à surdimensionner inutilement celle-ci. Le travail était d'identifier les dimensions des pièces qui avaient été réalisées volontairement épaisses pour un souci de rigidité du banc d'essais réalisé en 2A.

- **Création des coques :**

Les premières pièces créées ont été celles de la coque avec pour objectif une portance optimisée, une ligne de flottaison maîtrisée et un design profilé (figure 18). Pour cela, nous nous sommes servis de la veille réalisée afin de chercher une forme qui permette la meilleure portance naturellement, tout en permettant l'intégration optimale des composants existants et l'utilisation des deux hélices. La forme qui nous a semblé la plus adéquate a été la coque à fond plat similaire à celle de la péniche, ferrys et bac, celle-ci permettant de maximiser la surface de contact avec l'eau sans pour autant nécessiter une profondeur trop importante, ce qui permettra de pouvoir l'utiliser dans des cours d'eau de toutes dimensions. L'épaisseur de la coque a été fixée à 5 mm, ce qui était le meilleur compromis entre rigidité, quantité et poids de la matière.

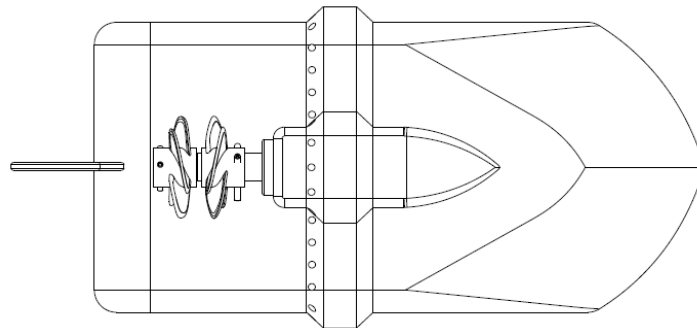


Figure 18 : Vue de dessous coque profilée.

- **Ajustement du centre de gravité :**

Après la création des coques, l'ajout des composants a été réalisé de manière à contrôler le centre-gravité du drone pour que celui-ci ne penche pas de manière importante dans une direction seule, ce qui pourrait perturber la direction du bateau, ou dans le cas le plus défavorable sa flottaison. C'est pourquoi la majorité des pièces ont été positionnées de façon symétrique à l'axe longitudinal du bateau, pour ne pas créer un roulis parasite qui pourrait avoir des conséquences sur les résultats obtenus lors de la comparaison des doubles et simples hélices.

- **Mise en place de l'étanchéité entre les demi-coque :**

La coque CAO ayant été réalisée en un corps de pièce, il a fallu la diviser en deux corps de pièce indépendants au niveau du joint pour garantir une bonne continuité de celles-ci. La séparation n'a pas été modélisée, à part pour les pièces imprimées, sur la CAO (figure 19) mais tous les éléments d'étanchéité évoqués précédemment ont été ajoutés et positionnés suivant les valeurs durant le dimensionnement des joints et des vis. La jointure a été réalisée comme une nervure afin de pouvoir y faire rentrer tous les éléments d'étanchéité, le reste d'épaisseur de la coque étant trop fin. Celle-ci fait le tour du bateau dans sa largeur et reprend le fonctionnement validé par la preuve de concept.

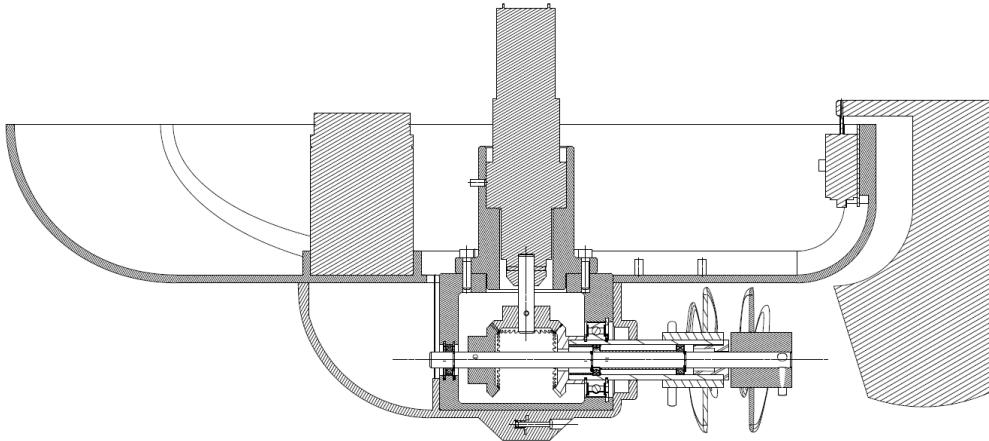


Figure 19 : Dessin d'ensemble.

9) Production :

Pour le rétrofit du propulseur nous avons décidé de reconcevoir le carter (qui était en impression 3D PLA en 2ème année) et de le fabriquer en SLA. Nous avons aussi réfléchi pour l'usiner en aluminium, en POM et même en impression 3D lit de poudre en PA12.

L'impression 3D SLA nous permet d'avoir un très bon état de surface au niveau des portées de roulement et des rainures de circlips ce qui évite de réaliser des usinages supplémentaires. Nous avons décidé de ne pas partir d'un brut et de tailler masse le carter pour éviter le gaspillage conséquent de copeaux. Il en est de même pour le POM, qui est de plus un matériau non recyclable. Pour ce qui est de l'impression lit de poudre PA12, le résultat étant de rugosité élevée, il ne permet pas de réaliser des surfaces fonctionnelles. De plus, ce matériau n'est pas facilement usinable. En effet, nous aurions pu réuser les surfaces fonctionnelles avec les bons ajustements. Nous pouvons observer le résultat des pièces en impression 3D SLA en figure 20, le carter est visible à gauche et le chapeau à droite.

Dans le cadre du rétrofit du propulseur, nous avons pu réutiliser les pièces du différentiel telles que les arbres (qui ont été recoupés sur la scie KASTO), les roues coniques, les roulements. L'ensemble des pièces est visible ci-dessous en figure 21.

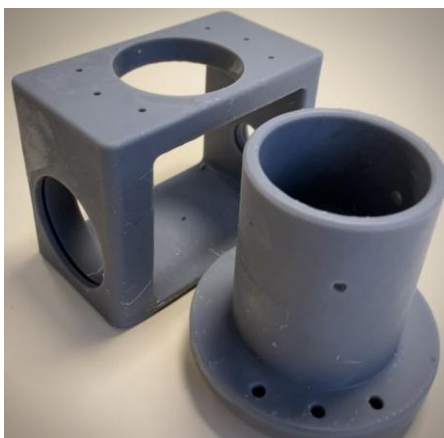


Figure 20 : Impression 3D SLA carter et chapeau.

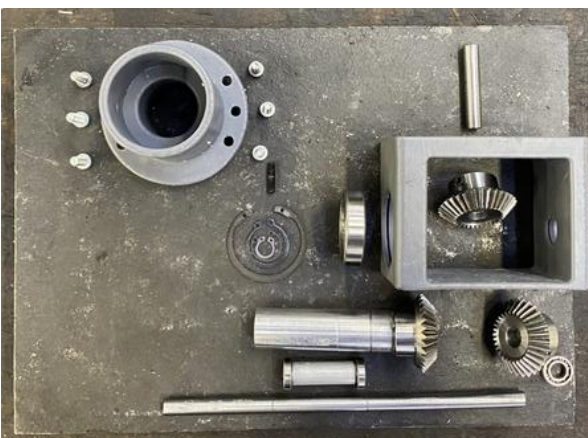


Figure 21 : Pièces différentiel avant montage.

Nous avons réalisé la coque en impression 3D PLA, nous avons ensuite ajouté des inserts en laiton sur la demi-coque avant pour réaliser l'encastrement avec la demi-coque arrière. Nous avons aussi ajouté les deux joints toriques pour assurer l'étanchéité statique de la coque comme on peut le voir en figure 22.

Le moteur a été monté dans son chapeau et le tout a été assemblé au carter. Nous pouvons voir le différentiel et les coques finies en figure 23.



Figure 22 : Mise en place du joint torique.



Figure 23 : Différentiel monté et demi-coques.

Nous avons ainsi réalisé l'assemblage du drone, comme on peut le voir en figure 24, nous avons pu facilement monter le carter du différentiel dans la quille. Le vissage des deux parties de coque a été très simple grâce aux inserts. Cette solution nous a permis de venir écraser de manière homogène les deux joints toriques sur toute la longueur.

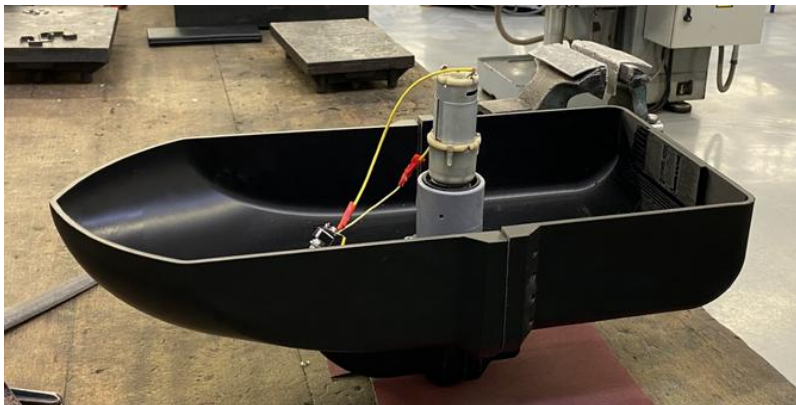


Figure 24 : Coque et différentiel montés.

La dernière étape cruciale de fabrication a été de mettre la résine de protection sur toute la surface de la coque. Nous pouvons voir en figure 25 l'avant/après résine. Il a fallu nettoyer et poncer la coque pour avoir une bonne adhérence de la résine. Deux couches de résines ont été mises pour éviter tout oubli ou coulure.



Figure 25 : Préparation et pose de la résine.

10) Programmation :

Pour le contrôle du drone marin, nous souhaitons pouvoir le faire avancer, tourner droite et à gauche, donc contrôler à distance la rotation du moteur et l'inclinaison du gouvernail. Nous souhaitons aussi intégrer un gyroscope pour faire une acquisition de données d'inclinaison sur l'axe de roulis pour réaliser la comparaison entre 1 et 2 hélices. Nous avons donc effectué des recherches de composants. Comme on peut le voir sur la figure 26, nous avons notre moteur, la batterie de 12 V et le servo moteur du gouvernail. Nous avons choisi d'embarquer sur le drone une carte de type ESP32 qui est compatible Bluetooth et wifi, cela va nous permettre de commander directement sur une application smartphone le drone et surtout réaliser l'acquisition de données du gyroscope. Le gyroscope est matérialisé par un capteur MPU6050 qui est un capteur 6 axes. La carte embarquée doit être alimentée en 5V par une batterie additionnelle visible en rouge. Pour le contrôle du moteur, nous avons réfléchi à l'utilisation d'un module L298N qui fait l'interface entre le moteur, la batterie 12V et la carte ESP32. Nous avons choisi ce module car nous l'avons déjà utilisé sur un projet de robot suiveur de ligne, nous connaissons donc le matériel et les bibliothèques associées.

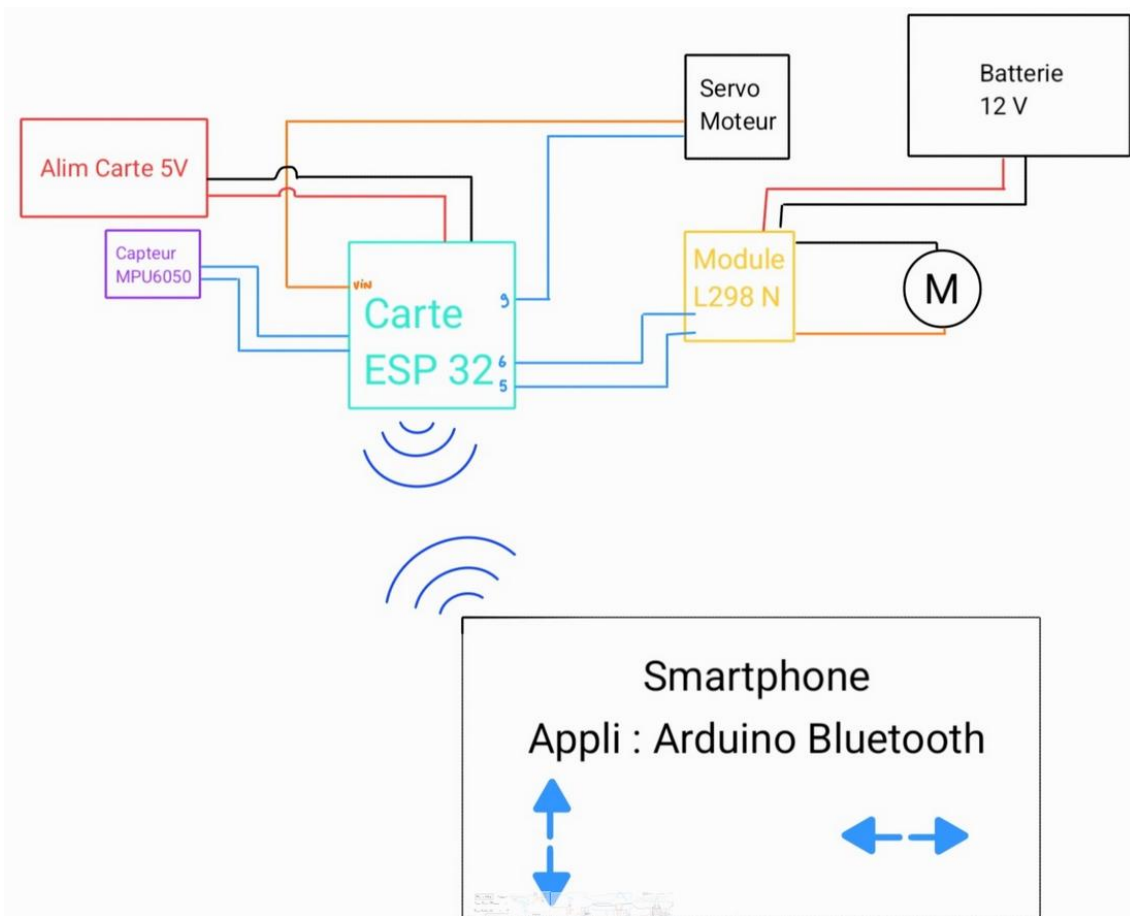


Figure 26 : Schéma de câblage partie commande.

Néanmoins, comme vous l'avez vu sur le GANTT réel, nous n'avons pas réussi à aboutir au fonctionnement de l'ensemble mais à seulement quelques parties en séparé. En effet, sur une carte Arduino UNO, nous avons réussi à faire fonctionner notre cerveau moteur pour le gouvernail mais sans appliquer de bouton droit/gauche permettant de lui demander de tourner quand on le souhaite, le programme le fait simplement osciller de droite à gauche (programme annexe n°5). Pour autant, nous avons réussi à faire fonctionner notre gyroscope et récupérer des données correctes sur le moniteur série de l'ordinateur (programme annexe n°6).

De plus, lorsque nous avons voulu passer sur la nouvelle carte ESP 32, nous nous sommes rendu compte que certaines bibliothèques Arduino ne fonctionnaient pas avec cette carte et que nous n'avions pas de moyen de lui fournir de l'énergie à distance.

N'ayant pas pu aboutir à une application fonctionnelle pour le jour du test, nous avons choisi de faire les essais avec un interrupteur permettant de lancer le moteur et le gyroscope d'un téléphone portable.

11) Essais :

Nous avons réalisé des essais sur le lac de Peyrolles, qui nous ont permis de vérifier plusieurs lignes du cahier des charges. Cependant, les essais ont été écourtés pour cause d'aléas techniques.

Avant les essais en conditions réelles, nous avons testé en atelier le système à vide et sans hélices après montage. De ce test, nous avons pu observer que la vitesse de rotation était celle attendue, avec une légère erreur de coaxialité des arbres en STUB. Pour corriger ce défaut, nous avons essayé d'arranger avec du papier à poncer sur un tour conventionnel.

Ensuite nous avons assemblé les coques, autour du carter que nous avons serré à l'aide d'une clé dynamométrique pour avoir un serrage constant sur toute la surface. Puis nous avons appliqué la résine de polyester permettant d'obtenir une étanchéité pour les tests. Malgré du scotch positionné aux endroits stratégiques, la résine s'est infiltrée entre la coque et la bague d'étanchéité autour de l'axe creux, ce qui a donc créé une résistance sur l'axe creux et qui a empêché le moteur de tourner. Après plusieurs essais non concluants, nous avons remarqué que les roues dentées d'un train épicycloïdal du moteur se sont endommagées. Nous les avons donc remplacés avec d'autres roues dentées de mêmes caractéristiques. Nous avons pu avoir une vitesse de rotation suffisante pour les tests.

Nous nous sommes donc rendus au lac de Peyrolles pour les essais du drone en conditions réelles, avec un prototype fonctionnel. N'ayant pas de temps suffisant pour réaliser l'entièreté de la partie commande, nous avons décidé d'actionner le moteur du propulseur directement à l'aide d'un interrupteur. Nous avons aussi remplacé le gyroscope MPU6050 par celui d'un téléphone (protégé par une pochette hermétique) que l'on a posé au fond de la coque. Ces solutions de simplification nous ont permis d'effectuer les tests et d'obtenir des données pour valider ou non les exigences du cahier des charges. Un premier test a été réalisé hors de l'eau pour s'assurer du bon fonctionnement. Puis nous avons fait un second test assez bref dans l'eau : le drone a parcouru 1m dans l'eau propulsé par les hélices contrarotatives, aussi concluant. Donc nous voulions pousser le test pour acquérir de vraies données à l'aide du gyroscope du téléphone. Le but était de mettre à l'eau le bateau à partir d'un paddle à environ 20m du rivage. Après l'avoir démarré et au bout de quelques mètres, le moteur s'est arrêté. Nous avons tenté de le redémarrer en changeant les câbles, mais nous avons compris que le moteur était hors service après de nombreuses surcharges thermiques.

Pour conclure, les tests écourtés par la défaillance moteur ne nous ont pas permis d'obtenir des résultats de comparaison sur la stabilité du bateau ni de la vitesse d'avance du bateau. Nous avons donc appris de nos erreurs sur les aléas techniques liés au prototypage avec des délais précis.

Partie 3 : Résultats

I/ Résultats :

Nous avons réussi à produire un drone marin avec un propulseur à hélices contrarotatives étanche aux infiltrations d'eau. Le système différentiel fonctionne malgré la contrainte de résistance exercée par les joints sur les arbres. Nous avons bien dimensionné la coque, la ligne de flottaison se trouve bien où nous l'avions voulue. Ainsi, une des principales difficultés du projet : l'étanchéité a été réussie, en effet, nous avons beaucoup appris sur le sujet. L'étanchéité statique entre les deux coques et l'étanchéité dynamique ont été un succès tout comme la conception de la coque. La partie résultat d'essais a été moins concluante avec une casse moteur.

II/ Retour critique sur le projet :

Au cours de ce projet, nous avons compris que notre planification était très ambitieuse, avec un retard pris sur certaines phases.

Pour commencer, nous avons hésité trop longtemps sur la forme de la coque : si nous voulions la faire en deux parties ou non, ses formes, et surtout la solution pour rendre cette bicoque étanche. Nous avons appris que la meilleure méthode et la plus rapide grâce à l'impression 3D, est de réaliser de petits tests préliminaires (POC : Proof of concept) comme nous avons fait avec le bol : un modèle réduit de bateau en deux coques vissées et écrasant un joint torique. Pour se mettre d'accord sur une solution, nous avons d'ailleurs réalisé ce test deux fois pour comparer deux solutions.

Ensuite, nous avons sous-estimé le temps nécessaire à la programmation de la partie commande. En effet la partie Bluetooth liée à l'Arduino contrôlée à distance est plus complexe que ce que nous pensions. Nous avons donc trouvé une solution pour pouvoir réaliser les tests: un téléphone posé dans le drone marin, avec l'application gyroscope et un enregistrement d'écran qui permet d'obtenir la comparaison d'angle de roulis entre une et deux hélices contrarotatives.

Nous avons aussi appris que réaliser des tests de fonctionnement avant chaque étape clé, tels qu'un test de fonctionnement des hélices avant d'appliquer la résine aurait sûrement permis d'anticiper le problème du moteur trop faible.

Nous avons aussi fait les frais des aléas techniques liés au prototypage, en effet en prototypage nous faisons face à de nombreux questionnements auxquels nous ne pouvons répondre qu'après des tests, ou la réalisation de POC, sans réellement savoir si tout pourra correctement fonctionner entre eux. Dans notre cas, nous nous sommes concentrés sur deux problèmes

majeurs de notre prototype, qui est l'étanchéité, et une rotation suffisante des hélices. Sans se douter que le moteur déjà utilisé l'année passée allait cesser de fonctionner juste pendant le test. Dans l'esprit de prototypage, nous avons tenté de trouver des solutions de remplacement de moteur, avec toutes les contraintes déjà présentes, en finissant par simplement réparer le moteur que nous avions. Malheureusement, la partie mécanique étant réparée, c'est la partie électrique qui a lâché pendant le test. Cette défaillance aurait pu être évitée en estimant mieux les forces de frottement des joints par rapport à la puissance du moteur lors du dimensionnement.

Conclusion :

Ce projet se déroulant sur toute la troisième année de BUT GMP a été très formateur. Il nous a permis de mettre en application tous les aspects de la méthodologie acquise tout au long de notre formation. Nous avons pu mettre en pratique l'ensemble de nos connaissances et compétences de GMP. On a pu se rendre compte de la complémentarité de toutes les ressources et outils du GMP, et surtout du prototypage. Pour ce dernier projet, nous avons gagné en maturité et avons maintenant une expérience très concrète avec toutes les difficultés rencontrées. Nous avons pu faire un bilan en répertoriant les erreurs à ne plus reproduire, mais aussi les points positifs et ce qui fonctionne, donc ce qui est à reproduire dans nos futurs projets. Nous avons appliqué la méthodologie de projet et nous avons réalisé un prototype, nous avons pu aller jusqu'à la réalisation des tests : cela prouve que nous avons pu réaliser un travail très poussé et concret. Pour les perspectives, il est possible de remplacer le moteur par un moteur plus puissant, qui permettrait d'avoir une meilleure durée de vie. Ensuite, nous pourrions envisager une industrialisation et une commercialisation d'un drone avec une mission précise de type exploration marine.

Bibliographie et sitographie :

- <https://www.bateaux.com/article/44961/double-helice-sur-un-bateau-quel-est-l-interet-de-la-contrarotation>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9lices_contrarotatives
- <https://www.nauticexpo.fr/fabricant-bateau/propulseur-helice-contrarotative-37771.html>
- <https://www.lavionnaire.fr/HeliceHelices.php>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Sous-marin_radiocommand%C3%A9
- <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20190403/patents/EP2396525NWB1/document.html>
- <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20190403/patents/EP2396525NWB1/document.html>
- [https://patents.google.com/patent/EP2118444B1/fr?q=\(helice+contrarotative\)&oq=helice+contrarotative](https://patents.google.com/patent/EP2118444B1/fr?q=(helice+contrarotative)&oq=helice+contrarotative)
- [https://patents.google.com/patent/US11174016B2/en?q=\(double+propellers\)&oq=double+propellers](https://patents.google.com/patent/US11174016B2/en?q=(double+propellers)&oq=double+propellers)
- <https://patents.google.com/patent/CN109050906B/en>
- <https://hal.science/tel-01347214/>
- <https://theses.fr/2018LYSEC005>
- <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1968/02/lhb1968016.pdf>
- <https://theses.hal.science/tel-03371308v2/document>
- <https://www.gotronic.fr/art-carte-upesy-esp32-wroom-36977.htm>
- <https://www.gotronic.fr/art-module-6-dof-sen-mpu6050-31492.htm>

Annexes :

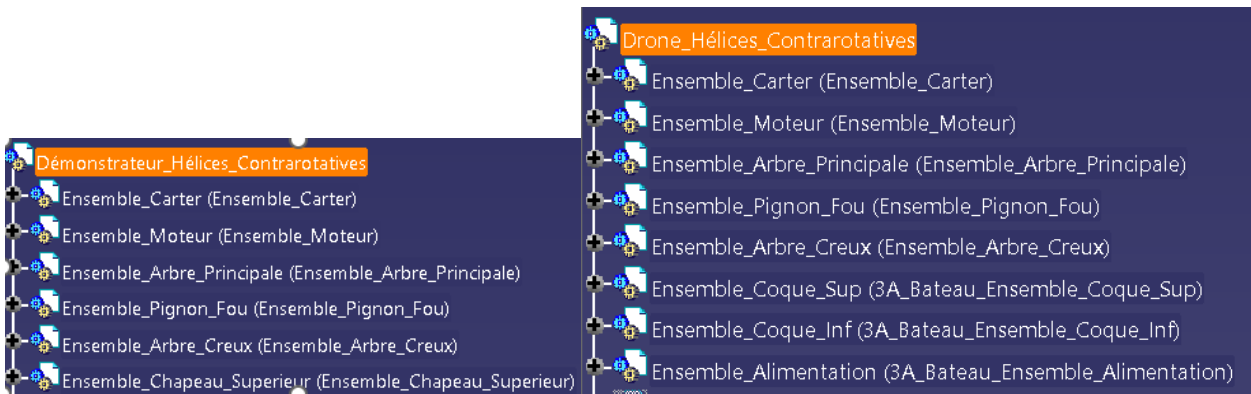


Annexe 1 : Image des inserts utilisé.

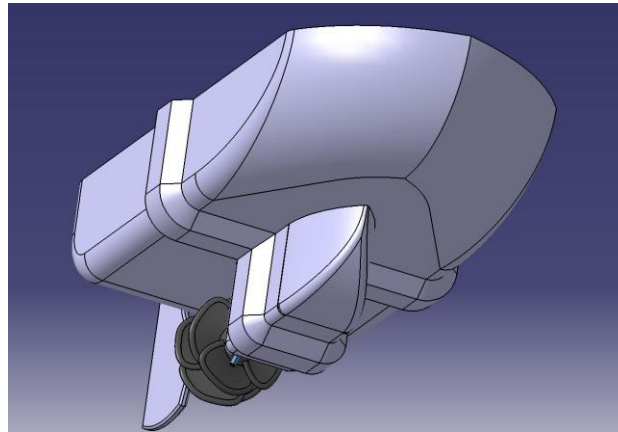
Caractéristiques essentielles des principaux élastomères pour joints d'étanchéité													
matériau	abrévia- tion	tempé- ratures emploi °C	tempé- ratures limites (°C)	dureté Shore A	résistance • compression • traction	résistance à l'abra- sion	non perméa- bilité aux gaz	résistances chimiques					qualités essentielles emploi type le plus usuel avec
								à l'air O ₂ , ozone	huiles minérales	acides	carburants pétroliers	eau	
Nitriles (Butadiène Acrylonit.)	NBR (HNBR)	-40 à 120	-50 à 140	30 à 90	•B •B	C à B	B à C	A à C	A	B à C	A à B	A à C	huiles, eau, air comprimé ; pneumatique ; carburants ; éviter O ₂ , ozone, lumière
Fuoro- carbones	FKM (FPM)	-20 à 200	-20 à 230	50 à 90	•B •B	B à D	A	A	A	A à D	A	A à D	lubrifiants, carburants hautes températures, ozone, O ₂ , solvants
Silicones	VMQ	-70 à 220	-70 à 250	30 à 90	•B •D	C à D	D à NR	A	A à B	D à NR	A à C	A à D	chaleur, froid, air chaud, résistance au vieillissement, diélectrique, résiste déchirement
Poly- réthanes	AU	-30 à 80	-30 à 100	65 à 100	•A •A	A	B à A	A à C	B à A	D à NR	A à C	C à D	résistance abrasion, usure, mécanique et déchirement
Éthylène Propylène	EPM EPDM	-50 à 150	-55 à 160	40 à 90	•C •B	A à C	D à C	A à B	C à D	A à NR	C à D	A à B	résistance, abrasion, air chaud, atmosphère, esters phosphoriques, fluides hydrauliques
Chloroprènes	CR	-40 à 100	-40 à 130	30 à 90	•B •B	C	B à C	A à B	B à A	B à NR	B à C	B à C	inflammable, résistance aux huiles, agents atmos, eau de mer
Butyl	IIR	-25 à 150	-40 à 180	40 à 80	•A •C	C	A	A à B	C à D	A à C	C	A à B	huiles et graisses minérales, faible perméabilité, diélectrique
Poly- acrylique	ACM	-25 à 150	-30 à 180	40 à 80	•A •D	B à C	B à C	A à B	A	B à D	A à B	C à D	huiles et graisses minérales, résiste au vieillissement

A : excellent, B : bon, C : moyen, D : passable, NR : non recommandé

Annexe 2 : Tableau types de joints GSTI (p416).



Annexe 3: Evolution de l'arbre de conception entre la 2A et la 3A.



Annexe 4: CAO.

```
#include <Servo.h>

Servo monServo; // Crée un objet Servo

void setup() {

  monServo.attach(9); // Branche le servomoteur sur la broche 9

  monServo.write(90); // Position initiale à 0°

  delay(1000);

}

void loop() {

  // Tourne de 0° à 180°

  for (int pos = 90; pos <= 130; pos += 1) {

    monServo.write(pos);

    delay(15); // Attend 15ms entre chaque pas

  }

  // Tourne de 180° à -180° (soit 0° en pratique pour un servomoteur standard)

  for (int pos = 130; pos >= 50; pos -= 1) {

    monServo.write(pos);

    delay(15);

  }

}
```

Annexe 5 : Programme servomoteur.

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <MPU6050.h>
```

```
MPU6050 mpu;
```

```
// Offsets gyro
```

```
long gx_offset = 0;
```

```
long gy_offset = 0;
```

```
long gz_offset = 0;
```

```
// Angles finaux
```

```
float pitch = 0;
```

```
float roll = 0;
```

```
// Offsets pour que 0° corresponde à plat
```

```
float pitch_offset = 0;
```

```
float roll_offset = 0;
```

```
// Temps
```

```
unsigned long lastTime = 0;
```

```
void setup() {
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  Wire.begin();
```

```
  mpu.initialize();
```

```
  Serial.println("MPU6050 connecté");
```

```
delay(2000);

// --- Calibration du gyroscope ---
Serial.println("Calibration du gyroscope... NE PAS BOUGER");
int samples = 1000;
for (int i = 0; i < samples; i++) {
  int16_t ax, ay, az, gx, gy, gz;
  mpu.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);
  gx_offset += gx;
  gy_offset += gy;
  gz_offset += gz;
  float axf = ax / 16384.0;
  float ayf = ay / 16384.0;
  float azf = az / 16384.0;
  pitch_offset += asin(ayf/sqrt(axf*axf+ayf*ayf+azf*azf))*180/PI;
  roll_offset += asin(azf/sqrt(axf*axf+ayf*ayf+azf*azf))*180/PI;
  delay(2);
}
gx_offset /= samples;
gy_offset /= samples;
gz_offset /= samples;
pitch_offset /= samples;
roll_offset /= samples;
Serial.println("Calibration terminée");

// --- Mesurer l'angle à plat pour offset ---
//int16_t ax, ay, az;
```

```
//mpu.getMotion6(&ax, &ay, &az, NULL, NULL, NULL);
```

```
//float axf = ax / 16384.0;
```

```
//float ayf = ay / 16384.0;
```

```
//float azf = az / 16384.0;
```

```
//pitch_offset = asin(ayf/sqrt(axf*axf+ayf*ayf+azf*azf))*180/PI;//atan2(axf, sqrt(ayf * ayf + azf *  
* azf)) * 180 / PI;
```

```
///roll_offset = asin(azf/sqrt(axf*axf+ayf*ayf+azf*azf))*180/PI;//atan2(ayf, sqrt(axf * axf + azf *  
* azf)) * 180 / PI;
```

```
Serial.print("Pitch offset: "); Serial.println(pitch_offset);
```

```
Serial.print("Roll offset: "); Serial.println(roll_offset);
```

```
lastTime = millis();
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
int16_t ax, ay, az;
```

```
//int16_t gx, gy, gz;
```

```
mpu.getMotion6(&ax, &ay, &az, NULL, NULL, NULL);
```

```
// --- Correction gyro ---
```

```
//gx -= gx_offset;
```

```
//gy -= gy_offset;
```

```
//gz -= gz_offset;
```

```
// --- Temps écoulé ---  
  
unsigned long currentTime = millis();  
  
float dt = (currentTime - lastTime) / 1000.0;  
  
lastTime = currentTime;  
  
  
// --- Accéléromètre en g ---  
  
float axf = ax / 16384.0;  
  
float ayf = ay / 16384.0;  
  
float azf = az / 16384.0;  
  
  
// --- Angle à partir de l'accéléromètre ---  
  
//float pitch_accel = atan2(azf, sqrt(azf * ayf + axf * axf)) * 180 / PI;  
  
//float roll_accel = atan2(ayf, sqrt(azf * axf + axf * axf)) * 180 / PI;  
  
  
// --- Gyroscope en °/s ---  
  
//float gyroXrate = gx / 131.0;  
  
// float gyroYrate = gy / 131.0;  
  
  
// --- Filtre complémentaire ---  
  
pitch = asin(ayf/sqrt(axf*axf+ayf*ayf+azf*azf))*180/PI; //0.98 * (pitch + gyroXrate * dt) + 0.02 *  
pitch_accel;  
  
roll = asin(azf/sqrt(axf*axf+ayf*ayf+azf*azf))*180/PI;//0.98 * (roll + gyroYrate * dt) + 0.02 *  
roll_accel;  
  
  
// --- Affichage avec correction offset ---  
  
Serial.print("Pitch: ");  
  
Serial.print(pitch - pitch_offset);  
  
Serial.print(" | Roll: ");
```

```
Serial.println(roll - roll_offset);
```

```
delay(10);
```

```
}
```

Annexe 6 : Programme gyroscope.