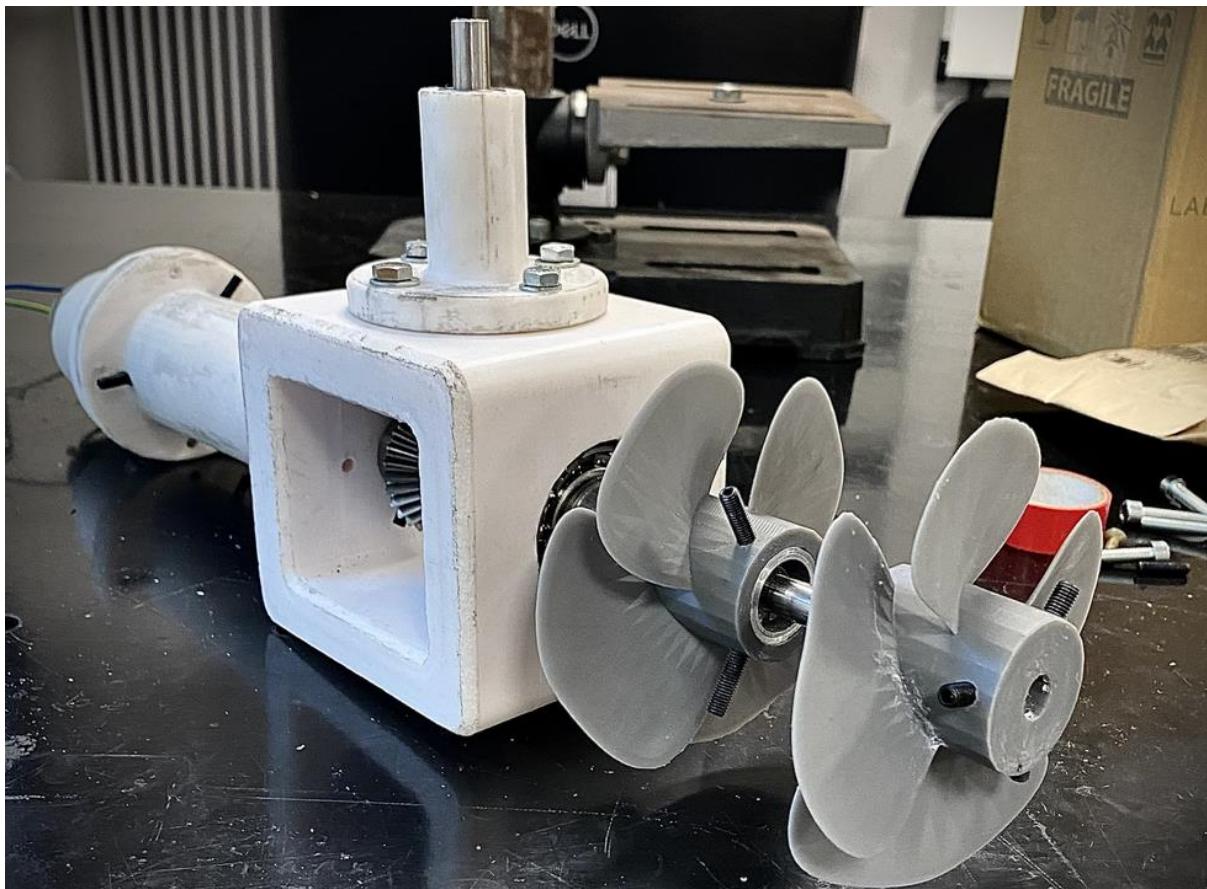


Rapport de Projet : Hélices contrarotatives



Sommaire :

Introduction :	3
I/ Cadre de travail :	3
II/ Sujet de travail :	4
III/ Phases de la mission :	6
IV/ Retour d'expérience :	38
Conclusion :	39
Annexes :	41
Glossaire :	46
Bibliographie :	46

Introduction :

Dans le cadre de notre 2-ème 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 avons identifié les systèmes de propulsion marins comme répondant au cadre du projet : avoir une transmission de puissance intégrant au moins une liaison pivot. Nous avons muri notre réflexion avec nos enseignants encadrant pour déterminer que notre projet serait de concevoir un banc d'essai. Ce banc d'essai doit permettre de comparer les performances d'un propulseur de sous-marin dit "conventionnel" et d'un propulseur dit "innovant".

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

Nous avons aussi à notre disposition des outils professionnels numériques :

- CATIA V5
- ULTIMAKER
- 3DEXperience
- Arduino

Nous avons tout au long de ce projet mis en place les méthodologies de projet vues tout au long de notre formation. Tout d'abord nous avons mis en œuvre les outils de la ressource OPI avec l'organisation de projet, l'ordonnancement des tâches et toute la partie analyse fonctionnelle. Puis les ressources Mécanique et Dimensionnement Des Structures pour les dimensionnements d'arbres, détermination des inconnues de liaison et dimensionnement de notre structure. Nous avons mis en œuvre nos connaissances en ingénierie de construction pour les solutions technologiques et la forme

globale de la solution avec la partie CAO. Nos connaissances en Production-Méthodes nous ont permis de réaliser la conception des pièces dans un premier temps puis leur réalisation. La ressource Cyber nous a été très utile pour le dimensionnement et câblage électrique ainsi que la programmation des capteurs d'acquisition de données.

II/ Sujet de travail :

1) Problématique :

Comment comparer les performances de propulseurs sous-marin dans l'eau ?

C'est donc la problématique qui va nous guider tout au long du projet et qui va nous permettre de parvenir à déterminer une solution technologique innovante en s'inspirant de l'existant. Pour répondre à cette problématique nous allons créer un banc d'essai et un propulseur modulable nous permettant de tester différentes configurations afin de les comparer en termes de poussée produite et de couple de rotation induit.

2) Livrables :

- **Oral de début de projet :** Ce premier oral de projet nous a permis de fixer le cadre et donner une direction à notre projet ainsi que de valider le sujet choisi.
- **Poster :** Le poster est le livrable de milieu de projet qui nous permet de récapituler l'ensemble de notre projet avec notre problématique en partant de la veille et de la recherche de l'existant (pour nous en termes de propulseurs de sous-marin) jusqu'à notre première ébauche de conception et dimensionnement. Nous avons présenté le poster devant un jury ce qui nous a permis de confronter notre projet et nos idées à des personnes très qualifiées dans le monde de la mécanique afin de mettre en évidence les corrections à apporter. Nous avons aussi pu

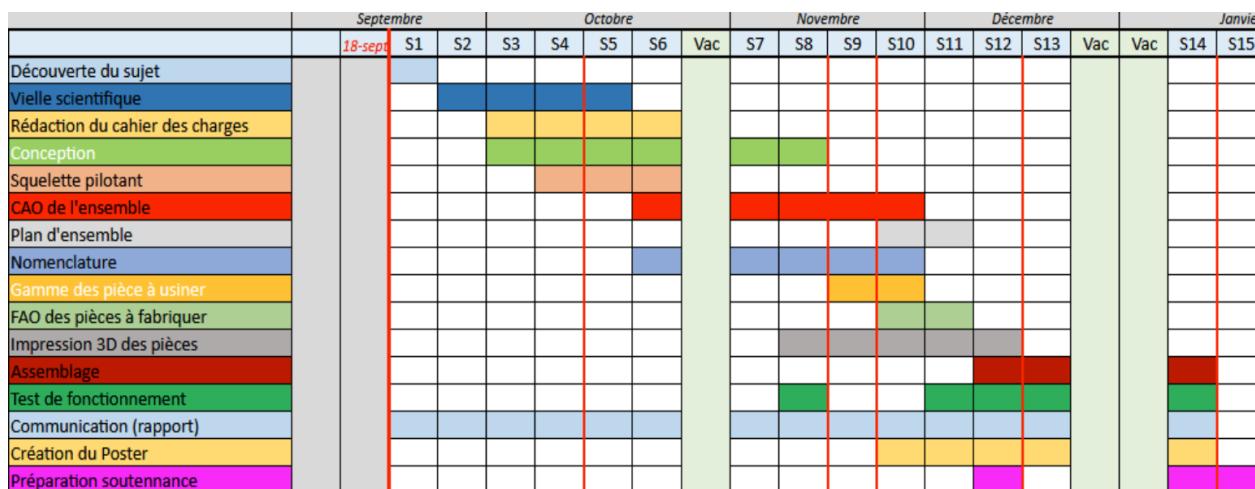
exposer et expliquer nos posters lors de la JPO à un public moins initié ce qui a aussi permis de mûrir nos réflexions et d'ajuster la clarté de celle-ci.

- **Le produit :** Le produit est un des livrables attendus il correspond au banc d'essai et au propulseur avec toute la partie commande, les capteurs (acquisition) et la motorisation.
- **Résultats d'essais :** Les résultats d'essais seront inscrits dans un fichier Excel qui nous permettra de faire le traitement des données des capteurs et donc conclure sur les résultats observés. Une observation visuelle du comportement de notre système est aussi indispensable.
- **Rapport de projet :** Le rapport de projet sous format PDF qui récapitule toutes les actions et la méthodologie suivie tout au long de notre projet, c'est un exercice de synthèse et d'expression écrite technique très formateur car très utilisé dans le monde de l'entreprise et incontournable.
- **Soutenance de fin de projet :** La soutenance orale est la forme d'expression orale technique en équipe, c'est un exercice très important de communication professionnel et de coordination qui va nous permettre de parler de notre projet devant un public technique. C'est une situation qui a lieu dans le monde de l'entreprise pour tout projet et avec laquelle on doit se familiariser.

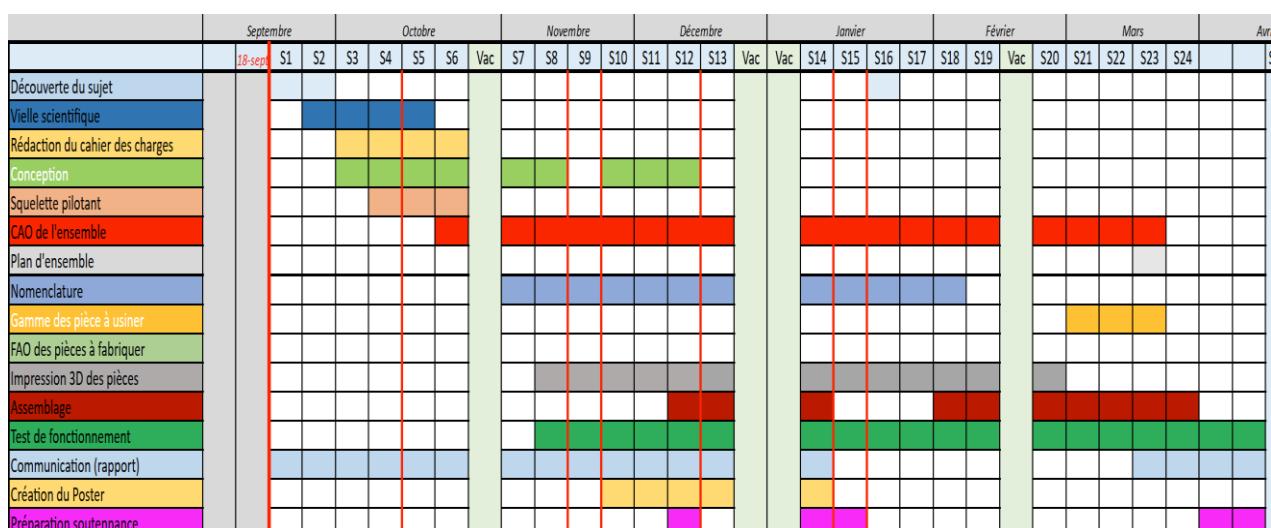
III/ Phases de la mission :

Dès le lancement de notre projet nous avons mis en place un diagramme GANTT du projet dans lequel nous avons réparti les responsabilités de travail et l'échelonnement des tâches. Nous avons fait cela pour donner une direction au projet et maîtriser les délais. Ce diagramme de GANTT a été réalisé sur le logiciel EXCEL, c'est un document partagé entre tous les membres du groupe actualisé en temps réel pour avoir une communication optimale et une non-interférence entre les rôles de chacun.

Gantt prévisionnel du projet :



Gantt Réel du projet :

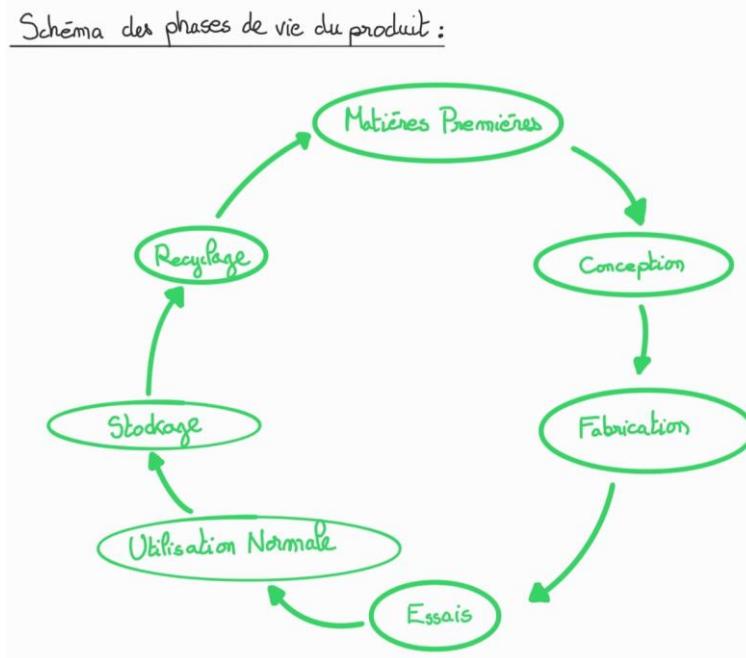


Grâce à ce projet nous avons pu constater, qu'il y a de grands écarts entre les prévisions du Gantt, et la réalité, du a des contraintes de temps (ex : attente de commande, recherche de solution face à un problème, temps d'impression, Poster...). Il est donc préférable de faire un Gantt prévisionnel avec des

marges surtout au point stratégique d'assemblage ou autre, nous avons pour certaines tâches telle que la CAO sous-estimé les temps de réalisation. D'où l'intérêt de ce type d'exercice avec une démarche projet qui nous fait prendre conscience des défis que soulèvent la réalisation de toutes les différentes phases, cela nous donne un ordre de grandeur pour réaliser de meilleures estimations pour nos futurs projets.

1) Phase 1 : définition du sujet

Pour le choix du sujet nous avons décidé de nous orienter vers l'étude de propulseurs de sous-marin, car c'est un domaine qui nous plaît et dans lequel nous avons quelques connaissances. Le but de notre projet est de produire un banc d'essai permettant de comparer dans l'eau les performances d'un propulseur dit "conventionnel" avec un propulseur dit "innovant". Le produit final étant le banc d'essai et son propulseur (modulable) :



2) Phase 2 : Veille technologique

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 (figure 1), à hélices multiples (figure 2) et certains sont à hélices contrarotatives (figures 3 et 4) surtout utilisé dans l'aéronautique.



Figure 1 : Sous-marin militaire chinois à hélice simple – Copyright 2005 – 2024 eCookie SAS



Figure 2 : Double hélice simple à sens inversé de péniche - AREM Maintenance industrielle



Figure 3 : Torpille DTCLN, Le Redoutable à hélices contrarotatives - @Guillaume Rueda



Figure 4 : Avion anglais SeaFire à hélices contrarotatives – 1950 – Jean-Pierre BRILLANT

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'elles sont utilisées dans les torpilles pour supprimer le couple de rotation induit en effet les torpilles sont dépourvues d'éléments stabilisateurs. On peut voir sur la figure 5 la propriété anti-couple des hélices contrarotatives comparée à une hélice simple. Nous avons aussi identifié un second bénéfice de l'utilisation des hélices contrarotatives dans un propulseur elle est visible sur la figure 6 issue d'un brevet. Nous pouvons observer que la seconde hélice bénéficie du flux aérodynamique de la première hélice ce qui améliore le rendement du propulseur d'un facteur 2.

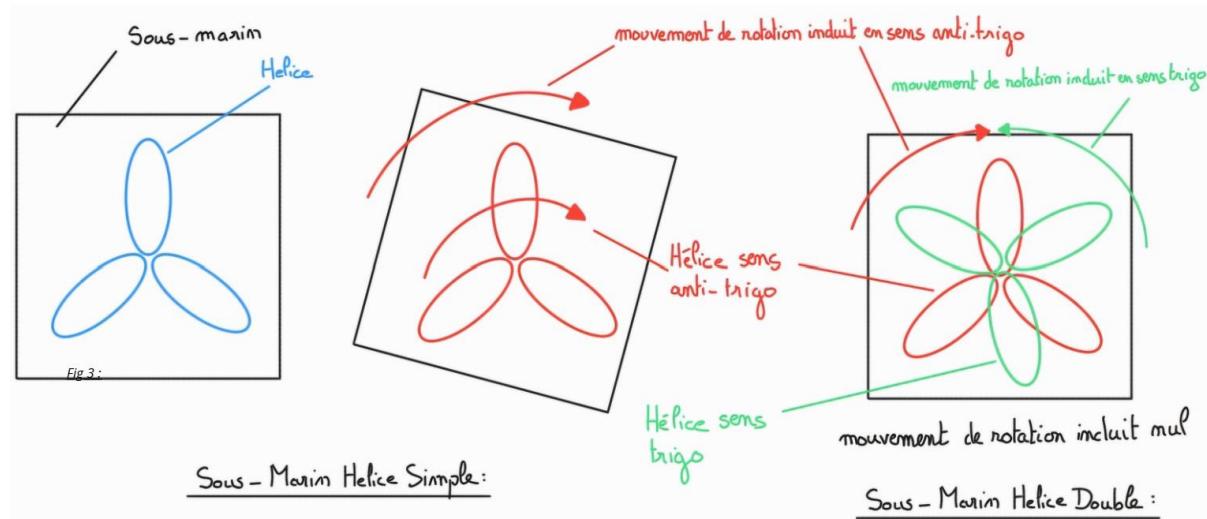
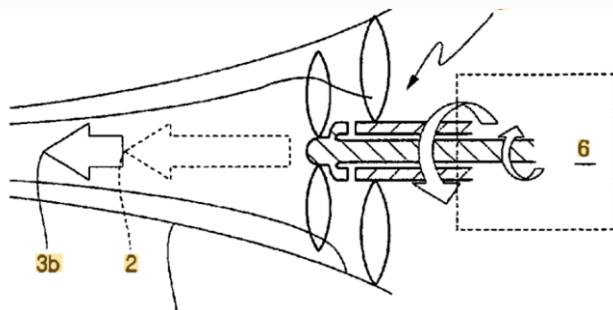


Figure 5 : Schéma de principe de fonctionnement hélices contrarotatives



- 1 => hélice simple
- 2 => poussé
- 3a => turbulence
- 3b => quantité de récupération
- 4a => flux de sillage
- 4b => flux de sillage
- 5 => hélices contrarotatives

Figure 6: Brevet hélices contrarotatives – Samsung Heavy Industries Co Ltd

Nous avons effectué pour notre veille technologique avec des recherches à la fois sur des moteurs de recherche commerciaux, des moteurs de recherche scientifiques et des bases de données de brevets. Nous avons aussi cherché des informations sur les hélices contrarotatives dans des livres techniques. De ces recherches nous avons pu déduire des performances à viser pour notre propulseur avec des équivalents existants dans le commerce. Nous pouvons chercher à atteindre poussée deux fois supérieur à une hélice simple et un couple de rotation induit nul.

Nous avons donc sélectionné d'après l'état de l'art les 3 solution techniques détaillées ci-dessous :

- **Solution 1 :** Hélice simple

Cette solution est composée d'un moteur qui permet de mettre en rotation l'axe principal, et qui va mettre en rotation une hélice simple. Pour une meilleure stabilité Une pivot simple est faites à l'aide de deux roulements dans le bâti qui aurait dû être usiné avec une contrainte de coaxialité .

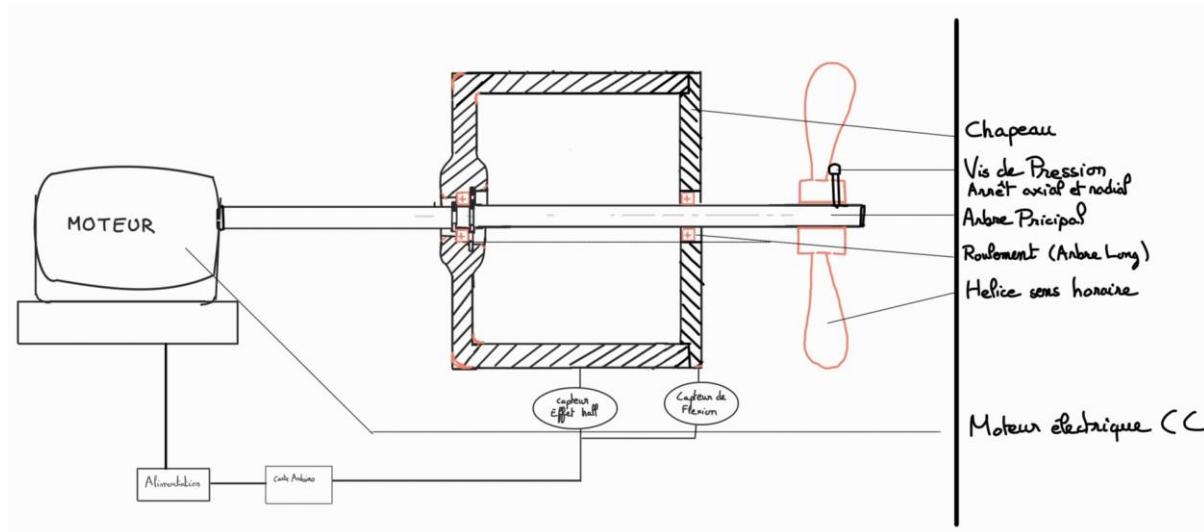


Figure 7: Schéma de principe propulseur à hélice simple

• **Solution 2:** Hélices contrarotatives à train épicycloïdal

Cette solution est composée d'un moteur qui permet de mettre en rotation l'axe, de la même manière que la solution 1, mais cette fois on rajoute une deuxième hélice qui tournera dans le sens opposé. L'idée est d'installer deux satellites qui transmettent une rotation au sens opposé de l'axe principale au tube creux, directement reliés à une hélice. Les deux hélices étant coaxiale notre solution est donc un arbre creux pour que l'axe principale conserve sa rotation sans impacter le tube creux. Deux roulements sont donc installés dans l'arbre creux pour constituer un pivot.

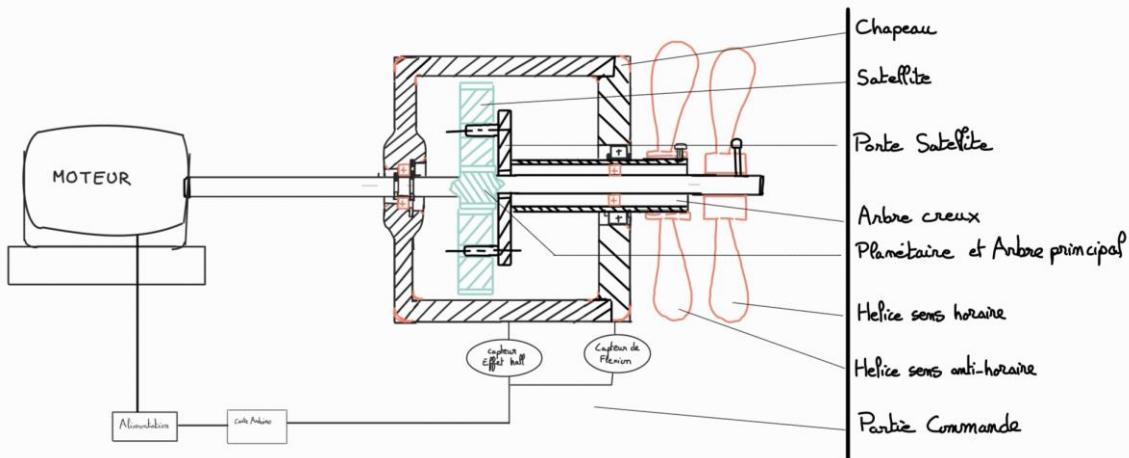


Figure 8: Schéma de principe hélices contrarotatives à train épicycloïdal

- **Solution 3 :** Hélices contrarotatives à différentiel

Cette solution est composée d'un moteur qui permet de mettre en rotation l'axe principale positionnée grâce à 3 roulements dans le bâti qui créer un pivot. Celui-ci met en rotation la première hélice amovible grâce à des vis de pression. Ensuite pour la deuxième hélice, nous souhaitons une coaxialité donc nous avons installés un axe creux relié à la deuxième hélice fixé par des vis de pression. Celui-ci sera mis en rotation par une roue conique entraînés par un pignon fou qui inverse le sens de rotation de la troisième roue conique fixé à l'axe principale. Ce qui permet d'avoir la même vitesse de rotation dans un sens différent tout en étant coaxiale par rapport aux Bâti.

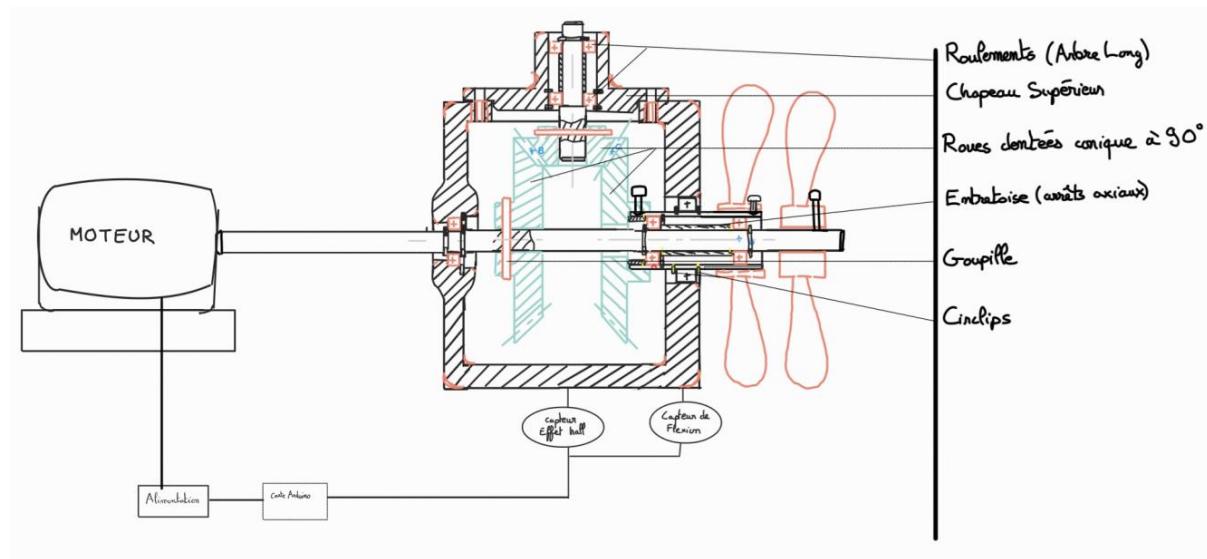


Figure 9 : Schéma de principe hélices contrarotatives à différentiel

Tableau de classement des solutions technologiques :

	Poussée	Masse	Couple de rotation	Indice de réparabilité	Classement
Solution 1	*	***	*	***	3
Solution 2	***	*	***	**	2
Solution 3	***	**	***	***	1

Nous choisissons la solution 3 qui va nous permettre de comparer la solution à l'hélice simple et la solution à hélices contrarotatives étant la plus performante. Cela nous permet d'avoir une solution

modulable la plus simplifiée et qui limite la masse et le nombre de pièce. Et donc augmente la fiabilité et la réduction des erreurs possibles lors de la fabrication.

On en déduit donc une évolution de notre problématique :

Comment tester les performances de propulseurs sous-marin à hélices contrarotatives par rapport à un équivalent à hélices simples dans l'eau ?

3) Phase 3 : Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle de notre produit s'attache à la phase de vie “utilisation normale”.

A partir de la veille technologique nous avons une idée de l'existant et des performances envisageables, cela nous permet de réaliser l'analyse fonctionnelle du système que l'on va concevoir et produire, et ainsi fixer des objectifs. Nous avons donc établi une bête à corne (figure 10) afin de cerner le but du prototype, et de nous mettre d'accord sur les réels objectifs.



Figure 10 : Bête à cornes propulseur hélices contrarotatives

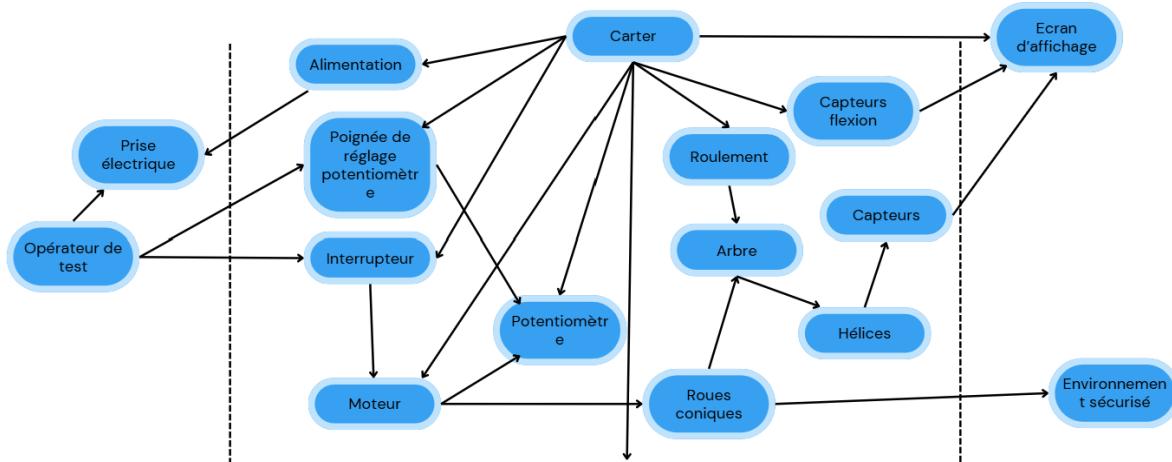


Figure 11 : Diagramme FAST du banc d'essai et du système de propulsion

Diagramme Pieuvre

Nous avons ensuite construit un diagramme pieuvre afin d'établir les fonctions de notre prototype, plus ou moins indispensable et la contrainte associée à notre projet.

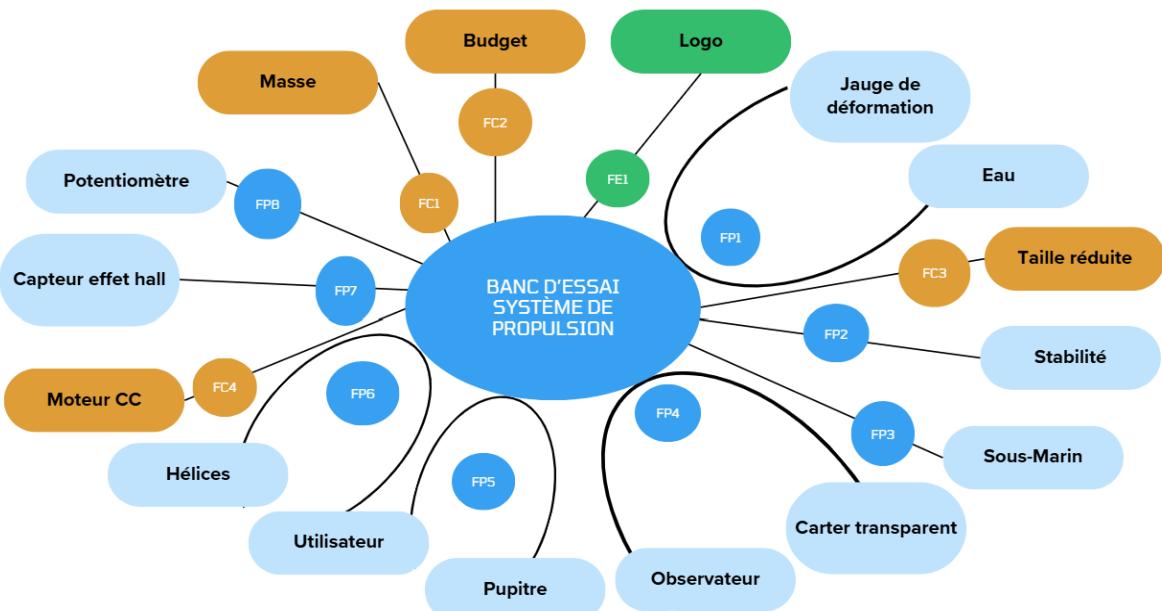


Figure 12 : Diagramme pieuvre du banc d'essai et du système de propulsion

Fonctions Principales :	Fonctions Contraintes :
FP1 => Le système de propulsion doit produire une poussée de 30 N deux fois supérieure qu'avec une hélice simple.	FC1 => Le système de propulsion doit avoir une masse réduite inférieure à 5 kg.
FP2 => Le système de propulsion doit être stable en fonctionnement en supprimant le couple de rotation.	FC2 => Le système de propulsion doit être réalisé comme un prototype dans un budget de 100 €
FP3 => Le système doit pouvoir être intégrer dans un sous-marin.	FC3 => Le système de propulsion doit avoir une taille réduite avec des dimensions inférieures à 800 mm
FP4 => Le système doit permettre à l'observateur d'observer le fonctionnement du propulseur.	FC4 => Le système doit être propulsé grâce à un moteur à CC
FP5 => Le système de propulsion doit rendre visible ses données de	

fonctionnement sur un pupitre de commande.	
FP6 => Le système de propulsion doit être modulable avec une hélice amovible pour la comparaison lors de tests.	
FP7 => Le système doit afficher la vitesse de rotation en temps réel du propulseur.	

Cahier des charges :

Enfin avec toutes les analyses et les brainstormings réalisé, nous pouvons conclure sur un cahier des charges à remplir, avec les fonctions, la valeur, les critères, les niveaux, la flexibilité ou encore le contrôle.

Fonctions Principales					
Fonction	Valeur	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
Le système de propulsion doit produire une poussée	Maximum	force de poussée	plus de 2 fois supérieure qu'avec une seule hélice	0	Jauge de force ou kistler
Le système de propulsion doit être Stable, supprimer le couple de rotation	immobile	Couple	Env: 0 N.m	0	Observation empirique
Le système de propulsion doit avoir un nombre de Reynolds	Maximum	nombre de Reynolds	Env: 10 000 000 au minimum	1	Calcul théorique
Le système de propulsion doit permettre la compréhension du fonctionnement du système	Facilement	parties carter transparente	compréhension facile	0	Observation empirique
Le système de propulsion doit rendre visible les données de fonctionnement	Rapidement	écran d'affichage	affichage	1	Visuel
Le système de propulsion doit être modulable avec une hélice amovible	Rapidement	possibilité de dévisser	Oui	0	Observation empirique
Le système de propulsion doit développer une certaine fréquence de rotation	Donnée	Vitesse de rotation	Env: 100 tr/min	0	Capteur et arduino
Le système de propulsion doit avoir une fréquence de rotation réglable	Donnée	Vitesse de rotation	entre 50tr/min et 100tr/min	0	Capteur et arduino

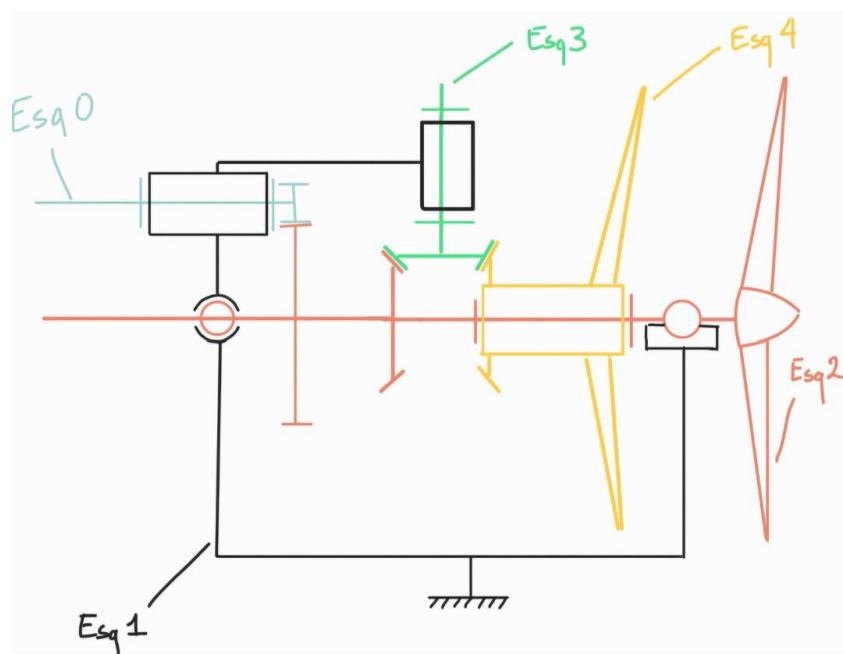
Fonction Contrainte					
Fonction	Valeur	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
Le système de propulsion doit avoir une masse réduite	Minimum	Masse	inf: 5KG	1	Balance
Le système de propulsion doit respecter un prix proto réduit	Minimum	Budget	inf : 100 €	1	Excel des achats
Le système de propulsion doit fonctionner dans un millieux de test	Exact	Fonctionnement	90% de rendement	2	Calcul a partir des tests
Le système de propulsion doit réutiliser un moteur électrique à courant continue	Exact	Alimentation	Env. 100tr/min	0	Visuel
Le système de propulsion doit avoir une taille miniature (démonstrateur)	Adapté	Dimensions (mm)	Environ 800mm	1	Instrument de mesure Metre

Fonction d'estime					
Fonction	Valeur	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
Le carter doit être estétique avec le logo du groupe	esthétique	visuel	Logo en couleur	3	Visuel

Figure 13 : Cahier des charges du banc d'essai et du propulseur

4) Phase 4 : Conception

Nous avons donc commencé la phase d'avant-projet par l'élaboration d'un schéma cinématique de notre mécanisme représentant les différentes classes cinématiques. Nous avons cherché à faire une représentation isostatique, cela nous permettra d'aboutir à une solution plus facilement montable avec une réduction de l'usure de fonctionnement. Nous avons représenté ci-dessous le schéma cinématique et la description des classes cinématique ainsi que les noms des liaisons associés.



Ensembles cinématiques :

- Bâti
- Arbre moteur
- Arbre principal
- Pignon Fou
- Arbre Creux

Liaisons :

- 3 pivots et 1 rotule + 1 linaire annulaire.
- 3 Liaisons engrenages: 1 réducteur 1:5 (denture droite)
- 2 différentiel 1:1 (denture conique)

Figure 14 : Schéma cinématique du propulseur

De ce schéma cinématique nous avons abouti à l'élaboration du squelette pilotant de notre système sur le logiciel CATIA. Le squelette pilotant nous permet de paramétriser les dimensions des différents composants et de vérifier que le système est bien isostatique avec des mouvements cohérents. Le squelette pilotant visible ci-dessous a été réalisé avec un réducteur représenté par le pignon rose et la

roue rouge, ce réducteur a été retiré de notre conception par la suite dans une logique de simplification du système et de gain de masse, il n'était en effet pas indispensable et nous avons trouvé une solution motrice plus intéressante.

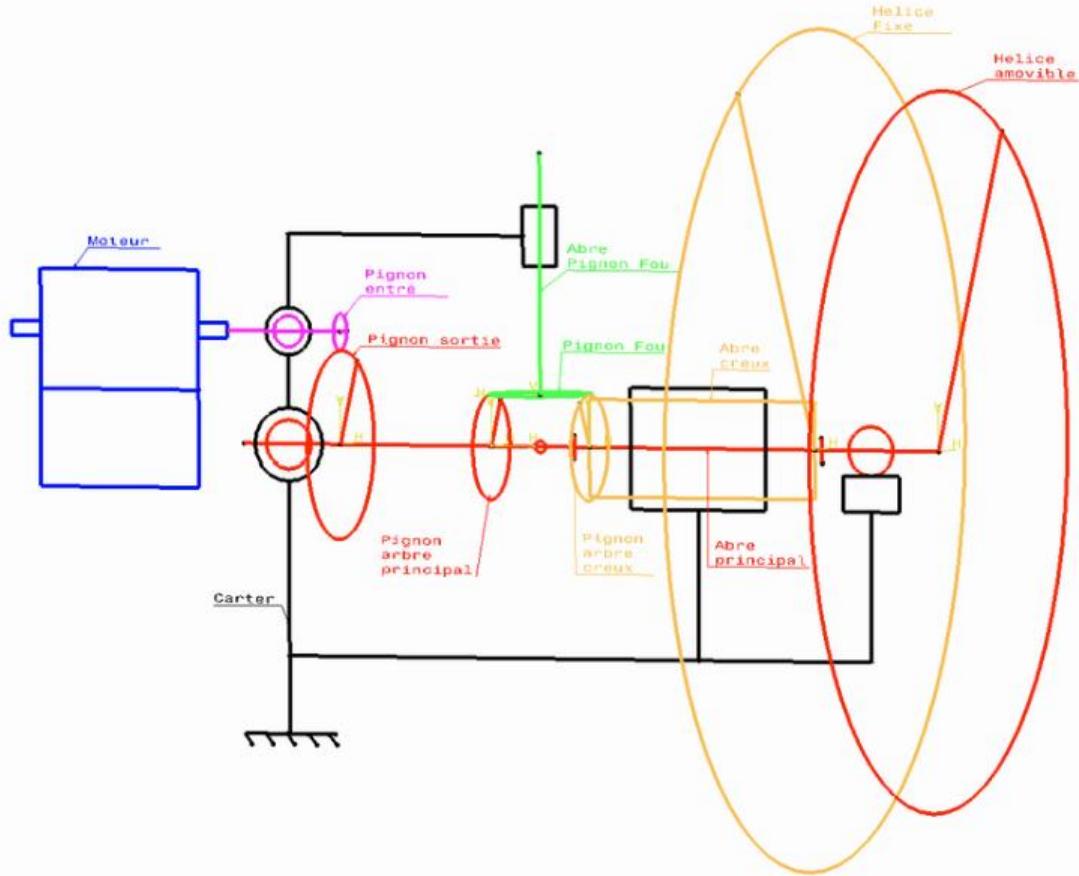


Figure 15 : Squelette pilotant du propulseur

Grâce au schéma cinématique et au squelette pilotant nous avons pu avoir les dimensions du système et les différentes liaisons nécessaires. L'étape suivante a été de murir notre conception en intégrant les solutions technologiques et en les dimensionnant. Pour ce faire nous avons dessiné plusieurs versions d'un schéma de principe du système (visibles ci-dessous) en s'appuyant sur le schéma cinématique.

- Première version schéma de principe :

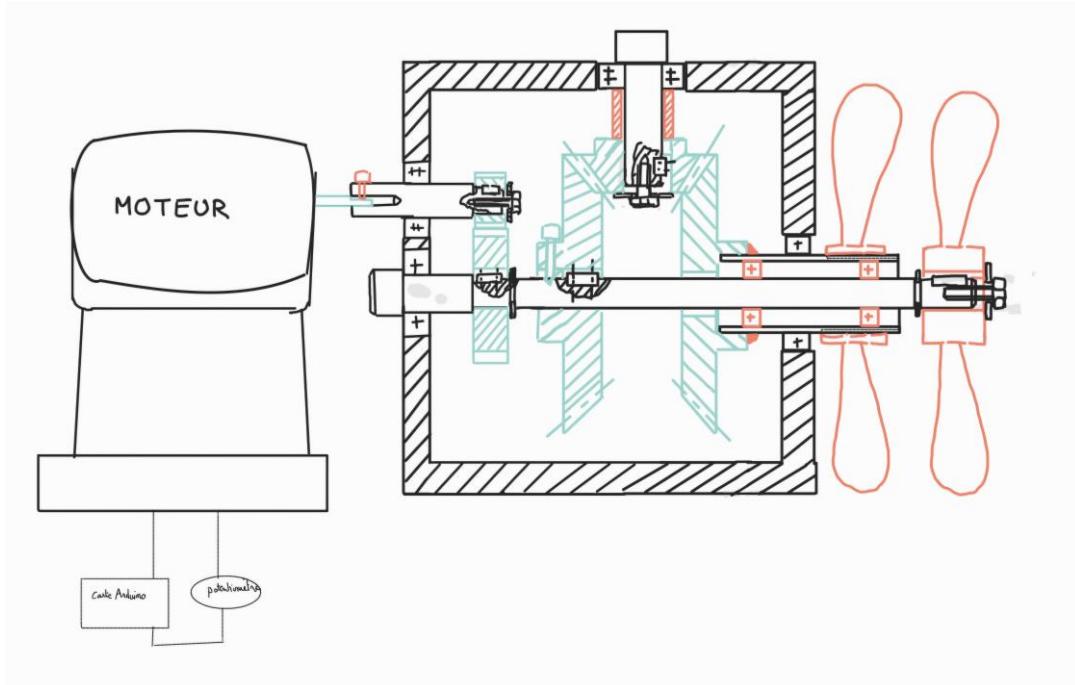


Figure 16 : Premier schéma de principe

- Version finale du schéma de principe :

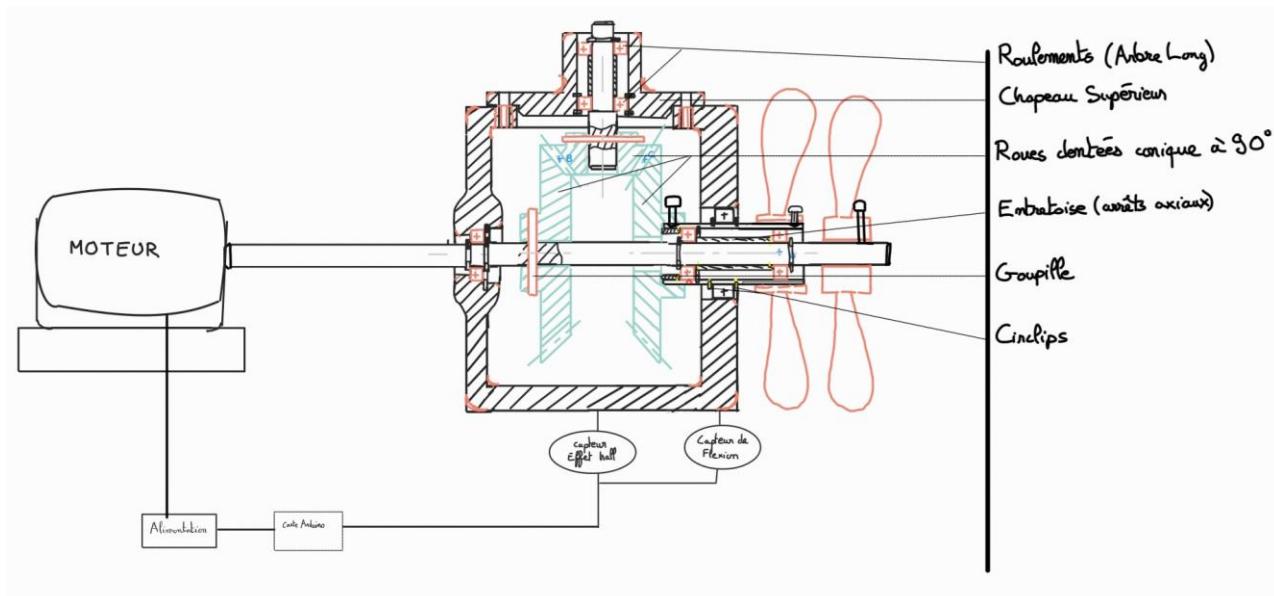


Figure 17 : Schéma de principe final

Nous avons approfondi les solutions technologiques tels que les montages de roulements, nous avons évolué vers des solutions de type "chapeaux" pour faciliter le montage et des chanfreins pour l'assemblage. Nous avons retiré le réducteur et les solutions de type clavette pour des solutions avec goupilles qui nécessiteront une plus grande précision mais simplifiera les gammes d'usinages. La précision accrue demandée par les solutions de type goupille seront simplifiées par l'ajout de calles pelables pour réaliser les ajustements.

En parallèle du schéma de principe répertoriant les solutions technologiques nous avons réalisé les calculs de dimensionnement sur un tableur Excel. Nous avons réalisé un PFS pour déterminer les inconnues de liaison visibles dans "l'analyse statique". Grâce aux inconnues de liaison déterminées nous avons pu réaliser le dimensionnement de tous les roulements. De plus nous avons dimensionné les goupilles, comme on peut le voir sur les encadrés 4 et 5.

Dimensionnement roulement

Analyse statique		
Données :		
FM =>	0,030282 N	
FH =>	50 N	
xADou xAC =>	40 mm	
xAG =>	400 mm	
Calcul de FM		
	C=F*Bras	
	F=C/Bras	
FM	0,030282 N	
Bras => Rayons de la roue	38,875 mm	
C	1,1772 N.m	
Inconnues de liaison		
XA = FA = FH	50 N	
YA = FR = (xAD*FM)/xAG	0,003028 N	
YG = ((-xAD*FM)/xAG)+FM	0,027254 N	

On cherche à vérifier le roulement A		
Charge dynamique	C =>	3300 N
Charge statique	Co =>	1370 N
		330 daN
		137 daN
e=0,5078*(FA/CO)^0,2329	0,401551	
FA/FR < e?	16511,64	FA/FR > e
DONC :		
X	0,56	
Y	1,092836	
PA = X*FR+Y*FA	54,64349	
L10H=(C/PA)^3*(10^6)/(60*N)	214607,9 H	Durée de vie en heure

On cherche à vérifier le roulement B		
Charge dynamique	C =>	10100 N
Charge statique	Co =>	5850 N
		1010 daN
		585 daN
e=0,5078*(FA/CO)^0,2329	0,28636	
FA/FR < e?	1834,626	FA/FR > e
DONC :		
X	0,56	
Y	1,531105	
PA = X*FR+Y*FA	76,57052	
L10H=(C/PA)^3*(10^6)/(60*N)	2236136 H	Durée de vie en heure

Dimensionnement goupille

Arbre de sortie moteur :			
Donnée :	Calcul :		
	Calcul	Unité	Résultat
	T(effort tangentiel) $1/2 \cdot C \cdot (D/2)$	N	0,202966
	R _{pc} $R_e/2$		100
	d _{>} $\sqrt{4 \cdot K_c \cdot T} / (\pi \cdot R_{pc})$	mm	0,06226
	d _{<} $D/4$	mm	1,45

Diamètre goupille => 0,019 < x < 1,45

Arbre après réducteur :			
Donnée :	Calcul :		
	Calcul	Unité	Résultat
	T(effort tangentiel) $1/2 \cdot C \cdot (D/2)$	N	0,44145
	R _{pc} $R_e/2$		100
	d _{>} $\sqrt{4 \cdot K_c \cdot T} / (\pi \cdot R_{pc})$	mm	0,091821
	d _{<} $D/4$	mm	2

Diamètre goupille => 0,028 < x < 2

Calcul du couple de rotation

Données :	
L ₀	4
L	4,6
Delta L	0,6
Poids	0,061
T (Force du ressort)	0,59841
Gravité	9,81
Constante de raideur K	0,99735

T=K*deltaL	avec :	T=N K=N.m-1 delta L = m
delta L = L-L ₀	avec :	delta L = m L = m L ₀ = m
T=P=m*g	avec :	T=N m= KG g = m.s ²
K = T/delta L	avec :	K=N.m-1 T=N delta L = m
		0,59841 0,99735

Grâce à 4 ressorts installés dans caque coins du banc d'essais, nous les avons reliés au Carter. Ensuite nous avons déterminer leur raideur, et pour finir durant l'expérience nous relèverons le sens du couple de rotation et le ΔL des ressorts. Dans le but d'approximer un couple de rotation en N, et de pouvoir faire une conclusion de la performance de deux hélices contrarotatives comparer à une hélice simple.

Experimentation hélice simple	
Longueur Total durant l'expérience	4,8

Calcul :	
Delta L	0,8
K	0,99735
T =>	0,79788

Unité
Résultats
Valeurs expérience

	0,079788 Kg
Couple de rotation =>	79,788 g
	0,79788 N

Experimentation Hélices contrarotatives	
Longueur Total durant l'expérience	4,8

Calcul :	
Delta L	0,8
K	0,99735
T =>	0,79788

	0,079788 Kg
Couple de rotation =>	79,788 g
	0,79788 N

5) Phase 5 : Modélisation et mise en plan

A partir de notre schéma de principe et des calculs de dimensionnement nous avons établi une modélisation CAO paramétrée de notre mécanisme sur le logiciel CATIA V5. Le but de cette modélisation est de rendre cohérent l'agencement de tous les éléments entre eux et de déterminer les dimensions et formes finales des pièces. Cela nous permettra aussi d'obtenir les modèles d'impression 3D pour des pièces prototypes.

L'arbre de conception de la CAO a été réalisée avec un produit par classe cinématique dans lesquelles on retrouve toutes les pièces appartenant à une même classe cinématique tirées du schéma cinématique de l'analyse fonctionnelle. En effet cela va nous permettre d'animer notre CAO en définissant des liaisons pour une simulation dynamique.

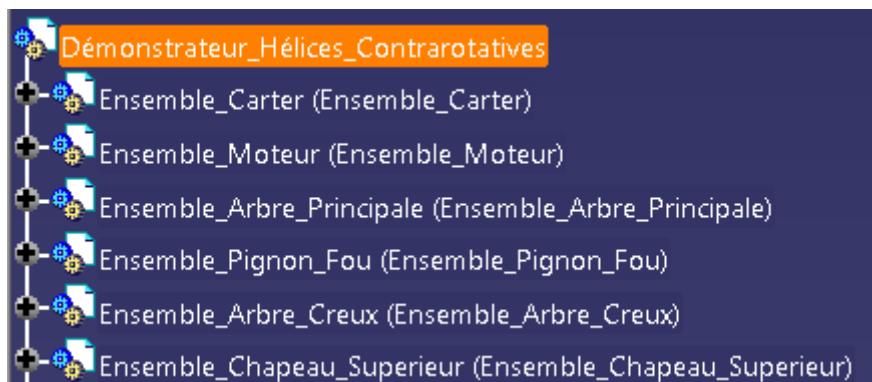


Figure 18 : Arbre de conception CATIA du propulseur

Le carter a été dimensionné de manière à réduire les bras de levier au niveau des roulements pour réduire leur taille et augmenter leur durée de vie, ainsi on réduit les efforts dans les roulements et on réduit l'encombrement.

Des chapeaux avec appuis plan et centrage court (pour la MIP) ont été intégrés afin de faciliter le montage éviter d'avoir un carter trop épais. Ces chapeaux sont maintenus en position par des vis à tête hexagonales et des rondelles pour la répartition des efforts, la facilité de vissage et la réduction de l'encombrement au niveau des têtes de vis.

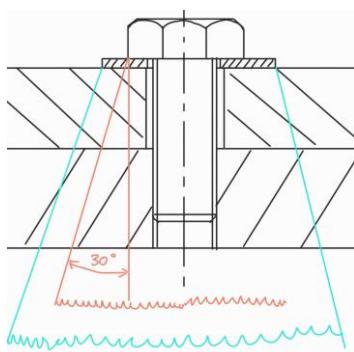


Figure : Schéma du choix des vis

Choix des hélices en conception :

Les hélices ont été choisies parmi une base de données de modèles 3D existants et mises à l'échelle, leur forme similaire à des hélices de jet-ski très compactes, simples, résistantes et de bon rendement ont été pour nous le choix technique optimal. En effet nous n'avons pas les compétences pour dimensionner par nous-même ce type de composant, nous n'avons pas les connaissances en dynamique des fluides suffisantes ni les outils de simulation à notre disposition. L'étude portant seulement sur la caractérisation de la différence entre un propulseur à une ou deux hélices nous n'étions donc pas réellement contraints sur la forme de celle-ci, même si nous cherchons tout de même à concevoir un système de bon rendement. Nous nous sommes quand même inspirés des hélices de bateau et sous-marins car les formes sont déjà optimisées pour le milieu aquatique. Nous avons pu identifier par notre étude de veille technologique qu'il existe des limites physiques pour les hélices tournantes dans l'eau : ce sont les détériorations et destructions par cavitation. En effet la présence de bulles d'air dans l'eau se formant par la pression d'une pale sur le fluide cause des chocs périodiques, on a ici une usure en fatigue dont on doit tenir compte.

Montage des roulements :

Pour les arrêts des roulements nous avons optés pour des montages arbres long en effet dans tous les cas présents la charge est tournante par rapport au bâti, nous utilisons pour les arrêts axiaux des circlips intérieurs et extérieurs ainsi que des entretoises en aluminium.

Conception du différentiel :

Pour ce qui est du différentiel nous avons utilisé des roues coniques à 90 degrés en Acier dont l'arrêt axial et radial est réalisé par des vis de pression : cela pour permettre un ajustement des roues entre elles car les roues coniques nécessitent une grande précision de montage. Cela permet aussi de simplifier la gamme d'usinage.

Conception arbre creux :

La partie critique de notre système est le dispositif d'arbre creux dont le montage des roulements, entretoises et circlips doit être optimisé et simplifié. L'arbre creux qui sera en aluminium sera monté par frettage sur la dernière roue conique pour l'arrêt radial et axial.

Evolution du projet possible :

Le système final a des dimensions globales assez réduites ce qui pourra nous permettre de nous projeter librement pour la poursuite du projet dans la création d'une coque qui enveloppera le système venant accueillir une partie de direction et un système d'immersion par cuves.

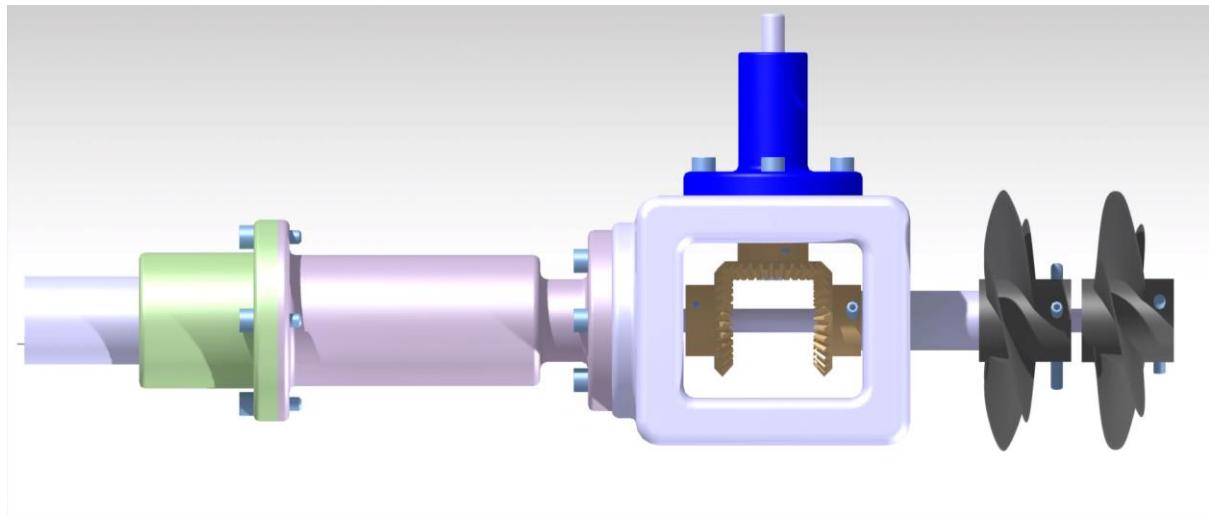


Figure 19 : Rendu final de la CAO du propulseur

6) Phase 6 : Production prototype

Pour la production de notre prototype, nous avons priorisé les impressions 3D pour le prototypage de certaines pièces, ainsi que pour les pièces de forme complexes (hélices) et les pièces subissant des efforts peu importants. L'ensemble de notre carter est en impression 3D pour simuler des pièces issues de fonderie (en aluminium), pour l'industrialisation du carter nous avons pensé à réaliser les carters en fonderie à la cire perdue. Le carter en impression 3D n'est donc pas définitif et nous sert juste à valider notre prototype.

Donc nous avons seulement usiné les axes en acier (stub), les roues coniques et notre axe creux (tube en aluminium).

1) Arbre creux :

Pour l'arbre creux nous avons adapté un tube en aluminium pour y monter l'hélice fixe avec des petits méplats pour les 3 vis de pression et nous avons usiné les rainures de circlips pour le roulement extérieur. Nous avons aussi repercé puis alésé une des roues coniques pour la fixer par frettage sur l'arbre creux pour transmettre le mouvement de rotation en sens inverse.



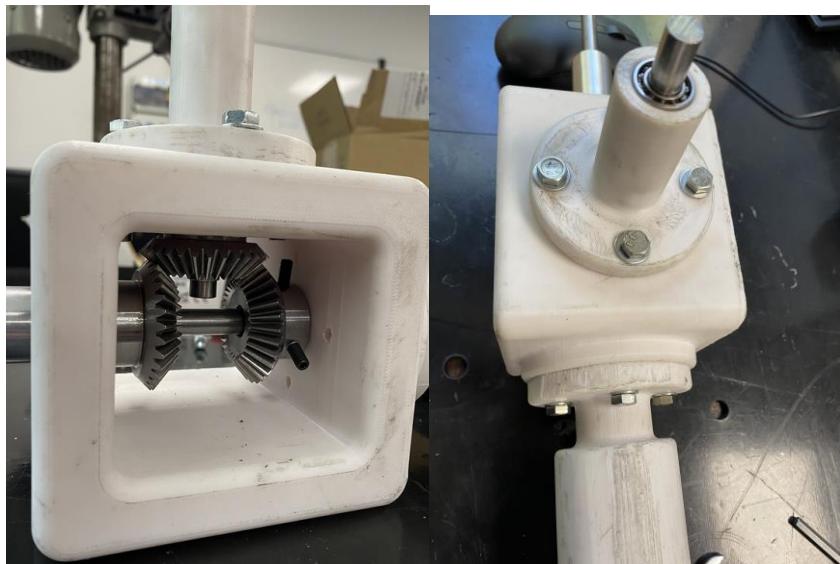
Figure 20 : Photo de l'arbre creux usiné avec roue conique frettée.

2) Axe moteur et axe pignon fou :

Nous avons utilisé du stub pour les axes car leur résistance nous permettait d'éviter le flambage lors de l'usinage et de nous garantir de bonnes performances, mais leur usinage induit plus d'efforts dans les outils. Nous avons travaillé notre conception afin de limiter les grands chariotages et de garder que des rainurages, car les efforts sur les outils sont trop importants.

3) Les carters :

En prototypage, l'objectif est d'avoir un système fonctionnel afin de pouvoir tester les performances, en réduisant le coût autant que possible, tout en rapprochant au plus près des formes du système final commercialisé. Donc pour le Carter, nous avons d'abord réfléchis à l'usiner dans un Bloc d'acier, d'Aluminium ou encore de plastique. Mais la complexité de celui-ci ainsi que le poids et la résistance nous a conduit vers un prototype de Carter en impression 3D à dépôt de fil en PLA. Nous avons fait un premier essai avec 10% de remplissage pour vérifier les dimensions et identifier différents problèmes non visibles en CAO. Pour ensuite imprimer la version finale avec 30% de remplissage. Tout en sachant qu'une version finale industrialisable serait issue de fonderie en aluminium de type "cire perdue".



Figures 21 et 22 : Photos de la transmission par roues coniques et vissages des carters.

4) Partie Motorisation :

Le moteur choisi à la suite de nos études et nos essais est un moteur de visseuse/deviseuse à charbons (brushed) à courant continu ses caractéristiques donc que nous avons recherché est la transmission d'un couple élevé tout en ayant une vitesse de rotation réduite dans les 250 tr/min.

Les caractéristiques du moteur sont 12V de tension et 4A d'intensité en fonctionnement avec un pique à plus de 5A aux démarriages.

Le circuit électrique du moteur consiste en l'association en série d'un générateur (batterie de quad) fournissant 12V et 7A ainsi qu'un interrupteur on/off.

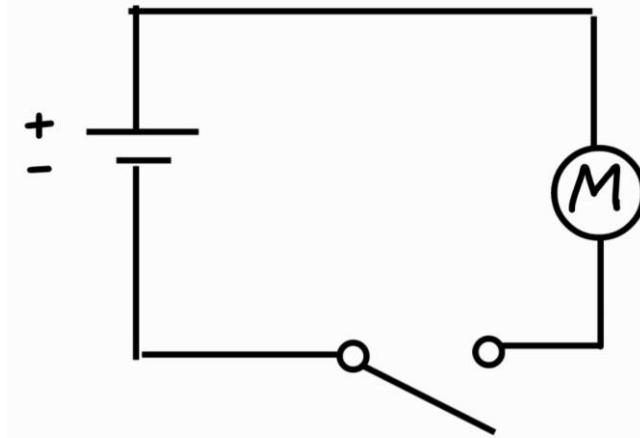


Figure 23 : Schéma électrique du circuit d'alimentation du moteur.

Nous avons réalisé les soudures à l'étain du câblage électrique et nous les avons protégées avec du scotch d'électricien. Nous avons soudé des cos de branchement pour relier notre circuit à la batterie. Nous avons aussi soudé l'interrupteur pour sécuriser la mise en marche du système.

5) Partie acquisition :

Le but de la partie Arduino est de réaliser l'acquisition de données de la poussée et de la vitesse de rotation du système grâce à l'utilisation de capteurs. Pour cela nous avons utilisé le matériel suivant :

- Carte Arduino Uno R3
- Capteur de force à jauge de déformation 0 à 50kg
- Amplificateur de cellules de Charge – HX711
- Écran LCD
- Capteur magnétique à effet Hall

Les hélices dans l'eau entraîneront une translation rectiligne vers haut de l'ensemble du système. Ce qui viendra déformer la jauge positionnée au contact avec le haut du système et nous permettra d'obtenir la poussée générée.

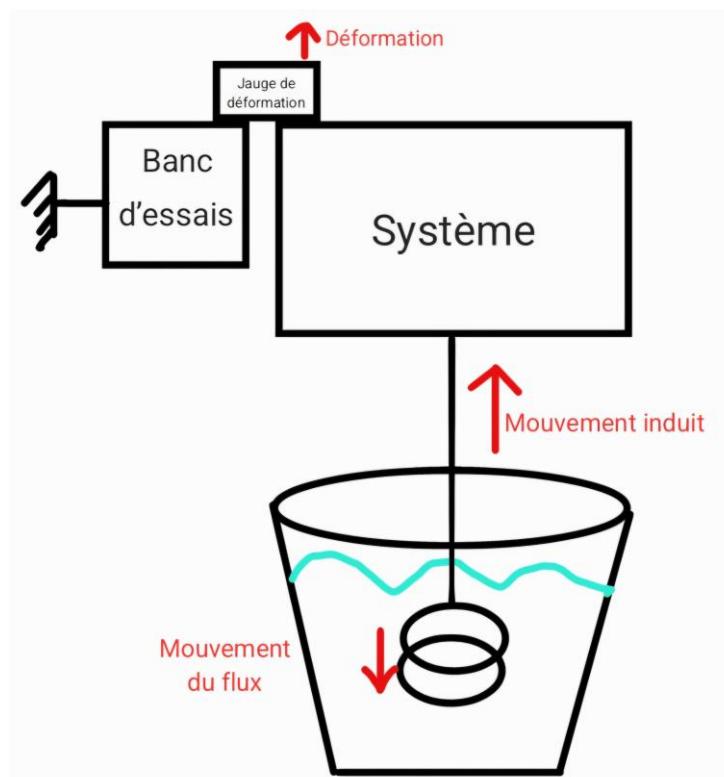


Figure 24 : Schéma du principe de fonctionnement capteur de flexion.

- **Programmation :**

Nous avons réalisé le câblage du capteur de force en passant par l'amplificateur sur la carte Arduino, on a représenté ci-dessous les branchements :

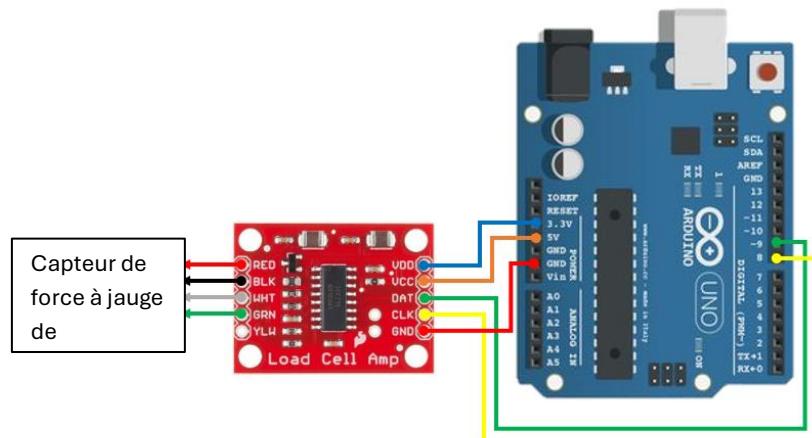


Figure 25 : Représentation de câblage capteur de flexion Arduino.

- **Calibration :**

Les capteurs de force doivent être calibrés pour pouvoir fonctionner, nous avons donc écrit un programme nous permettant de trouver un entier qui sera par la suite appliqué dans le programme de mesure en tant que correction cela correspond à tare d'une balance. Nous pouvons voir le programme de calibration en annexe.

- **Mesure :**

Pour ce programme afin de se rapprocher le plus de la valeur réelle nous récupérons 10 valeurs avant d'en faire une moyenne, c'est cette valeur moyenne qui sera affichée par la suite sur le moniteur séries. Nous pouvons voir le programme de mesure ci-dessous en annexe.

6) Pupitre de commande et acquisition :

Pour le pupitre de commande et d'acquisition nous souhaitons pouvoir démarrer et stopper l'ensemble du système sur un seul et même pupitre de commande. Nous voulons aussi avoir une vision en direct des données mesurées par les capteurs. Nous avons donc découpé avec la découpe LASER deux plaques de plexiglass de 3mm, en installant des emplacements pour les différents les composants électriques :

- Carte Arduino
- Interrupteur
- Alimentation 12V

Pour obtenir un aspect plus propre et rigide, les deux plaques ont été liées par des vis et entretoises, les câbles sont aussi guidés entre les deux plaques. Le pupitre est lui-même vissé sur un profilé du banc d'essai.

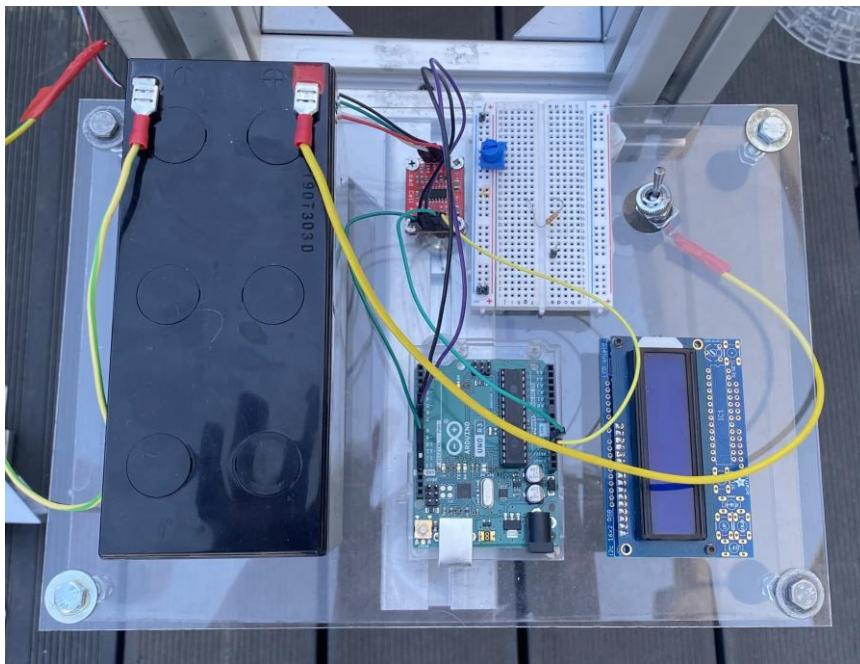


Figure 26 : Photo du pupitre de commande.

7) Hélices :

Pour la réalisation des hélices, l'impression 3D nous a semblé être la meilleure solution. Donc nous avons fait un premier essai en dépôt de fil PLA, qui ne donnait pas des caractéristiques mécaniques de rigidité suffisantes. Les pales trop peu rigides, et nombreux support qui donnent un mauvais état de surface ne nous convenait pas.

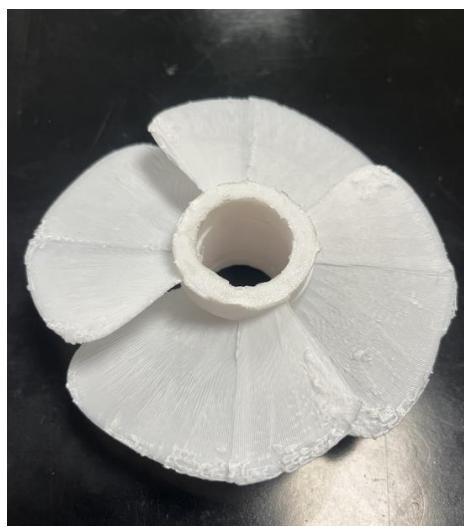


Figure 27 : Photo hélice impression 3D dépôt de fil PLA.

Nous avons donc opté pour une impression en bain de résine SLA, en augmentant l'épaisseur des pales à 1,31mm, et en rajoutant 0,3mm au diamètre sur les alésages. Cette méthode nous a donné un

bien meilleur état de surface, une meilleure résistance des pales : plus grande rigidité. Néanmoins il subsiste un point négatif qui est la fragilité des pales très rigides mais peu résistantes aux chocs nous devons donc faire très attention lors de la réalisation des tests à ne pas les faire tomber ou à ne pas leur causer de chocs.



Figure 28 : Photo hélices impression 3D bain de résine SLA.

8) Banc d'essai :

Le banc d'essai est primordial pour prouver que des hélices contrarotatives sont plus performantes qu'une hélice simple.

Nous avons utilisé des profilés en aluminium afin d'obtenir une structure entièrement modulable sans difficulté d'assemblage pouvant accueillir le système. Avec pour seule contrainte être suffisamment haut pour que le propulseur soit au-dessus d'un seau d'eau avec seulement la partie hélices immergées. Pour pouvoir s'adapter à tous types de seaux nous avons préféré prendre de la marge en hauteur et venir positionner des calles sous le seau pour faire varier sa hauteur. Pour la conception du banc d'essai nous n'avons pas réalisé de modèle CAO mais plutôt des plans en dessin industriel car nous avons souhaité garder une certaine flexibilité dans le montage. Très peu d'usinages ont été nécessaires seulement le sciage de chacun des éléments.

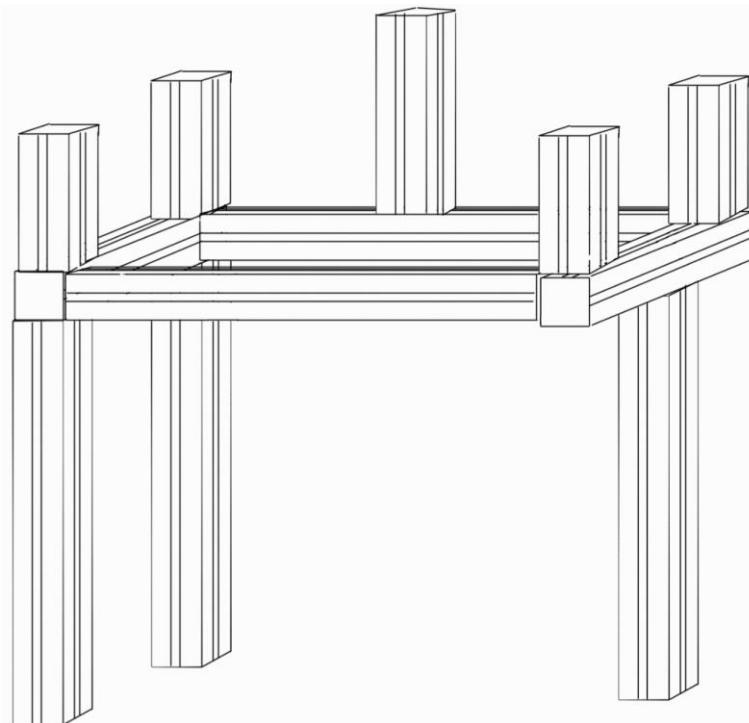


Figure 29 : Vue isométrique de la structure en profilés du banc d'essai.

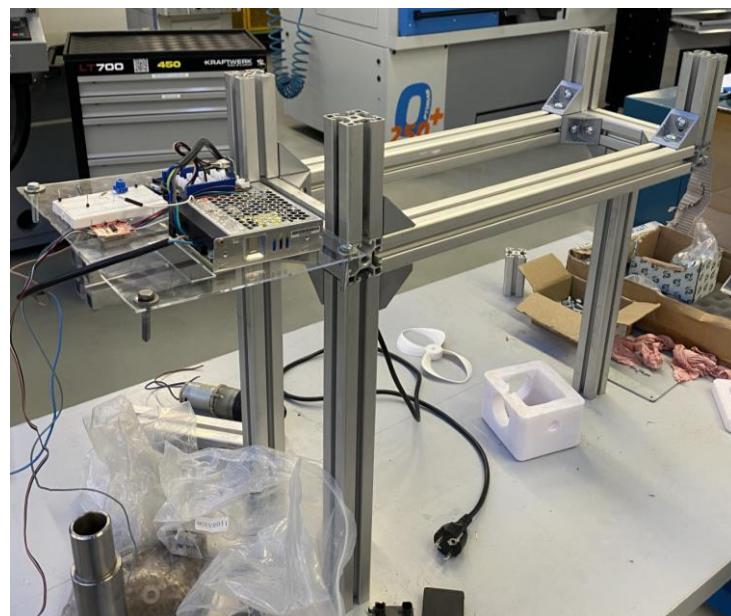


Figure 30 : Photo du banc d'essai monté.

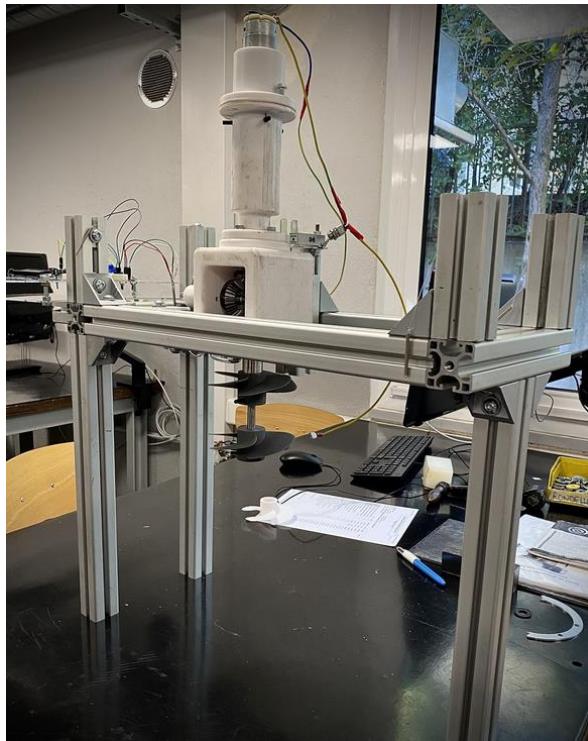


Figure 31 : Photo banc d'essai et système de propulsion monté.

- **Couple de rotation :**

Le banc d'essai a pour but de tester et prouver les performances que l'on recherche et de montrer les avantages des hélices contrarotatives. Nous voulions montrer que deux hélices réduisent voire supprime le couple de rotation induit (roulis nul), pour cela nous réalisons un test uniquement pour le couple de rotation. A l'aide de ressorts reliés au carter de façon symétrique, dont nous avons calculé la raideur. Nous calculons la force exercée sur chacun en kg. Ensuite nous comparons les résultats entre une hélice simple, et les hélices contrarotatives. Pour la réalisation de ces tests nous avons installés sur le banc d'essai 4 petit piliers aux extrémités reliés au ressort. Et lors de l'essai nous enlèverons le cinquième pilier qui sert à calculer la poussée.

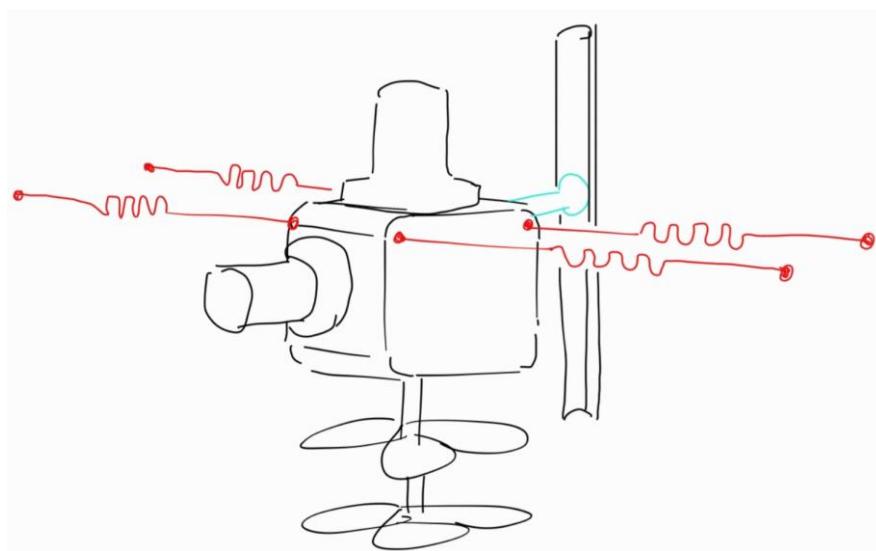


Figure 32 : Schéma de principe montage de détermination du couple de rotation.

- **Poussée :**

Pour le calcul de la poussée nous avons installé un cinquième pilier amovible avec le capteur de flexion positionné au-dessus du carter pour enregistrer et analyser les données lors du test.

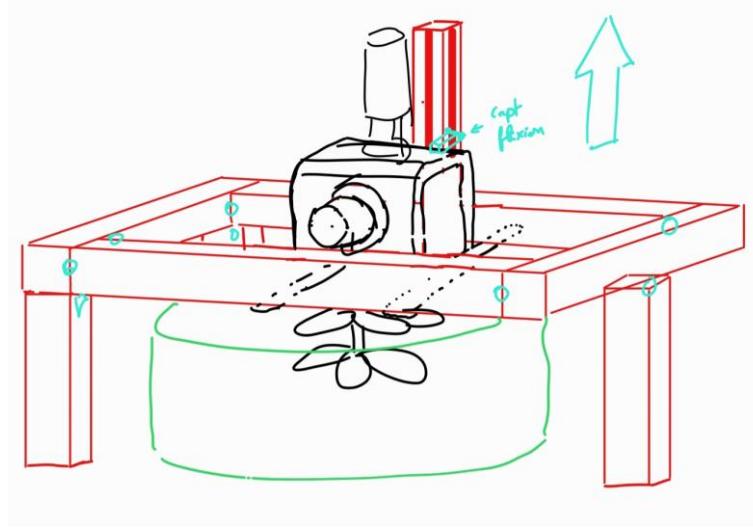


Figure 33 : Schéma de principe de fonctionnement de la détermination de la poussée du propulseur.

- **Vitesse de rotation :**

Pour la vitesse de rotation nous avons simplement installés une équerre où sera installé le capteur effet hall situé proche de l'axe du pignon fou que nous avons laissé dépasser dans le but d'obtenir la vitesse de rotation de notre propulseur. Un aimant est collé sur l'arbre dépassant du carter.

7) Phase 7 : Essais

Avant de commencer les essais sur le propulseur nous avons pesé l'ensemble de notre système pour calculer le ratio poids/performances, nous avons donc mis l'ensemble des éléments sur une balance comme on peut le voir ci-dessous et nous obtenons une masse de 2,5kg pour le propulseur et une masse de 8,6kg pour le banc d'essai.



Figure 34 : Photo du pesage de l'ensemble du propulseur.

Une fois le pesage réalisé nous avons mis en place tout le dispositif d'essai comme on peut le voir sur la photo ci-dessous. Nous avons utilisé notre propulseur reposant sur le banc d'essai en profilés en dessous duquel nous avons positionné un sceau d'eau surélevé, cela pour tester notre système dans son milieu d'utilisation : l'eau. Nous avons fait un premier test de notre système et comme nous nous y attendions nous avons pu observer de fortes projections d'eau hors du sceau. Pour notre deuxième essai nous avons pallié cette problématique par l'ajout d'un film plastique antiprojections qui nous a donné une très grande satisfaction malgré sa simplicité supprimant totalement les projections d'eau hors du sceau.



Figures 35 et 36 : Photos du premier test du banc d'essai à l'arrêt et en action (avec projections d'eau).



Figure 37 : Photo du deuxième test avec film antiprojections d'eau.

Nous avons fait plusieurs essais de poussée et de couple de rotation avec plusieurs configurations de notre propulseur : différents sens de rotations avec une ou deux hélices. Nous avons consigné les observations et résultats de ces différents tests dans les tableaux ci-dessous :

Essai	1	2	3	4	5	6
Hélices	Double	Double	Simple	Simple	Double	Simple

Poussée	Mesurée	Mesurée	Mesurée	Mesurée	Non-mesurée	Non-mesurée
Couple	Non-mesurée	Non-mesurée	Non-mesurée	Non-mesurée	Mesurée	Mesurée
Sens	Trigo	Anti-trigo	Trigo	Anti-trigo	Trigo	Trigo
Résultats attendus	Mesures > Poussée*2	Mesures = Poussée*0	Mesures = Poussée*1	Mesures = Poussée*0	Mesures = Couple*0	Mesures = Couple*1
Validé	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Analyse des résultats obtenus :

- **Poussée :**

Le but de ces essais est de prouver que l'utilisation de nos hélices contrarotatives permet d'obtenir une poussée au moins deux fois supérieurs la poussée produite avec une hélice simple. Nous avons récupéré les données du moniteur Arduino sur une minute de fonctionnement et nous les avons traitées sur un tableur Excel (nous en avons fait une moyenne) :

Test	Moyenne des mesures relevées (N)
Essai n°1 :	1,13
Essai n°2 :	0
Essai n°3 :	0,42
Essai n°4 :	0

Pour nos essais la poussée développée par notre propulseur avec deux hélices contrarotatives est donc 2,69 fois plus grande qu'avec une seule hélice ce qui valide le cahier des charges (poussée plus de deux fois supérieure).

- **Couple de rotation :**

Le résultat attendu était de supprimer totalement le couple de rotation induit grâce aux hélices contrarotatives. Pour cela nous avons réalisés une série de tests.

Test	Moyenne de l'allongement des ressorts (mm)	Force de réaction du ressort calculé sur Excel en (N)	Couple de rotation en (N.m)

Essaie n°5 (Hélices contrarotatives) :	1	0,3989	0,01037
Essaie n°6 (Hélice simple) :	5	1,9947	0,05186

À la suite de ces essais nous pouvons conclure que le couple de rotation a bien été fortement réduit presque supprimé avec deux hélices contrarotatives. Nous pourrions encore optimiser ce résultat en jouant sur la taille de la deuxième hélice : augmenter légèrement son diamètre pourrait permettre d'atteindre un couple de rotation très négligeable sachant que le 0 absolu est très difficilement atteignable.

Conclusions d'essais :

Pour améliorer nos essais et leur résultat nous pouvons encore améliorer la géométrie des hélices qui demanderait des calculs plus poussés sur des logiciels comme Héliciel ou encore Mecaflux. Nous aurions aussi pu nous préoccuper de la forme et la taille du récipient en maîtrisant la distance des hélices avec les parois et le fond de celui-ci.

Pour plus de précision dans les résultats il faudrait considérer plus précisément les frottements de l'eau et de la structure du banc d'essais sur notre système, la précision obtenue est néanmoins largement suffisante pour une comparaison équitable entre les deux systèmes et donc démontrer l'efficacité des hélices contrarotatives et donc valider et vérifier les hypothèses de début de projet ainsi que le cahier des charges.

IV/ Retour d'expérience :

1) Appports :

Nous avons bien su nous répartir les tâches et réaliser l'ordonnancement de ces tâches, nous avons pris une bonne direction dès le début du projet. Notre veille technologique a été très approfondie et nous a permis de balayer l'ensemble du sujet.

Nous avons su réaliser les gammes d'usinage avec le choix des outils et des paramètres de coupe, nous avons bien anticipé la partie production ainsi nous avons été efficaces dans nos usinages ce qui nous a permis de monter l'ensemble du système très rapidement sans observer de problème de montage particulier malgré sa complexité surtout au niveau de l'arbre creux.

Pour les essais nous avons réussi à relever nos mesures, et nos données sont très satisfaisantes, car nous avons obtenus les résultats attendus. De plus nos solutions pour réaliser les différents essais, dont la fonction modulable avec les éléments amovibles fonctionne très bien et nous ont permis de réaliser tous les tests prévus.

2) Difficultés :

Nous avons sous-estimé la durée de la partie conception sur la CAO qui a pris bien plus de temps que prévu dans le diagramme GANTT.

Nous avons mis pas mal de temps à converger vers une solution qui soit bonne en termes de solution technologiques par exemple nous avons rencontré quelques difficultés sur le choix des vis. Nous étions partis sur des vis CHC de maintien des carters sans lamages ce qui n'est pas bon du point de vue de la construction. Mais nous avons sur rectifier le tir en optant plutôt pour des vis H et des rondelles qui ont permis de simplifier la conception plutôt que de réaliser des lamages. De plus cela a permis de faciliter le montage en effet l'accès à certaines zones avec une clé Allen est plus difficile qu'avec une clé hexagonale.

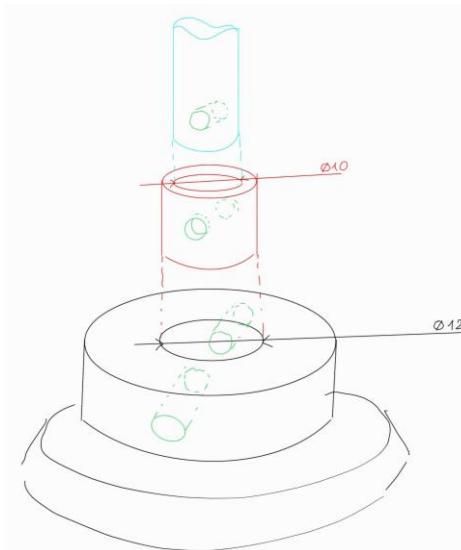
Une de nos principales difficultés a été de rester à notre niveau de compétences, notamment pour la modélisation des hélices qui peut être un travail d'ingénieur nous avons dû approximer certaines de ces valeurs et ses formes géométriques pour aboutir à notre prototype. Malgré tout par la suite ce serait une partie très intéressante, et qui pourrait jouer sur les performances de notre système. Si nous pouvions améliorer celle-ci nous pourrions jouer sur les résonances, les destructions par cavitation, les angles d'hélices pour obtenir encore plus de poussée, ou encore l'espacement entre celle-ci qui pourrait jouer sur la poussée et le couple de rotation.

Conclusion :

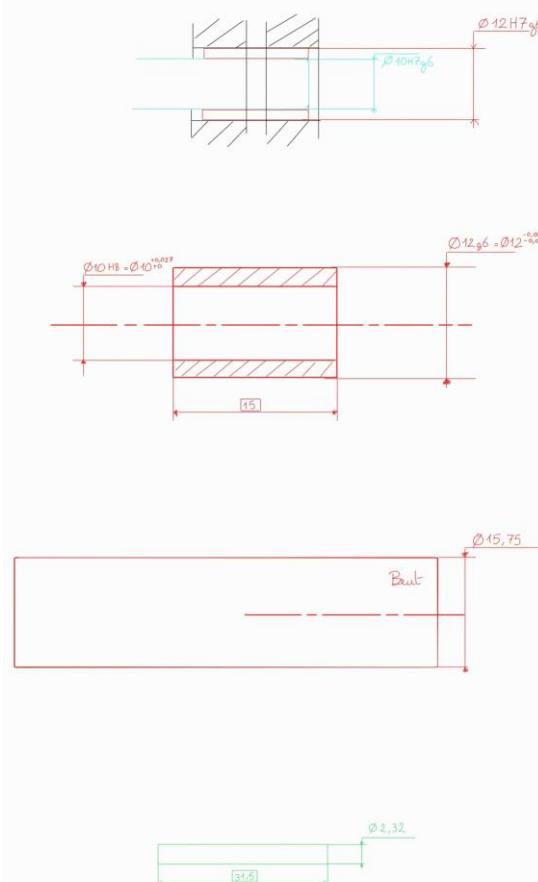
Ce projet se déroulant sur toute la deuxième année de BUT GMP a été très formateur il nous a permis de mettre en application tous les aspects de la méthodologie acquise tout au long de notre formation. Nous avons pu mettre en pratique l'ensemble de nos connaissances et compétences de GMP. On a pu se rendre compte de la complémentarité de toutes les ressources et outils du GMP. Pour ce premier projet nous avons gagné en maturité nous 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 sommes parvenus à répondre à la problématique en démontrant les deux principaux avantages

des hélices contrarotatives, doubler la poussée et suppriment le couple de rotation comparer à une hélice simple, cela suivant la méthodologie de projet. Nous sommes arrivés à produire un prototype fonctionnel conforme au vu du cahier des charges avec des solutions pour son industrialisation. Pour ce qui est des perspectives nous pourrons poursuivre notre projet en développant une coque complète de sous-marin avec le système d'immersion et de direction le tout autour du propulseur que nous avons pu réaliser dans ce projet.

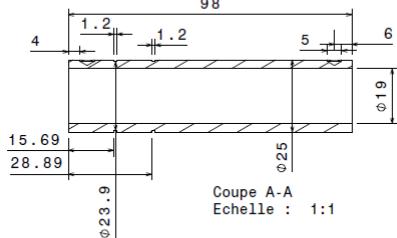
Annexes :



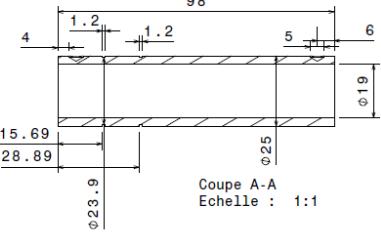
Annexe 1 : Schéma de principe pièce intermédiaire de correction de l'alésage des roues coniques.



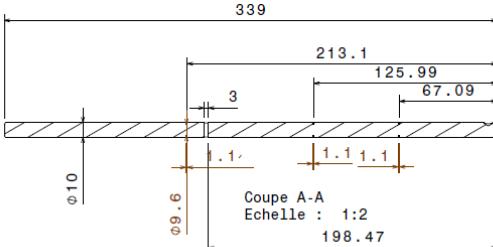
Annexe 2 : Dessin de définition pièce intermédiaire de correction de l'alésage des roues coniques.

PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PHASE 10		BUREAU DES METHODES	
VACHER Etabli par: COMBEMALE TRANIELLO	ELEMENT: arbre creux	N°:	
Le: 18/03/2025	S/Ensemble:XXX	Matière: alu	
Programme:XXX	Ensemble:XXX	Brut:XXX	
Désignation: Tournage			
Machine outil:Tour Conv			
 <p>Coupe A-A Echelle : 1:1</p>			
Désignation de opérations		Outils	
		Paramètres de coupe	
Vc	Ap	Ae	f(z)
m/min	mm	mm	mm/min (mm)
2000	0.2	0.5	0.45
2000	0.2	0.5	0.45
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX

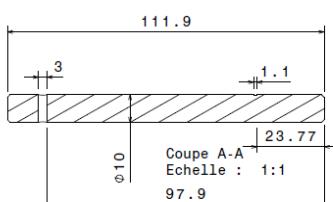
Annexe 3 : Contrat de phase 10 arbre creux.

PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PHASE 10		BUREAU DES METHODES	
VACHER Etabli par: COMBEMALE TRANIELLO	ELEMENT: Hélices contrarotatives	N°:	
Le: 18/03/2025	S/Ensemble:XXX	Matière: alu	
Programme:XXX	Ensemble:XXX	Brut:XXX	
Désignation: Tournage			
Machine outil:Tour Conv			
 <p>Coupe A-A Echelle : 1:1</p>			
Désignation de opérations		Outils	
		Paramètres de coupe	
Vc	Ap	Ae	f(z)
m/min	mm	mm	mm/min (mm)
2000	0.2	0.5	0.45
2000	0.2	0.5	0.45
XXX Dressage	PCLNR	250	
XXX Chariotage	PCLNR	2000	0.2 0.5 0.45
XXX Rainurage	Outil à rainurer	250	
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX	XXX XXX XXX

Annexe 4 : Contrat de phase 10 arbre creux opération 2.

PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PHASE 10		BUREAU DES METHODES
Etabli par: VACHER COMBEMALE TRANIELLO	ELEMENT: Hélices contrarotatives	N°:
Le: 18/03/2025	S/Ensemble:XXX	Matière:XXX
Programme:XXX	Ensemble:XXX	Brut:XXX
Désignation: Tournage		
Machine outil:Tour Conv		
		
Désignation de opérations	Outils	Paramètres de coupe
a Rainurage	Outil à rainurer	Vc Ap Ae f(z) mm/min mm mm mm/mm
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX

Annexe 5 : Contrat de phase 10 arbre moteur.

PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PHASE 10		BUREAU DES METHODES
VACHER Etabli par: COMBEMALE TRANIELLO	ELEMENT: Hélices contrarotatives	N°:
Le: 18/03/2025	S/Ensemble:XXX	Matière: STUB
Programme:XXX	Ensemble:XXX	Brut:XXX
Désignation: Tournage		
Machine outil:Tour Conv		
		
Désignation de opérations	Outils	Paramètres de coupe
a rainurage	Outil a rainurer	Vc Ap Ae f(z) mm/min mm mm mm/mm
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX
XXX XXX	XXX	XXX XXX XXX XXX

Annexe 6 : Contrat de phase 10 arbre pignon fou.



Annexe 7: Dimensions des profilés du banc d'essai pour découpe.

```

1  /*
2  Setup your scale and start the sketch WITHOUT a weight on the scale
3  Once readings are displayed place the weight on the scale
4  Press +/- or a/z to adjust the calibration_factor until the output readings match the known weight
5  Arduino pin 5 -> HX711 CLK
6  Arduino pin 6 -> HX711 DOUT
7  Arduino pin 5V -> HX711 VCC
8  Arduino pin GND -> HX711 GND
9 */
10
11 #include "HX711.h"
12
13 HX711 scale(6, 5);
14
15 float calibration_factor = 40; // this calibration factor is adjusted according to my load cell
16 float units;
17 float ounces;
18
19 void setup() {
20     Serial.begin(9600);
21     Serial.println("HX711 calibration sketch");
22     Serial.println("Remove all weight from scale");
23     Serial.println("After readings begin, place known weight on scale");
24     Serial.println("Press + or a to increase calibration factor");
25     Serial.println("Press - or z to decrease calibration factor");
26
27     scale.set_scale();
28     scale.tare(); //Reset the scale to 0
29
30     long zero_factor = scale.read_average(); //Get a baseline reading
31     Serial.print("Zero factor: "); //This can be used to remove the need to tare the scale. Useful in permanent scale projects.
32     Serial.println(zero_factor);

```

```

33  }
34
35 void loop() {
36
37     scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor
38
39     Serial.print("Reading: ");
40     units = scale.get_units(), 10;
41     if (units < 0)
42     {
43         units = 0.00;
44     }
45     ounces = units * 0.035274;
46     Serial.print(units);
47     Serial.print(" grams");
48     Serial.print(" calibration_factor: ");
49     Serial.print(calibration_factor);
50     Serial.println();
51
52     if(Serial.available())
53     {
54         char temp = Serial.read();
55         if(temp == '+' || temp == 'a')
56             calibration_factor += 1;
57         else if(temp == '-' || temp == 'z')
58             calibration_factor -= 1;
59     }
60 }
```

Annexe 8: Programme de calibrage de la jauge de déformation.

```

1  #include "HX711.h"
2
3  HX711 scale(6, 5);
4
5  float calibration_factor = 41;
6  float units;
7  float ounces;
8
9  void setup()
10 {
11     Serial.begin(9600);
12     Serial.println("HX711 weighing");
13     scale.set_scale(calibration_factor);
14     scale.tare();
15     Serial.println("Readings:");
16 }
17
18 void loop()
19 {
20     Serial.print("Reading:");
21     units = scale.get_units(),10;
22     if (units < 0)
23     {
24         units = 0.00;
25     }
26     ounces = units * 0.035274;
27     Serial.print(units*9.81*0.001);
28     Serial.println(" Newtons");
29     delay(1000);
30 }
31
```

Annexe 9: Programme d'acquisition de la poussée par jauge de déformation.

Glossaire :

- **Hélices contrarotatives** : Doublet d'hélices coaxiales tournant chacunes dans un sens différent.
- **Hélices toroïdales** : Hélices avec formes évidées permettant de réduire le bruit induit.
- **Couple de rotation induit** : Mouvement de rotation d'un système du à son mouvement.
- **Roulis** : Mouvement d'oscillation transversal faisant partie des Axes principaux de rotation avec le lacet et le tangage

Bibliographie :

- https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9lices_contrarotatives
- <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20190403/patents/EP2396525NWB1/document.html>
- <https://patents.google.com/patent/EP2697114A1/fr>
- [https://patents.google.com/patent/EP3543119B1/fr?q=\(helice\)&oq=helice+](https://patents.google.com/patent/EP3543119B1/fr?q=(helice)&oq=helice+)
- [https://patents.google.com/patent/EP2150459B1/fr?q=\(helice+contrarotative\)&oq=helice+contrarotative](https://patents.google.com/patent/EP2150459B1/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://hal.science/tel-01347214/>
- <https://theses.fr/2018LYSEC005>
- <https://core.ac.uk/download/pdf/151207935.pdf>
- <https://hal.science/hal-00538342v1/document>
- <https://pastel.hal.science/tel-01885907v1/document>
- https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/298/1/BOËLY_Nicolas.pdf
- <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1968/02/lhb1968016.pdf>
- <http://seme.cer.free.fr/plaisance/helices-et-propulsion.php>
- <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1968/02/lhb1968016.pdf>
- <https://theses.hal.science/tel-03371308v2/document>
- <https://www.bateaux.com/article/44961/double-helice-sur-un-bateau-quel-est-l-interet-de-la-contrarotation>
- <https://www.heliciel.com/helice/helice%20contrarotative.htm>
- <https://blog.privatejetfinder.com/fr/helices-contra-rotatives/>
- <https://www.suzukimarine.fr/geki/helice-haute-performance.html>
- <https://fr.quora.com/Quel-est-le-but-d'avoir-des-h%C3%A9lices-contrarotatives-sur-un-avion>
- <https://www.nauticexpo.fr/fabricant-bateau/propulseur-helice-contrarotative-37771.html>
- <https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/767498>
- <http://bateaux.trucs.free.fr/ageneral.html>
- <https://www.lavionnaire.fr/HeliceHelices.php>
- https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Rotor_contrarotatif
- <https://www.instructables.com/How-to-Interface-With-5kg-Balance-Module-or-Load-C/>

- https://icn.lycee-valin.fr/dokuwiki/doku.php?id=arduino:utiliser_un_ecran_lcd
- http://sebastien.thibaud.free.fr/_Logiciels/CATIA/CATIA_Ressources.html