

# ISEN

ALL IS DIGITAL!

**OUEST**



yncrea

Institut Supérieur de l'Électronique et du Numérique

Tél. : +33 (0)2.98.03.84.00

Fax : +33 (0)2.98.03.84.10

20, rue Cuirassé Bretagne

CS 42807 - 29228 BREST Cedex 2 - FRANCE

## Projet M1 - Année scolaire 2023-2024

“Drone hybride air-eau à bras pliable”



Proposé par : FAGUNDES GASPAROTO Henrique

Thématique : Robotique

TESNIERE Mathéo

Domaine professionnel : Robotique-Drone

MOSSARD Matisse

Domaine professionnel : Robotique-Drone

# Remerciements

Merci sincèrement à Titouan VERDU et Henrique FAGUNDES GASPAROTO, qui en tant que professeurs encadrants, se sont montrés à l'écoute et toujours disponibles tout au long de la réalisation de ce projet..

Merci à Henrique FAGUNDES GASPAROTO pour le temps consacré à imprimer les pièces en 3D nécessaires à ce projet.

# Résumé

Ce projet de drone hybride air eau à bras pliable est proposé par Monsieur VERDU et Monsieur FAGUNDES GASPAROTO qui sont les professeurs encadrant de ce projet

La finalité de ce projet est de permettre aux bras du drone de pouvoir s'incliner précisément suivant le désir du pilote afin d'étudier son comportement dans un environnement aérien et à la surface de l'eau. Il pourrait aussi par la suite être muni de différents capteurs (humidité, ensoleillement, ...) pour lui permettre d'interagir avec son environnement en toute autonomie ou de communiquer des informations pertinentes avec les opérateurs.

Ce projet ayant déjà été proposé les années précédentes, il a fallu comprendre et analyser les solutions adoptées, tout en tenant compte du cahier des charges. Pour ce faire, une attention toute particulière a été adoptée concernant la gestion de projet pour avoir une vision complète des enjeux à venir. Ensuite, différentes possibilités ont été envisagées sur les problématiques liées aux parties mécaniques et électroniques du système. Chacune d'elles ont par la suite fait l'objet de test afin de déterminer quelle solution adopter.

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>2</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>3</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>4</b>
<b>Table des figures</b> .....	<b>5</b>
<b>I - Glossaire</b> .....	<b>6</b>
<b>II - Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>III - Cahier des charges</b> .....	<b>8</b>
A- QQQQCP .....	8
B- Bête à cornes .....	9
C - Analyse fonctionnelle.....	9
D - Diagramme pieuvre .....	11
<b>IV - Gestion de projet</b> .....	<b>12</b>
A - Organigramme des tâches.....	12
B - Diagramme de Gantt initiale .....	12
C - Diagramme de Gantt fin de projet.....	13
<b>V - Etat de l'art</b> .....	<b>14</b>
<b>VI - Développement technique</b> .....	<b>15</b>
A. Jonction bras pliable - moteur .....	15
1) Problématique .....	15
2) Solutions .....	16
3) Etudes statiques.....	17
4) Test et évolution .....	19
B. Soutien moteur .....	21
1) Problématique .....	21
2) Solutions .....	22
3) Etudes statiques.....	23
4) Tests et évolution .....	23
C. Coque.....	24
1) Problématique .....	25
2) Solutions .....	25
3) Forme globale .....	28
4) Modélisation en 3D.....	30
<b>VII - Électronique</b> .....	<b>31</b>
A - Le système .....	32
B - Le montage .....	32
C - Optimisation .....	33
<b>VIII - Programmation</b> .....	<b>36</b>
<b>IX- Test</b> .....	<b>39</b>
<b>X - Conclusion</b> .....	<b>40</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>41</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>42</b>

# Table des figures

Figure 1 : Tableau présentant la méthode “QQOQCP” .....	9
Figure 2 : Diagramme bête à cornes.....	10
Figure 3 : Diagramme pieuvre du projet.....	12
Figure 4 : Organigramme des tâches.....	13
Figure 5 : Diagramme de Gantt de début de projet .....	14
Figure 6 : Diagramme de Gantt de fin de projet .....	14
Figure 7 : Mirs-X.....	15
Figure 8 : Diodon HP30 .....	15
Figure 9 : Schéma des états possibles du drone .....	16
Figure 10 : photo du système initiale jonction bras pliable .....	17
Figure 11 : Ébauche de solutions à engrenage jonction bras pliable.....	17
Figure 12 : Schmidt coupling et jointure cardan .....	18
Figure 13 : Jonction directe modélisé et représentation globale.....	18
Figure 14 : Schéma de l'étude statique du bras pliable .....	20
Figure 15 : Etudes statique de la pièce 1ère version .....	20
Figure 16- : Etudes statique de la pièce 2e version .....	21
Figure 17 : Photos de la solution initiale du soutien moteur .....	22
Figure 18 : Solution soutient moteur modélisé .....	23
Figure 19 : Vue globale de la solution soutient moteur sur le drone .....	23
Figure 20 : Tests de résistances sur la solution soutient moteur.....	24
Figure 21 : Modélisation de l'évolution de la solution soutient moteur.....	24
Figure 22 : Vue rapprochée de la partie évolué du soutien moteur .....	25
Figure 23 : Structure du drone assemblée, avec les supports moteur.....	25
Figure 24 : Schéma ouverture 1ère version carrée .....	27
Figure 25 : Schéma ouverture 2e version rectangulaire fine .....	27
Figure 26 : Schéma ouverture 3e version cercle.....	28
Figure 27 : Schéma du problème d'inclinaison du bras 1ère version .....	28
Figure 28 : Schéma ouverture 4e version ellipse .....	29
Figure 29 : Schéma du problème d'inclinaison du bras 2e version.....	29
Figure 30 : Ébauche du contour de la coque vue du haut.....	30
Figure 31 : Ébauche du contour de la coque vue de côté .....	30
Figure 32 : Ébauche du contour de la coque vue 3/4.....	31
Figure 33 : Vue de 3/4 de la coque modélisée.....	31
Figure 34 : Schéma électrique du drone .....	32
Figure 35 : Photo du moteur à vis sans fin.....	33
Figure 36 : Schéma électrique contrôlant le pliage des bras.....	33
Figure 37 : Montage électrique contrôlant le pliage des bras .....	34
Figure 38: Schéma du circuit imprimé d'un driver moteur .....	35
Figure 39: Schéma du circuit imprimé du montage .....	35
Figure 40: Représentation 3D du circuit imprimé du montage.....	36
Figure 41 : Représentation d'un encodeur .....	37
Figure 42 : Graphique de lecture le l'encodeur .....	38
Figure 43 : Graphique présentant la réponse du système sous l'effet d'un PID .....	39

# I - Glossaire

**3D** : Trois dimensions

**CAO** : Conception Assisté par Ordinateur

**RPM** : Rotation Par Minutes

**ABS** : Acrylonitrile Butadiène Styrène (Matière pour impression en 3D)

**PLA** : Acide Polylactique (Matière pour impression en 3D)

**Hydrophobe** : Substances ou matériaux qui présentent une répulsion significative envers l'eau.

**Aéro/hydrodynamique** : La dynamique des fluides (hydrodynamique ou aérodynamique) est l'étude des mouvements des fluides, qu'ils soient liquides ou gazeux. Elle fait partie de la mécanique des fluides avec l'hydrostatique (statique des fluides).

**Coefficient de sécurité** : Il représente la capacité de la pièce à résister à des charges supérieures à celles prévues (un coefficient de 2 signifie que la pièce peut résister à 2 fois la charge prévue).

**Thermoformage** : Technique de fabrication qui consiste à prendre un matériau plastique sous forme de plaque, à le chauffer pour le ramollir puis à profiter de sa capacité de déformation pour le mettre en forme grâce à un moule.

**Pin** : Pièce métallique mécaniquement solidaire d'un boîtier, d'un circuit imprimé ou d'un composant, destiné à en assurer la connexion électrique et éventuellement la fixation

## II - Introduction

La collaboration entre les domaines aérien et aquatique est devenue cruciale dans la recherche et l'application des systèmes sans pilote. Cependant, cette coordination rencontre des défis en raison de la communication restreinte causée par la discontinuité entre ces deux milieux. Les véhicules aériens-aquatiques ont la capacité de naviguer dans ces deux environnements, ce qui permet de relier les deux systèmes sans pilote et d'améliorer le partage de certaines informations. De plus, ces véhicules peuvent être utilisés de manière polyvalente dans divers scénarios tels que les enquêtes inter-domaines, la télédétection, ou les opérations de sauvetage en cas de catastrophe. Néanmoins, les différences significatives entre les environnements aérien et aquatique posent des défis de conception pour ces véhicules. Tout d'abord, la conception du système de propulsion dépend étroitement de la densité et de la viscosité du fluide, car ces paramètres influent sur la vitesse de sortie et le couple. Deuxièmement, la densité plus élevée et la viscosité de l'eau entraînent une flottabilité accrue et une résistance importante au mouvement du véhicule, ce qui nécessite une approche de mise en œuvre différente.

Le principal objectif dans les airs est de surmonter la gravité, tandis que dans l'eau, il s'agit principalement d'atteindre une flottabilité neutre tout en résistant au mouvement du fluide. Au cours des dernières années, de nombreux prototypes fonctionnels ont été développés, y compris des avions à voilure fixe, des drones multirotors et des conceptions inspirées de la nature. Bien qu'il existe des systèmes optimisés pour chacun de ces différents environnements, la plupart des prototypes multirotors ne sont que des adaptations de constructions aériennes standard, offrant une résistance à l'eau partielle et ne possédant pas le même niveau de mobilité sur l'eau que dans l'air. L'objectif principal de ce travail est de faciliter la conception d'un système hybride air-eau grâce à des modifications structurelles. Pour cela, un mécanisme d'inclinaison indépendant des bras du drone a été pensé pour permettre une adaptation plus efficace aux différents environnements.

Dans le cadre du développement d'un tel système, il est important de mettre en lumière l'importance croissante de la collaboration entre les domaines aérien et aquatique dans le domaine des systèmes sans pilote. Cette convergence répond à la nécessité de relever les défis posés par la communication restreinte entre ces deux milieux distincts. Les véhicules aériens-aquatiques offrent ainsi une solution polyvalente, capable de naviguer dans les deux environnements, favorisant ainsi l'intégration et le partage d'informations.

Cependant, cette polyvalence engendre des défis de conception uniques. Par exemple, la densité et la viscosité du fluide ont un impact direct sur le système de propulsion, tandis que les différences significatives entre les environnements aérien et aquatique nécessitent une approche spécifique pour assurer la mobilité et la stabilité du véhicule.

Dans ce contexte, le concept de bras pliables émerge comme une solution innovante pour permettre au drone de s'adapter efficacement à ces environnements variés. En permettant un déploiement et un repliement rapides et précis, les bras pliables facilitent la transition du drone entre l'air et l'eau, améliorant ainsi sa polyvalence et sa fonctionnalité dans des scénarios divers tels que les opérations de secours, militaires et de recherche.

Ce rapport se propose d'explorer en détail les aspects mécaniques, électroniques, logiciels et de résistance à l'eau liés au développement de ce drone hybride à bras pliable, afin de fournir une compréhension approfondie de sa conception et de ses performances dans différents environnements opérationnels.

# III - Cahier des charges

## A- QQQQCP

Afin de cerner au mieux le projet à réaliser, utiliser la méthode QQQQCP (abréviation des questions suivantes : Qui ? Quoi ? Comment ? Où ? Quand ? Pourquoi ?) était une étape nécessaire pour plusieurs raisons : organiser la réflexion, clarifier les objectifs, analyser la situation de manière approfondie et communiquer de manière efficace. Cela permet d'identifier les grandes lignes du projet, tel que le sujet, le client, le lieu, les délais, la méthode et les objectifs, et permet aussi de définir le cadre pour s'assurer de la bonne compréhension du sujet.

<i>Qui</i>	Quelles sont les personnes visées par ce projet ? Qui est le responsable du projet ?	Certains professionnels (secouriste, militaire, météorologue,...) Les responsable du projet sont Titouan VERDU et Enrique FAGUNDES GASPAROTO
<i>Quoi</i>	Quelles vont être les réalisations ? Que faut-il faire ?	Développement d'un système mécatronique permettant la rotation des bras d'un drone Développement d'un système d'encapsulation étanche pour le drone Développement informatique pour le pliage des bras
<i>Où</i>	Où ce projet se déroule-t-il ?	Ce projet se déroule à l'Institut Supérieur de l'Electronique et du Numérique (ISEN) de Brest
<i>Quand</i>	Quelles sont les dates importantes de ce projet, et sur combien de temps est-il mené ?	9 semaines sont consacrées au projet Forum et démonstration : semaine 16 Soutenance : Vendredi 19 avril 2024
<i>Comment</i>	Quels outils sont utilisés ?	Logiciel : Fusion 360, Arduino IDE
<i>Pourquoi</i>	Pourquoi et dans quel but ce projet a-t-il lieu ?	La finalité de ce projet est de créer un système autonome permettant de faire la liaison entre un environnement marin et aérien.

Figure 1 : Tableau présentant la méthode "QQQQCP"

## B- Bête à cornes

Afin d'identifier et de formaliser les objectifs du projet, la réalisation d'un diagramme bête à cornes est essentielle. Cela va permettre de fixer la direction du travail à entreprendre, et permet de comprendre les besoins que ce projet justifie. Ce schéma se développe autour de trois questions primordiales : à qui ce projet rend-il service ? Sur qui/quoi agit-il ? Et dans quel but/objectif ?

Ici, le projet de développement d'un drone hybride air-eau à bras pliable est voué à être destiné à certains professionnels. En effet, ce système complexe est voué à être utilisé dans des cas très précis et particuliers, en agissant avec son environnement en récoltant des informations, ou en participant à des opérations de sauvetage.

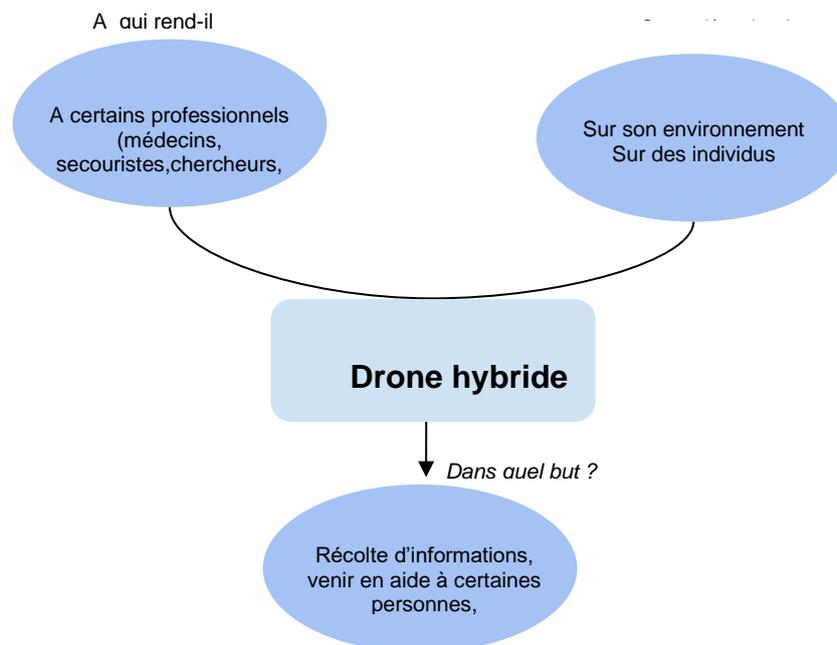


Figure 2 : Diagramme bête à cornes

## C - Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est une approche largement utilisée en gestion de projet pour définir les différentes tâches que le produit doit accomplir. Ces tâches sont regroupées en plusieurs catégories :

- Fonctions principales : Ce sont les tâches essentielles du projet, nécessaires pour satisfaire les besoins du client.
- Fonctions secondaires : Elles viennent compléter les fonctions principales en améliorant la qualité, l'efficacité ou l'expérience utilisateur du produit. Bien qu'elles ne soient pas indispensables, elles contribuent à son succès.
- Fonctions de contraintes : Elles définissent les limites imposées par le projet, telles que les contraintes budgétaires, techniques ou légales.
- Fonctions d'estime : Ces aspects ne sont pas directement liés aux fonctionnalités du produit, mais ils peuvent néanmoins influencer sa valeur. Ce sont des détails qui peuvent améliorer la valeur du produit en améliorant sa précision, sa rapidité ou encore son esthétisme.

Dans le cadre de ce projet, l'analyse fonctionnelle du produit final peut se présenter comme suit :

### *Fonctions principales :*

> Vol aérien autonome : Le drone doit être capable de voler de manière autonome, en utilisant des capteurs et des algorithmes pour éviter les obstacles et suivre des trajectoires prédéfinies.

> Vol aquatique autonome : Il doit également être en mesure de se déplacer de manière autonome sur l'eau, en utilisant des capteurs adaptés à l'environnement aquatique.

> Bras pliables : Les bras du drone doivent pouvoir se plier grâce à un système mécatronique pour faciliter l'atterrissage sur l'eau et assurer une étanchéité adéquate.

> Étanchéité : Assurer une étanchéité suffisante pour que le drone puisse opérer sur l'eau sans compromettre ses composants internes.

> Capteurs : Intégrer différents capteurs, tels que des caméras, des capteurs de pression, des capteurs de température et des capteurs de proximité, pour permettre au drone de collecter des données pertinentes lors de ses missions.

### *Fonctions secondaires :*

> Robustesse : Le drone doit être conçu pour résister aux conditions environnementales difficiles rencontrées en mer ou dans d'autres environnements hostiles.

> Maniabilité : Assurer une maniabilité optimale tant dans les airs que sur l'eau pour permettre des déplacements précis et efficaces lors des missions.

> Facilité d'utilisation : Concevoir une interface utilisateur intuitive pour permettre une utilisation aisée du drone, même dans des situations stressantes ou d'urgence.

> Durabilité : Utiliser des matériaux et des composants durables pour garantir une longue durée de vie opérationnelle du drone.

### *Fonctions de contraintes :*

> Normes de sécurité : Respecter les normes de sécurité applicables aux drones utilisés dans des contextes professionnels, notamment en ce qui concerne la protection des données et la sécurité des opérations.

> Contraintes budgétaires : Concevoir le mécanisme de pliage des bras du drone en tenant compte des contraintes budgétaires du projet.

> Contraintes de poids et de taille : Optimiser le poids et la taille du drone pour garantir sa portabilité et sa facilité de déploiement sur le terrain.

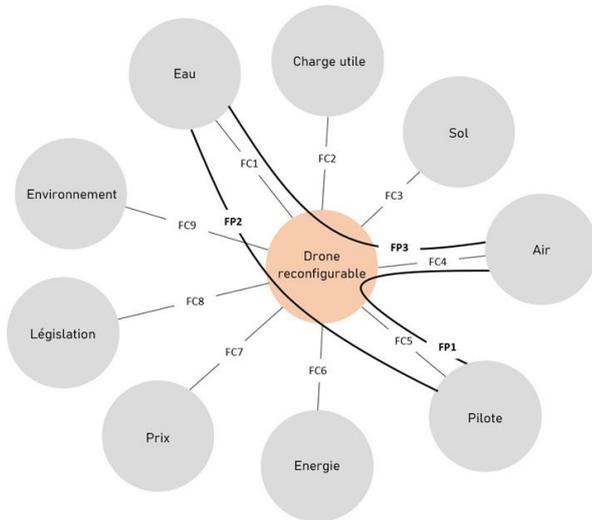
### *Fonctions d'estime :*

> Esthétique : Concevoir le drone de manière à ce qu'il soit attrayant visuellement tout en restant fonctionnel et efficace.

> Performances : Maximiser les performances du drone en termes de vitesse, d'autonomie de vol et de capacités de collecte de données pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs professionnels.

## D - Diagramme pieuvre

Un autre diagramme intéressant à prendre en compte est le diagramme pieuvre, en effet, c'est un outil polyvalent permettant d'analyser, comparer et visualiser plusieurs aspects ou variables d'une situation, ce qui peut aider à prendre des décisions éclairées et à élaborer des stratégies efficaces. Dans le cadre de ce projet, le diagramme se présente sous la forme suivante :



Fonction	Intitulé
FP1	Le pilote doit pouvoir faire voler le drone à distance
FP2	Le pilote doit pouvoir faire naviguer le drone à distance
FP3	Le drone doit pouvoir transiter entre navigation et vol de manière autonome
FC1	Le drone doit pouvoir flotter
FC2	Le drone doit pouvoir embarquer une charge utile
FC3	Le drone doit pouvoir s'adapter à la surface pour décoller et atterrir
FC4	Le vol doit être stable
FC5	Le pilotage doit pouvoir être autonome et radiocommandé
FC6	Le drone doit embarquer sa propre source d'énergie
FC7	Le prix du drone doit respecter le budget alloué
FC8	Respecter les réglementations en vigueur pour le vol et les réseaux hertziens
FC9	Le drone doit résister au vent en mer

Figure 3 : Diagramme pieuvre du projet

# IV - Gestion de projet

## A - Organigramme des tâches

L'organigramme des tâches est un outil important lors de la définition d'un projet, car il permet de visualiser les étapes principales de ce dernier afin d'avoir une ligne directrice sur laquelle s'appuyer.

Dans le cadre de ce projet, l'organigramme obtenu est celui présenté en figure 4 et est décomposé en plusieurs phases (gestion de projet, développement technique, puis présentation). Chacune de ces étapes est ensuite décomposée, afin de clarifier les démarches à suivre. Cet outil permet donc d'avoir rapidement un aperçu global sur le déroulement du projet et sa structure.

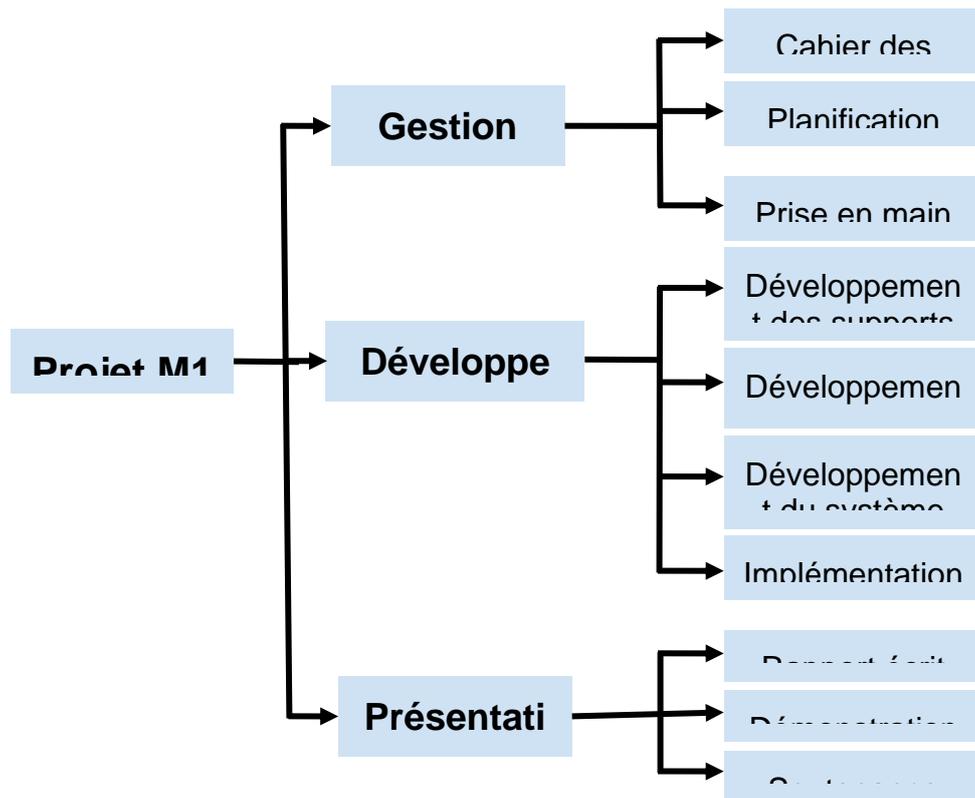


Figure 4 : Organigramme des tâches

## B - Diagramme de Gantt initiale

Dans cette partie, un diagramme de Gantt prévisionnel à été réalisé en début de projet. Sa présence est indispensable dans le développement de n'importe quel projet, il permet de planifier et d'assigner à chacun des membres les différentes étapes (ainsi que les tâches et sous-tâches) de ce dernier, tout en affectant une temporalité à chacune d'entre elles. Cela permet de rester organisé, d'éviter de prendre du retard, et de garder un œil sur les échéances à venir. Il y figure en effet les différentes réunions, les étapes de gestion de projet, les cours de domaine professionnel, ainsi que les vacances. Chacun des points présents dans ce diagramme à été sujet à réflexion pour estimer le temps essentiel à sa réalisation ainsi que la nécessité ou non d'un travail en binôme ou non.

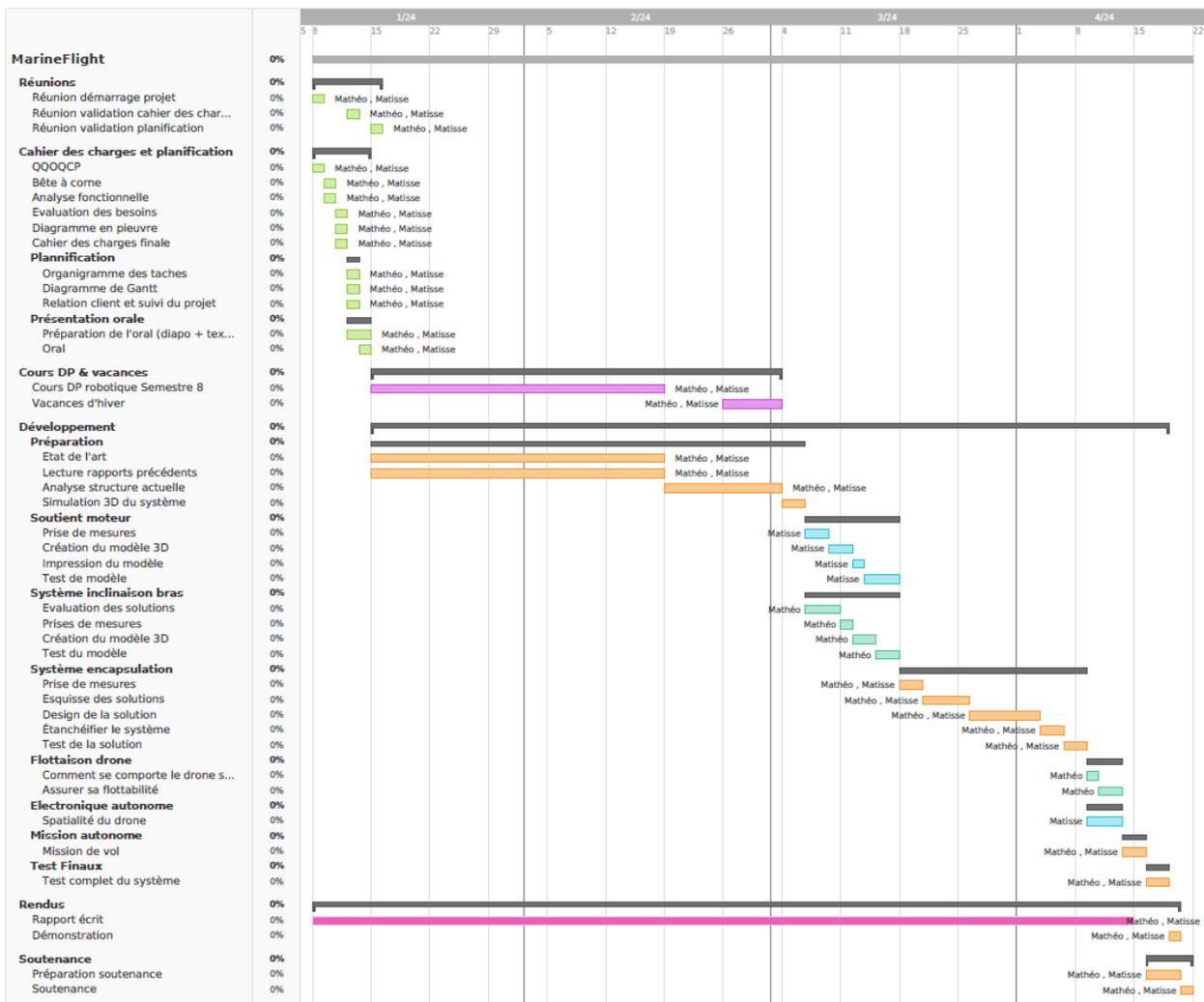


Figure 5 : Diagramme de Gantt de début de projet

## C - Diagramme de Gantt fin de projet

Bien que devant être respecté le plus fidèlement possible dans la théorie, le diagramme précédemment présenté a été amené à évoluer tout au long du projet dû à différents événements survenus durant celui-ci. Ces événements ont principalement été causés par une mauvaise estimation du temps nécessaire à la réalisation de certaines parties, mais aussi par la découverte de nouvelles étapes à réaliser impérativement pour le bon déroulé du projet.

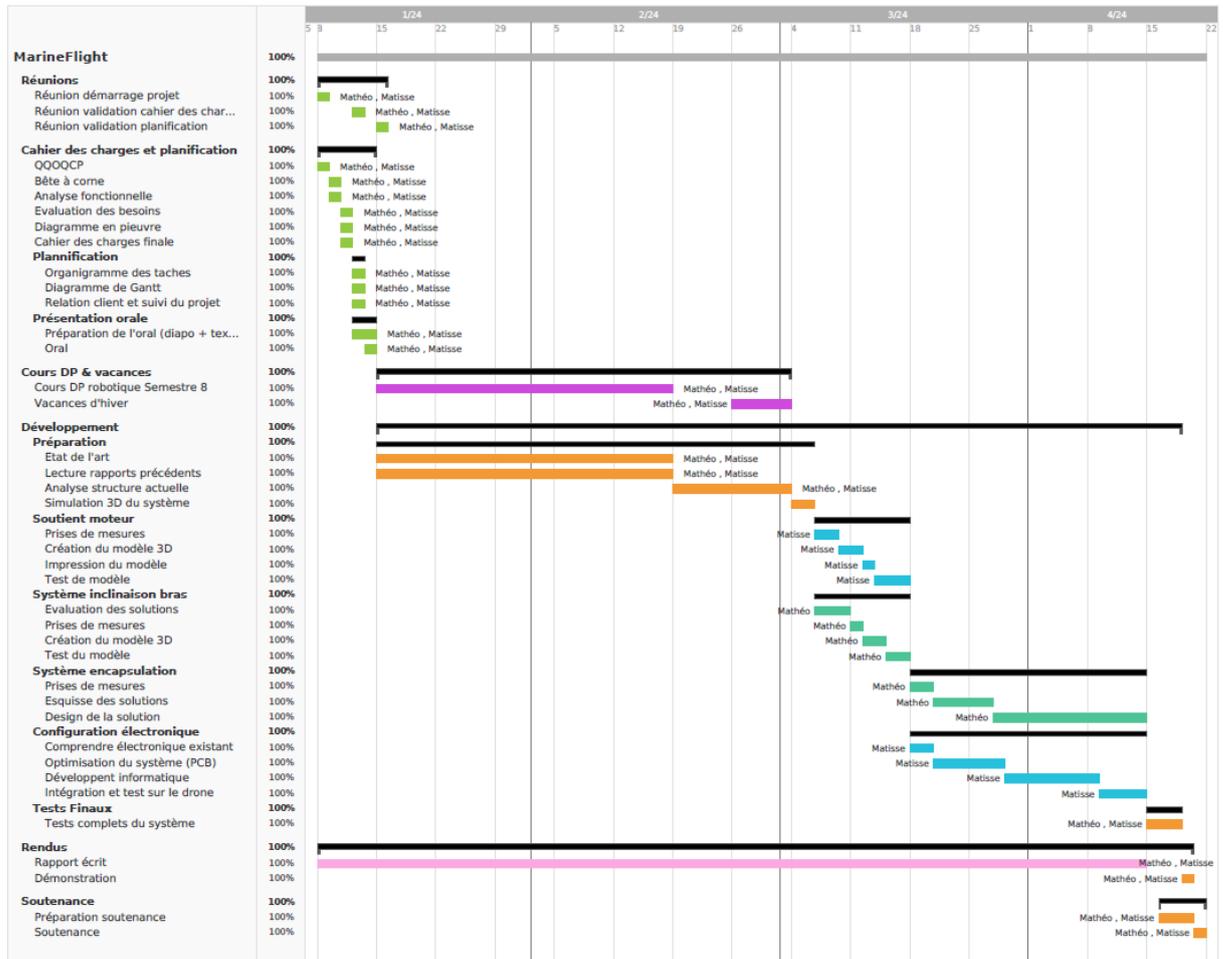


Figure 6 : Diagramme de Gantt de fin de projet

## V - Etat de l'art

L'état de l'art, ou State of the Art en anglais, correspond à un état des lieux des connaissances dans un domaine précis. Il s'agit donc ici de regrouper ici les différentes solutions apportées à la réalisation d'un drone hybride air-eau. La recherche liée à cette rubrique s'est principalement orientée autour des drones quadricoptères, qui sont des aéronefs propulsés à l'aide de quatre moteurs associés à un jeu de quatre hélices (à la manière du drone présent pour le projet).

L'un des projets les plus complets à ce jour est le "Mirs-x". Développé par une équipe de l'Université chinoise de Hong Kong, qui au cours de l'année 2023 a présenté son prototype de drone capable de voler, mais aussi de plonger dans l'eau pour fonctionner comme un sous-marin.

Ce drone possède des dimensions similaires au MARINEFLIGHT puisque sa structure de base est la même, et répond à des problématiques similaires, puisqu'il peut planer pendant six minutes ou plonger sous l'eau pendant environ 40 minutes. Le Mirs-X serait également étanche jusqu'à trois mètres de profondeur et serait capable de se déplacer jusqu'à deux mètres par seconde dans l'eau. Sa capacité à pouvoir se déplacer dans les 3 dimensions dans l'eau est donc l'une des différences majeures qui le sépare du MARINEFLIGHT.

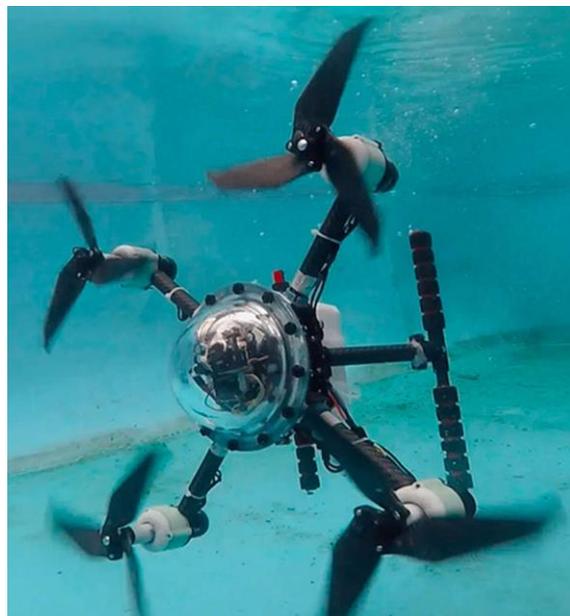


Figure 7 : Mirs-X



Figure 8 : Diodon HP30

Un autre projet existe, nommé "Diodon HP30", développé par la société Diodon Drone Technology. Ce drone de plus petite taille cette fois-ci est lui aussi étanche à 100%, lui permettant d'atterrir ou de décoller à la surface de l'eau en toute sécurité. Contrairement au "Mirs-x" qui possède une coque rigide, le "Diodon HP30" est doté d'un système de bras gonflable, lui procurant un encombrement et un poids minimum. Ce sont ces caractéristiques qui ont attiré l'armée française pour faire de la reconnaissance en mer.

# VI - Développement technique

## A. Jonction bras pliable - moteur

Cette section se concentre exclusivement sur l'aspect mécanique du projet, visant à permettre aux bras du système de se déplacer autour de leur axe pour adopter différents états. Ces états sont cruciaux pour assurer le comportement hybride du drone, aussi bien en vol qu'en immersion dans l'eau. Il est essentiel de noter que ces états ne se limitent pas à une simple frontière entre l'air et l'eau, mais englobent une gamme variée de positions, permettant ainsi la réalisation de tests et d'actions spécifiques dans chaque environnement.

Il est crucial que ce projet adopte une approche modulaire et prospective dans cette phase. En effet, l'équipe chargée du développement mécanique ne sera probablement pas la même que celle chargée des tests en conditions réelles. Par conséquent, le projet doit offrir une flexibilité maximale, pour permettre aux futures équipes de travailler avec le plus de libertés possibles.

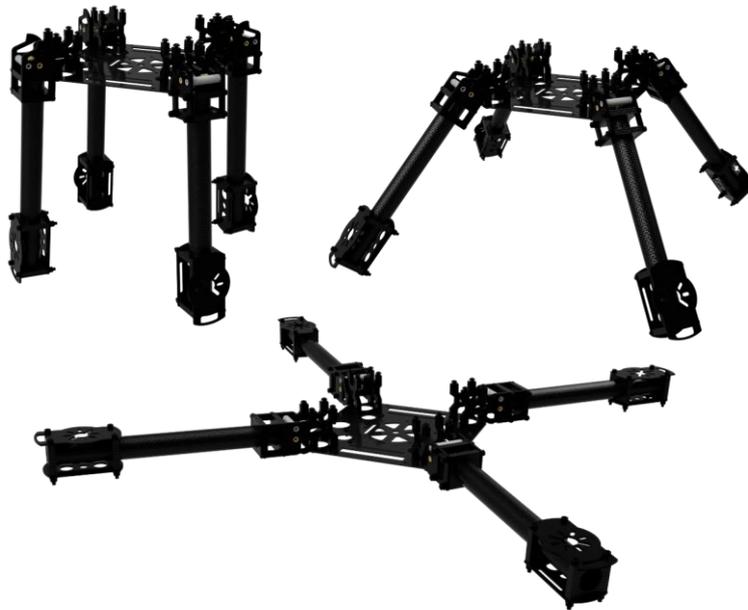


Figure 9 : Schéma des états possibles du drone

### 1) Problématique

Étant donné que le projet avait été préalablement développé par une équipe distincte l'année dernière, certaines solutions adoptées et intégrées au projet semblaient moins optimales. Plus précisément, la solution initiale pour cette partie reposait sur un système de deux engrenages : l'un pour le moteur et l'autre pour le bras pliable, comme présenté sur la figure 10 suivante.



Figure 10 : photo du système initiale jonction bras pliable

Cette solution s'est avérée inadéquate, car la friction entre les crans n'était pas suffisante, ce qui entraînait leur glissement respectif et compromettrait l'effet recherché. De plus, une fois arrêté, le bras ne maintenait pas sa position de manière stable en raison des jeux entre les crans, ce qui rendait l'objectif incomplet. Par conséquent, une révision de cette partie du projet était nécessaire, avec plusieurs solutions possibles à considérer.

## 2) Solutions

Plusieurs options ont été envisagées pour résoudre cette problématique. Tout d'abord, la solution la plus évidente consistait à remplacer les engrenages existants par des équivalents dotés d'une friction plus élevée et de crans plus serrés, dans le but d'améliorer les performances et la stabilité du bras. C'est en effet le cas des engrenages présentés en figure 11 qui possèdent une surface de contact plus importante, ce qui permet d'augmenter la friction et la précision entre les deux parties du système.



Figure 11 : Ébauche de solutions à engrenage jonction bras pliable

Bien que ces solutions semblent viables, elles présentent un risque de reproduction des problèmes antérieurs, principalement dus à des imperfections dans l'impression 3D, entraînant des tolérances trop serrées et une faible précision pour la friction.

Après plusieurs recherches, il est apparu qu'un changement de système serait plus approprié. Deux solutions alternatives ont alors été envisagées.



Figure 12 : Schmidt coupling et jointure cardan

La solution “Schmidt coupling” fut rapidement écartée du fait de sa complexité, de son poids et de son prix. La jointure cardan apparaissait comme la solution presque idéale à cette problématique. Peu coûteuse, simple d’utilisation, adaptable et facilement remplaçable, cette solution a été sérieusement envisagée dans le but d’une intégration. Cependant, après une analyse plus poussée, son poids restait assez important faisant réfléchir au fait que le projet pouvait être doté d’une solution plus simple. En effet, en bougeant alors la position du moteur la solution apparut alors évidente, celle d’effectuer une jonction en direct sans couplage complexe, coûteux et lourd.

Cette solution est concevable sur le logiciel de [CAO](#) et imprimable en [3D](#) au sein de l’établissement. Cela permettait de réduire le temps d’obtention des pièces, obtenir un résultat parfaitement adapté au problème, réduire les coûts et alléger le système. Cette solution fut alors retenue et modélisée en 3D.

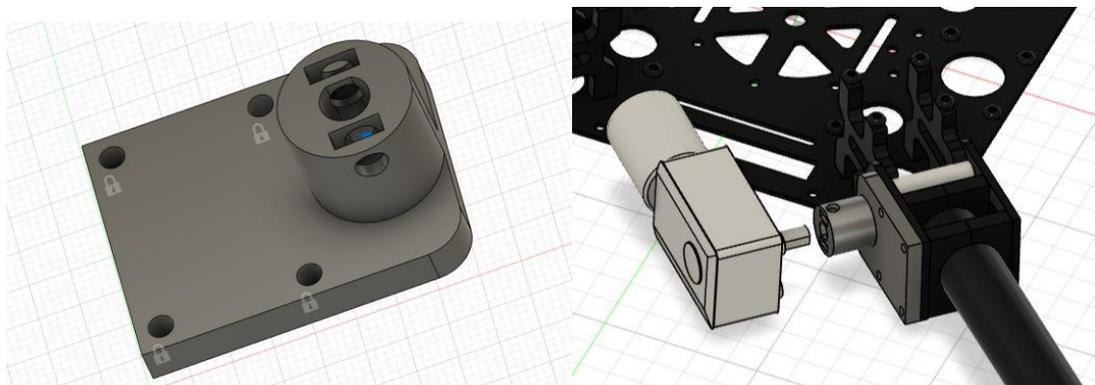


Figure 13 : Jonction directe modélisé et représentation globale

La solution apparaît adéquate, mais possède certaines contraintes. Si elle veut être viable, il lui faudra refaire un nouveau support moteur, car sa position a changé. Il est important de préciser également que les forces exercées seront alors plus concentrées pouvant entraîner un risque de rupture.

### 3) Etudes statiques

Une fois la solution du projet établie, un test de résistance est réalisé pour évaluer son efficacité. Plusieurs paramètres doivent alors être pris en compte :

- Les points d’ancrage fixes sont situés aux emplacements des trous des vis sur la partie arrière de la pièce.
- Les forces sont appliquées au niveau du trou pour l’arbre moteur.
- Les différentes forces peuvent être combinées et résumées en un seul moment.
- Les forces de frottement, lors du mouvement du bras, doivent également être prises en compte.
- Le poids du drone, lorsqu’il est en vol doit être pris en considération dans l’analyse.

Calcul de la force de frottement  $F_x$  :

$$F_x = \frac{1}{2} * \rho * S * C_x * V^2$$

$\rho$  : densité du fluide

$S$  : surface de l'objet sur laquelle s'applique la force

$C_x$  : coefficient de trainé

$V$  : la vitesse de l'objet

$$\rho_{air} = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$S = (\text{largeur} * \text{longueur})_{hélice} + (\text{largeur} * \text{longueur})_{bras}$$

$$S = (34.7 * 360 + 20 * 180) \text{ mm}^2$$

$$S = 16092 \text{ mm}^2 = 0.016092 \text{ m}^2$$

$$C_x = 0.5$$

On admet que l'objet possède une surface uniformément circulaire, voir annexe 1.

Vitesse du moteur bras pliable : 13 RPM

$$V = \frac{(2 * \pi * R * 13)}{60} \text{ m.s}^{-1}$$

$$V = \frac{2 * \pi * 0.18 * 13}{60}$$

$$V = 0.245 \text{ m.s}^{-1}$$

$$F_{air} = \frac{1}{2} * 1.225 * 0.016092 * 0.5 * 0.245$$

$$F_{air} = 1.2 * 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{eau} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.016092 * 0.5 * 0.245$$

$$F_{eau} = 1 \text{ N}$$

Les frottements avec l'air sont négligés, car insignifiants au vu de la vitesse du bras dans l'air est très faible comparé aux frottements avec l'eau. La statique de la solution peut alors être représentée par la figure 14 suivante :

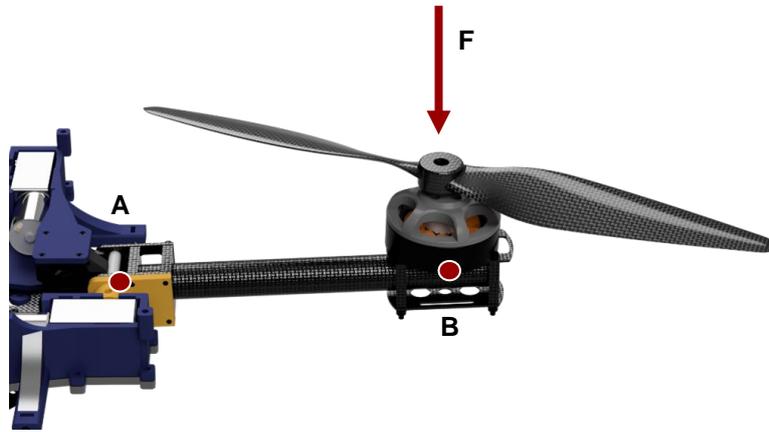


Figure 14 : Schéma de l'étude statique du bras pliable

Il faut également prendre en compte le poids du drone en vol qui peut atteindre une charge maximum de 2.5 kg. Ce poids est réparti sur les 4 moteurs sur un bras de levier de 180 mm. Il en résulte alors un moment en A :

$$M = (F_p + poids * ct_{e_{pesanteur}}) * distance$$

$$M = (1 + 2.5/4 * 9.8) * 0.18$$

$$M = 1.2825 N.m$$

Le moment ainsi obtenu est de 1282.5 N.mm, applicable sur chacune des pièces "jonction bras pliable".

#### 4) Test et évolution

Afin de pouvoir déterminer si la solution peut être intégrable de manière durable au projet. Des tests ont été réalisés sur Fusion 360, le matériau choisi sur le logiciel est le plastique [ABS](#) qui a les mêmes propriétés que le plastique [PLA](#) étant le matériau d'impression.

- Cas de pièce en plastique ABS:

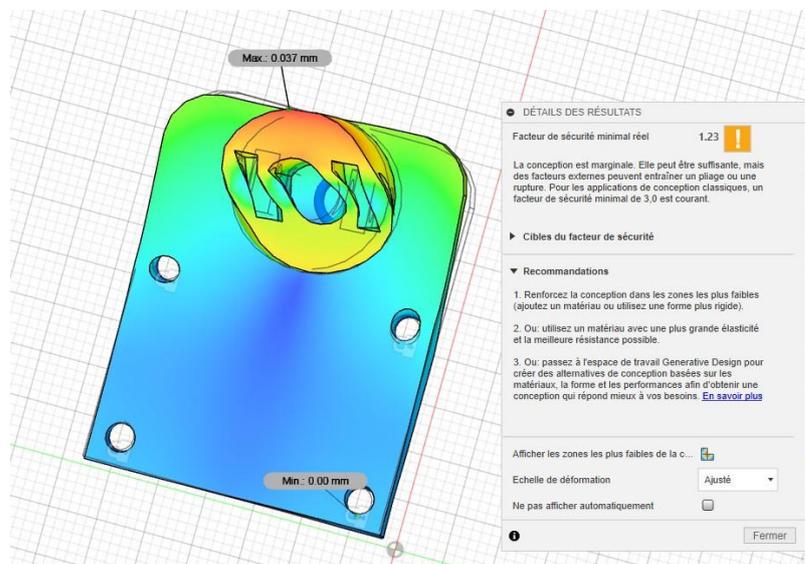


Figure 15 : Etudes statique de la pièce 1ère version

Le coefficient de sécurité ainsi obtenu est de 1.23, ce qui peut sembler faible face à des événements de force inattendus. La pièce est alors revue et élargie, notamment au niveau du cylindre englobant l'arbre moteur pour obtenir une meilleure résistance.

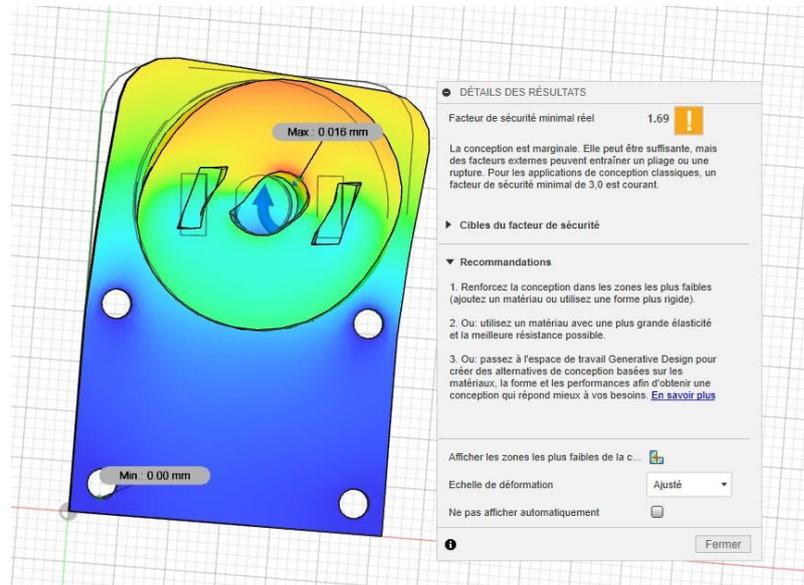


Figure 16- : Etudes statique de la pièce 2e version

Après réalisation d'un nouveau test, le facteur de sécurité est de 1.69 ce qui semble plus correct. Une fois imprimés, des tests sur le projet ont été réalisés, et des modifications ont été envisagées afin de s'adapter à certaines contraintes pratiques. Notamment au niveau des trous pour les vis et écrous qui étaient trop serrés et ne laissaient pas passer convenablement les pièces telles qu'il était prévu.

Sur la nouvelle pièce modélisée, le facteur de sécurité est de 1.33, ce qui est assez faible. Malgré ceci, le projet est pourvu de cette solution et dans le cas où elle ne serait pas assez résistante il suffirait de changer sa matière afin d'obtenir de meilleur résultat.

## B. Soutien moteur

L'intérêt de cette partie est de pouvoir créer une pièce s'adaptant à la nouvelle position du moteur pour faire bouger les bras du drone. La position du moteur étant maintenant plus proche du bras et sortant plus fortement du drone, il est nécessaire de modéliser une nouvelle pièce capable de répondre à toutes ces nouvelles contraintes. Cette pièce devra nécessairement être plus solide que la pièce "jonction bras pliable" puisque les forces appliquées seront au moins les mêmes. Elle devra aussi posséder une capacité modulable afin d'être facilement démontable et changeable pour les travaux à venir sur ce projet. De plus, le nouveau soutien moteur doit posséder une capacité englobante avec des accroches afin de préparer la fixation de la future coque autour du projet le rendant imperméable et aéro/hydrodynamiques.

## 1) Problématique

La pièce réalisée par le groupe précédent (présenté en figure 17), bien qu'inutilisable, du à la nouvelle position du moteur, sert de repère et de "pseudo test" sur la conception de la nouvelle solution. Ceci permettait déjà d'avancer certains points techniques et certaines contraintes sur celle-ci. En effet, la pièce possédait une déformation trop importante lors de l'utilisation du moteur. Cela entraînerait un dysfonctionnement au niveau de la jonction du bras pliable. Il apparut que le problème venait du nombre de plans sur lequel le support moteur se reposait (un seul plan de fixation). Ensuite, l'épaisseur de la pièce était trop faible facilitant sa déformation. De plus, elle ne possédait aucune accroche viable pour la coque et ne maintenait pas assez le moteur en place.

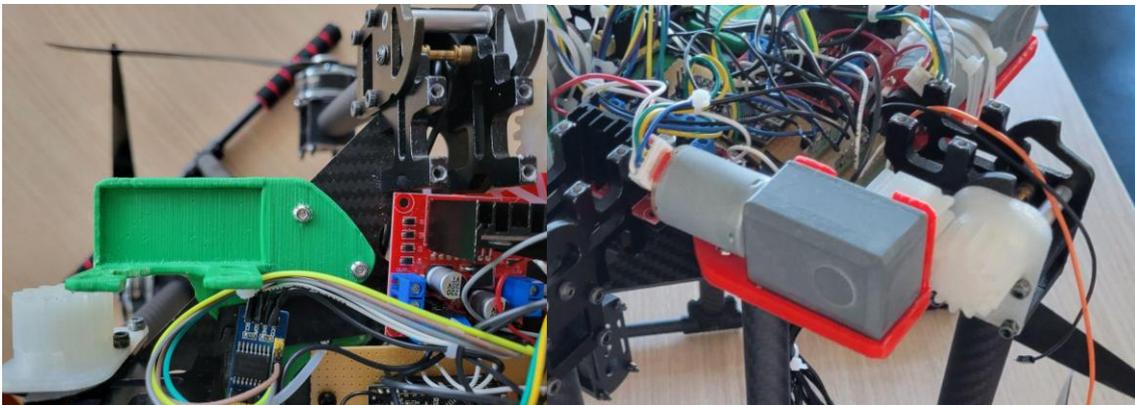


Figure 17 : Photos de la solution initiale du soutien moteur

Les points à travailler sur la nouvelle pièce sont donc les suivants :

- Adaptation à la nouvelle position du moteur pour les points d'accroche sur le squelette du drone
- Augmenter le nombre de plans d'accrochage
- Augmenter l'épaisseur de la pièce
- Rendre la pièce englobante pour le moteur
- Ajouter des accroches pour la future coque

## 2) Solutions

La démarche de la solution fut réalisée sur le logiciel de CAO, Fusion 360.

Chacune des contraintes physiques était virtuellement matérialisée sur celui-ci. Il fallut alors concevoir la pièce en respectant celle-ci. La démarche fut simple à réaliser puisque la pièce devait maximiser le nombre d'accroches et les plans sur lesquels ils reposent, tout en faisant attention à ne pas empiéter sur d'autres pièces. Le moteur était également modélisé sur le logiciel, ainsi que son support. Les accroches pour la coque du drone furent brièvement positionnées et ajustables par la suite du projet.

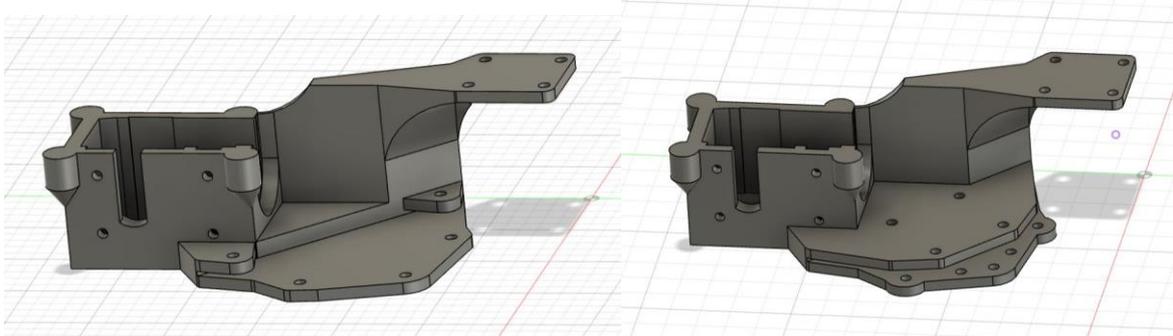


Figure 18 : Solution soutien moteur modélisé

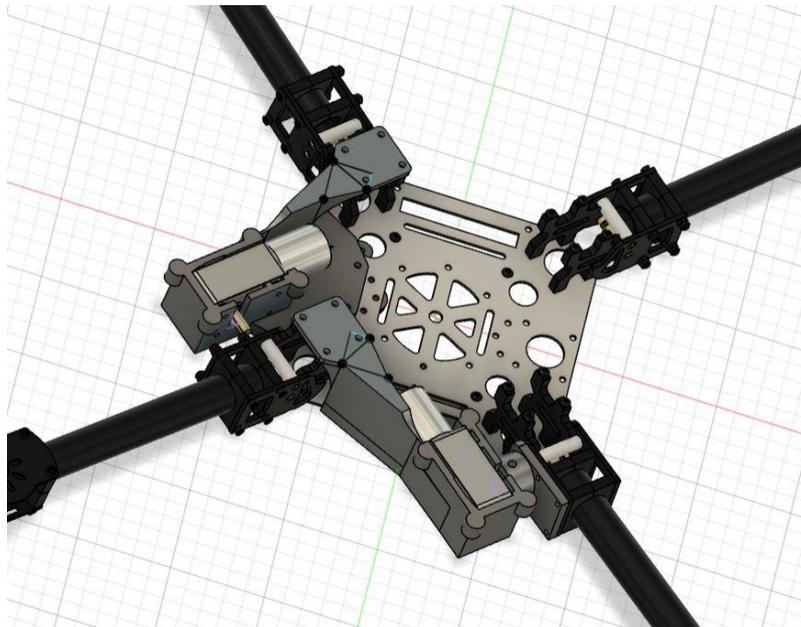


Figure 19 : Vue globale de la solution soutien moteur sur le drone

La pièce fut réalisée de 2 façons différentes afin de prendre en compte les différentes contraintes en fonction de leur position dans le projet.

La pièce ainsi réalisée possède 3 différents plans d'accroche, sous et sur la plaque inférieure du drone ainsi que sur les supports bras de base du drone. L'épaisseur a été revue, passant de 3 mm à 5 mm. Les points d'accroche sont passés au nombre 11 pour la 1ère version et 14 pour la deuxième, auparavant, il n'y en avait seulement 3. Cela permet de réduire nettement la capacité de déformation de la pièce quand cette dernière est soumise à une contrainte. De plus, la pièce permet de maintenir solidement le moteur en place, réduisant significativement sa capacité à bouger à l'intérieur de la pièce. En contrepartie, la pièce est nettement plus complexe, son temps d'impression et son poids ont fortement augmenté.

### 3) Etudes statiques

D'après la documentation du moteur, son poids est de 150g, soit une force de 0.0015N. Le moteur reçoit un moment dû à sa liaison avec le bras pliable. En réalité, ce moment est le même

que précédemment calculé pour la pièce "jonction bras pliable" étant de 1282.5 N/mm. Cette force et ce moment, s'exercent sur les points d'accroche du moteur de la pièce.

#### 4) Tests et évolution

Un test de résistance est réalisé sur la pièce afin de savoir si la solution est intégrable de manière durable au projet. Le test est réalisé sur Fusion 360 sur la partie simulation, le matériau choisi sur le logiciel est le plastique ABS qui a les mêmes propriétés que le plastique PLA qui sera le matériau d'impression. La figure 20 suivante présente les résultats de ces tests :

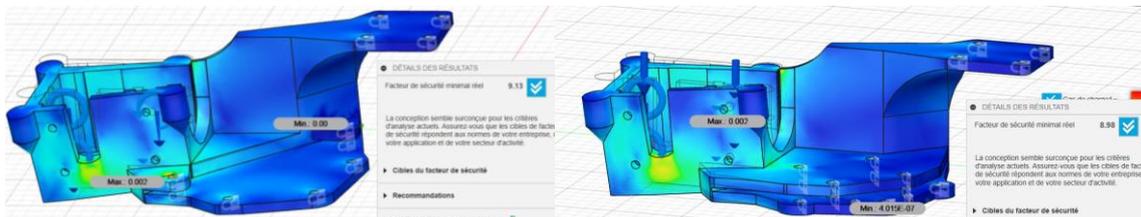


Figure 20 : Tests de résistances sur la solution soutien moteur

Le facteur de sécurité ainsi obtenu est d'environ 9 dans les 2 cas, ce qui semble convenable à l'usage du projet.

Après réflexion plus approfondie sur les accroches de ces pièces avec la coque et les contraintes liées à l'impression, la pièce a subi une évolution. En effet, les accroches se feront en 2 points précis de la pièce sur des plans différents. La pièce a été scindée en 2 afin de faciliter son impression, de ce fait, des accroches joignant ces 2 parties sont alors ajoutées.

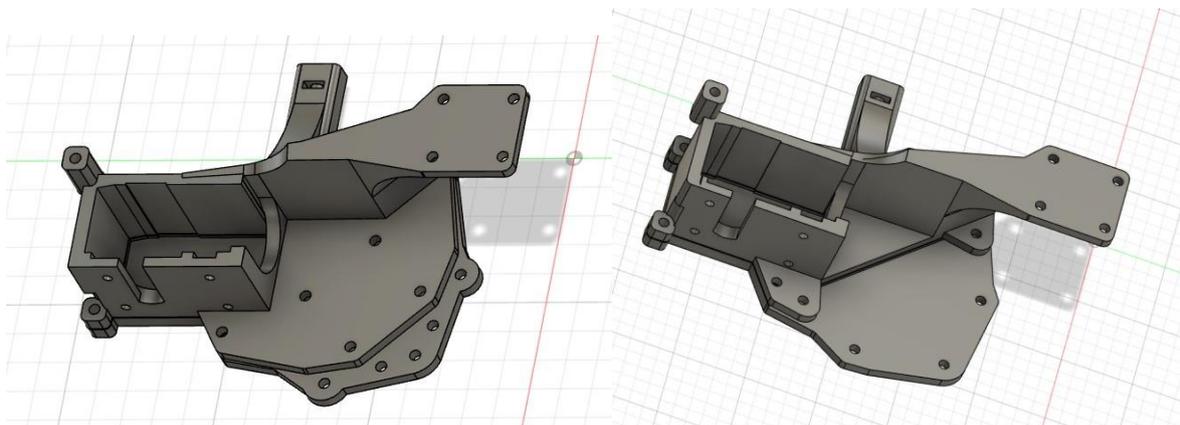


Figure 21 : Modélisation de l'évolution de la solution soutien moteur

Après avoir effectué de nouveaux tests de résistance sur cette nouvelle version, le coefficient de sécurité est passé à 15, ce qui semble largement convenir à notre usage. La déformation de cette pièce causée par les forces est minimale et résout bien le problème initial de déplacement des moteurs lors de leur utilisation.

Après impression du modèle, la réalisation de tests pratiques est effectuée et il apparaît que le moteur possède une fiche femelle pour son branchement à l'encodeur. Cette dernière est compliquée d'accès une fois le moteur mis en place et branché. La pièce est de ce fait modifiée pareillement à la figure 22, ceci permet d'augmenter la résilience du projet en facilitant la résolution de futurs problèmes. En effet, au lieu de dévisser tout le moteur du support, il suffira de le débrancher via cette modification.

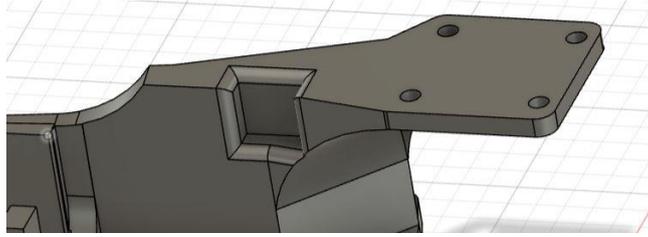


Figure 22 : Vue rapprochée de la partie évoluée du soutien moteur

Ainsi, une fois ces derniers ajustements faits, et une fois l'impression des différentes pièces, la structure obtenue est alors celle présentée en figure 23.



Figure 23 : Structure du drone assemblée, avec les supports moteur

## C. Coque

Cette partie est une création unique de cette année faite par le groupe 2024. Il est donc important de noter que c'est une ébauche expérimentale qui ne verra peut-être aucunement de fin concrète. Le premier besoin de cette partie est de fournir au projet une protection à l'eau. Le drone pouvant aussi bien se mouvoir dans l'air que sur l'eau, il est impératif de faire de ce projet un véhicule résistant à ces 2 éléments. La coque devra être résistante en cas de chute pour éviter tout désagrément associé. Pour finir, il va de soi qu'elle devra être facilement démontable et modulable pour la suite du projet afin d'aider au mieux les futurs groupes.

### 1) Problématique

Plusieurs considérations doivent être prises en compte dans cette partie du projet. Tout d'abord, il est essentiel de décider du matériau à utiliser pour la coque. Bien qu'une conception sur logiciel puisse sembler appropriée compte tenu des contraintes de position, il est important de noter que les matériaux utilisés par les imprimantes 3D ne sont pas totalement étanches. Par conséquent,

il est nécessaire de trouver une solution à ce premier problème. Deuxièmement, le fait que les bras du drone soient pliables pose un réel défi en termes d'encapsulation, qui ne doit pas limiter le champ d'action des bras. Troisièmement, il est crucial de veiller à ce que la coque ne soit pas trop lourde, afin de ne pas dépasser la limite de poids de 2,5 kg. De plus, il est nécessaire que la conception soit aéro/hydrodynamique pour faciliter le déplacement du drone et augmenter son autonomie.

Enfin, il est recommandé d'intégrer un système de refroidissement pour les composants électroniques contenus dans la coque, afin d'éviter tout risque de surchauffe.

## 2) Solutions

Chaque problème a été énoncé et résolu de manière individuelle afin d'assurer au mieux la cohérence de la démarche et du projet.

- Problème d'étanchéité :

La coque est une pièce bien trop complexe pour ne pas être modélisée sur un logiciel de CAO. Il est donc admis qu'elle serait réalisée sur logiciel et imprimée en 3D. La matière plastique PLA n'est pas étanche, il faut donc trouver une solution à ceci. La première, la plus simple à concevoir, est tout simplement de changer la matière d'impression afin d'en choisir une répondant à ce critère. En réalité, le problème de non-étanchéité ne vient pas uniquement de la matière, mais aussi de son impression. En effet, il est possible que lors de son impression, notamment sur les coins d'une pièce, l'eau puisse s'infiltrer entre 2 couches malgré son aspect imperméable. Il est aussi nécessaire de préciser que la coque ne pourra pas être imprimée en une seule fois, de ce fait des jonctions entre ces différentes parties devront être présentes. Des réglages sur l'imprimante ainsi que la commande d'une nouvelle bobine seraient donc à prévoir pour la suite de cette partie. Une autre solution serait de poncer et d'ajouter une couche en résine sur la coque. Cette solution est longue et compliquée à mettre en place, et présente une augmentation significative du poids de la pièce.

Au sein de l'ISEN, un projet précédent fut réalisé afin de [thermoformer](#) des objets et ainsi les rendre étanches tout en associant précision et légèreté. Cette méthode semble convenir au projet, dans un usage expérimental, facile d'utilisation et peu chère. Enfin, il serait aussi possible d'ajouter un spray répulsif à l'eau dit "hydrophobe" pour assurer sa totale étanchéité. Le choix fut donc porté à associer différentes méthodes afin d'assurer au mieux son efficacité.

En résumé, la coque pourrait-être faite en PLA, avec un revêtement thermoformable étanche avec une couche de spray hydrophobe sur les zones sensibles.

- Problème des bras pliables :

Ici, apparaît un problème structurel. En effet, la structure de la coque doit pouvoir s'adapter à la rotation des bras. On sait que les bras ont comme degré de liberté un axe unique avec un degré de déplacement de 90. En réalité, il n'est pas nécessaire de plier les bras à plus de 70° du fait qu'en dessous cette position les hélices se touchent entre elles, ce qui est indésirable pour le projet. Il est donc important de concevoir une ouverture étanche capable d'incorporer cette condition. La démarche de cette solution fut évolutive via un système dit "entonnoir".

Le point crucial ici, concerne la gestion de l'étanchéité du système au niveau de l'axe de rotation du bras. Plusieurs évolutions et étapes de réflexions ont alors été abordées pour résoudre ce problème. La première, illustrée par la figure 24 suivante, consiste en une ouverture carrée laissant passer le bras du drone.

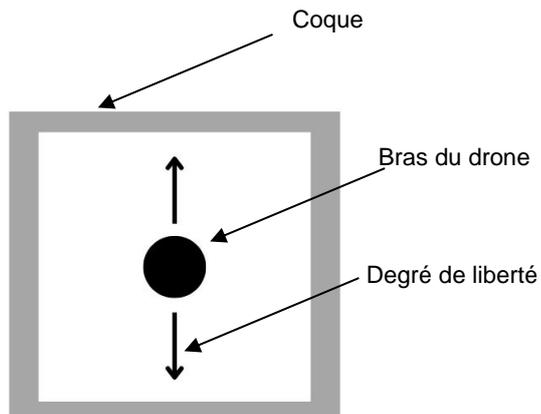


Figure 24 : Schéma ouverture 1ère version carrée

Ce système permet d'avoir une ouverture simple pour le bras. Le poids est d'autant allégé par le fait d'avoir retiré de la matière. Le problème d'étanchéité reste assez complexe à résoudre avec cette ouverture et est assez peu réaliste.

La seconde solution imaginée, présentée en figure 25 a été de limiter au maximum les ouvertures dans la coque, et de ne laisser simplement l'espace disponible pour la montée la descente du bras.

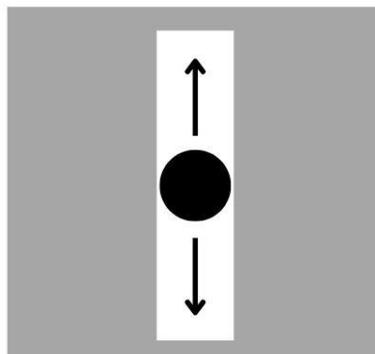


Figure 25 : Schéma ouverture 2e version rectangulaire fine

Cette ouverture reste simple, suivant seulement la trajectoire du bras. Le problème d'étanchéité apparaît comme plus simple à résoudre, mais reste tout aussi complexe dû aux angles droits que forme cette ouverture. Une solution circulaire a alors été imaginée.

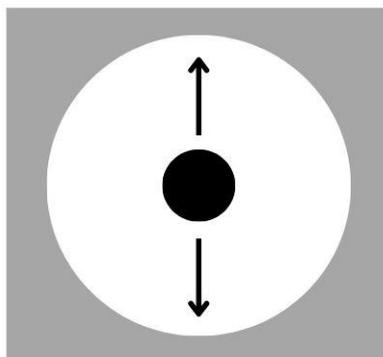


Figure 26 : Schéma ouverture 3e version cercle

Cette forme arrondie simplifie la mise en œuvre d'un tel système, en permettant la fixation d'un système en silicone de type entonnoir, le tout maintenu en place par un collier de serrage fixé aux extrémités de la coque et du bras. De plus, une forme ronde est plus aéro/hydrodynamique ce qui conforte la voie dans laquelle la solution se profile. Néanmoins, cette solution n'est pas parfaite

du fait de sa complexité, et de par le degré d'action du bras qui se trouve diminué. Une vue schématique de ce système peut alors être observée en figure 27.

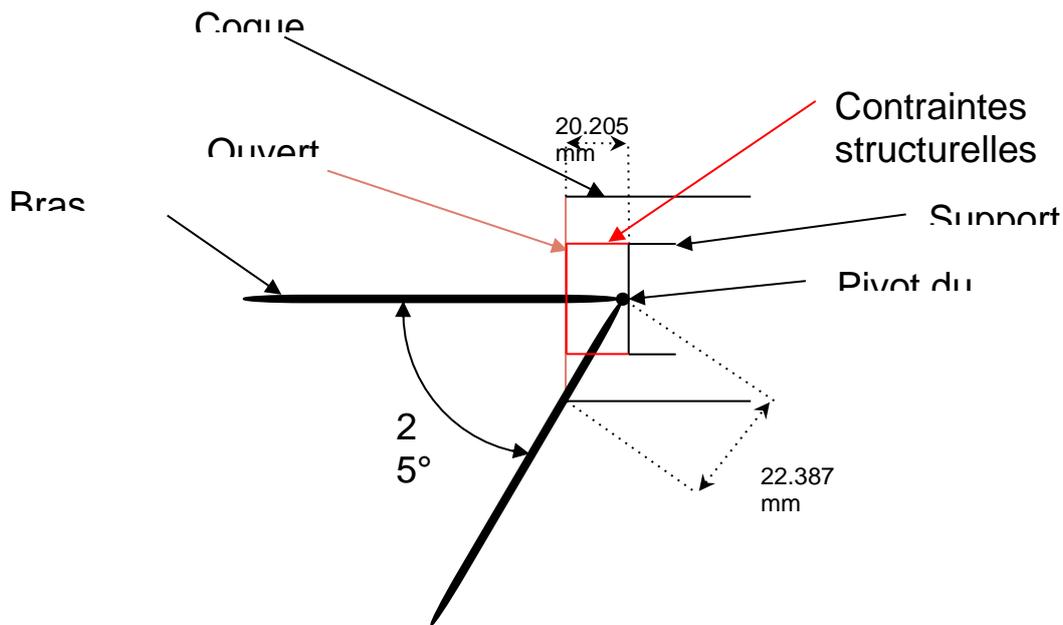


Figure 27 : Schéma du problème d'inclinaison du bras 1ère version

Les mesures sont réalisées de manière théorique sur Fusion 360. Comme illustré sur la figure 27, l'angle d'action est de maximum 25° au lieu de 70°. Ce qui n'est pas exploitable pour le projet. L'idée d'allonger alors le cercle en forme d'ellipse a alors été pensée.

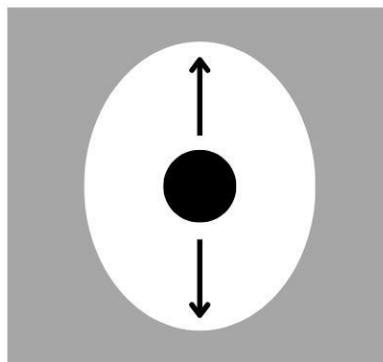


Figure 28 : Schéma ouverture 4e version ellipse

Cette évolution présentée en figure 28 vient parfaire la précédente afin de réduire les surfaces ouvertes inutilisées et donc sans intérêt. Ainsi, la surface à rendre étanche est moins importante et donc plus intéressante à la résolution du problème. Ainsi, en inclinant cette ellipse conformément à la figure 29, il est possible d'augmenter le degré de mobilité du bras.

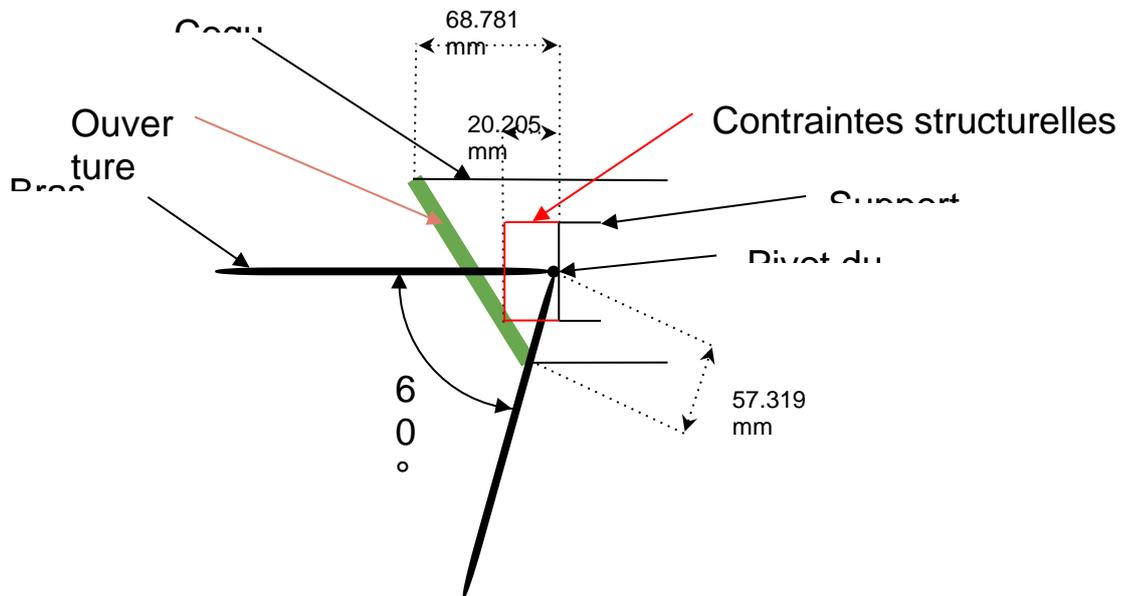


Figure 29 : Schéma du problème d'inclinaison du bras 2e version

De ce fait, son degré d'action augmente jusqu'à atteindre les 60°. Cette solution est ainsi retenue, car concis aussi bien facilité d'ouverture, étanchéité et degré maximum d'action du bras.

### 3) Forme globale

Actuellement en connaissance des différents facteurs et contraintes à prendre en compte, la coque peut ainsi voir sa forme apparaître. Il faut trouver un moyen d'englober au maximum le drone sans altérer son fonctionnement comme vu précédemment et de manière simple. Après assemblage des pièces du projet sur Fusion 360, la conception peut s'établir.

La réalisation d'une coque suivant les contours du drone fut la plus rapide à imaginer.



Figure 30 : Ébauche du contour de la coque vue du haut

Le choix de réaliser une coque la plus arrondie possible vient du fait de l'aéro/hydrodynamisme qui doit être plus ou moins constant tout autour du drone. Un dôme supérieur et inférieur sera positionné sur les 2 faces du drone. Tout angle sera également arrondi au maximum.

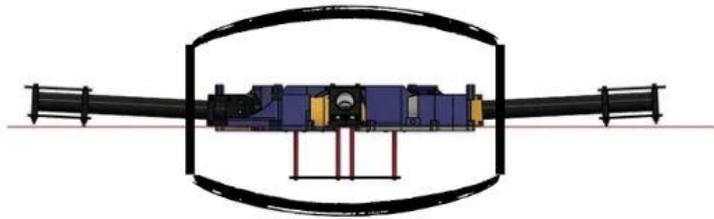


Figure 31 : Ébauche du contour de la coque vue de côté

Afin de le rendre imprimable, la coque sera divisée en plusieurs parties. Il semblait judicieux de la découper en 4 parties du fait de sa symétrie. Ces pièces seront vissées à l'aide de pas de vis prévus à cet effet eux même conçus à l'intérieur de ces pièces. Pouvoir visser les pièces entre elles permet aussi d'ajuster la pression voulue afin de régler au mieux l'étanchéité. Le dimensionnement des vis est basé sur le squelette du drone reprenant le même type de vis. Ceci assure une homogénéité des pièces, une résilience et une modulabilité accrue en cas de changement de pièces. La figure 32 suivante permet de se rendre compte de la structure alors imaginée.

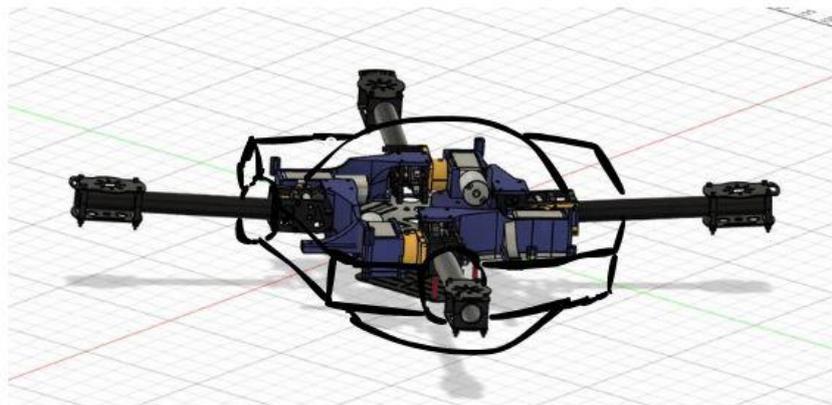
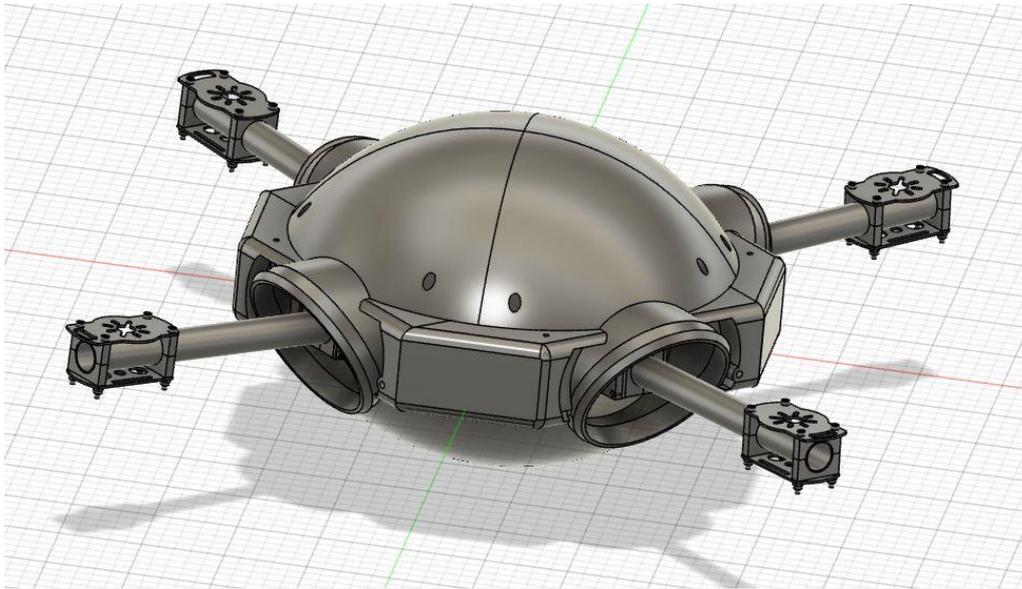


Figure 32 : Ébauche du contour de la coque vue 3/4

#### 4) Modélisation en 3D

La mise en pratique de cette modélisation sur Fusion 360 n'a pas été simple du fait des nombreuses contraintes du système, de par sa forme, et de par les différents éléments déjà implémentés sur ce dernier (notamment les supports moteurs). Cependant, après de nombreux essais infructueux, la structure développée est la suivante :



*Figure 33 : Vue de 3/4 de la coque modélisée*

Ainsi, via ces opérations et l'intégration des différentes parties sur ce logiciel, les futurs groupes pourront contribuer à l'avancement du projet en reprenant plus facilement les travaux précédemment effectués.

Par souci de temps et du fait que le projet ne soit qu'expérimental, la coque ne sera pas imprimée et les tests ne seront donc pas possibles.

## **VII - Électronique**

Pour permettre de mettre en mouvement le système mécanique précédemment présenté, une partie du projet a été dédiée à la réalisation de son montage électronique. Ce dernier avait plusieurs objectifs à satisfaire, le premier d'entre eux étant de pouvoir commander en position et en vitesse la rotation des bras du drone.

Un autre point important qu'il devait satisfaire, est le fait d'être le plus compact et léger possible. En effet, l'espace disponible à l'intérieur du drone étant assez restreint, ce ne sera à terme pas le seul système électronique à y coexister.

En effet, ce dernier devra aussi posséder toute l'électronique nécessaire au décollage et au maintien en vol du drone, cela comprend une caméra FPV (First Person View) pour permettre au pilote d'obtenir des images en temps réel, comme s'il se trouve dans l'appareil, un GPS pour connaître sa position exacte, une Pixhawk ( elle représente le cerveau du drone, coordonnant ses mouvements, contrôlant sa stabilité et permettant une navigation précise), un récepteur FRISKY R-XSR pour recevoir les instructions envoyées par le pilote via sa télécommande, un ESC (Électronique Speed Controller) permettant le contrôle des moteurs liés aux hélices, un module de communication XBEE (ce module permet de fournir une communication sans fil fiable entre le drone et sa station au sol, ainsi qu'un émetteur vidéo.

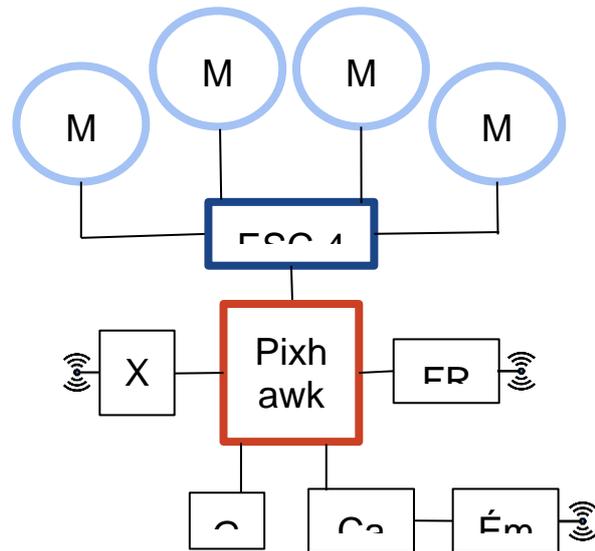


Figure 34 : Schéma électrique du drone

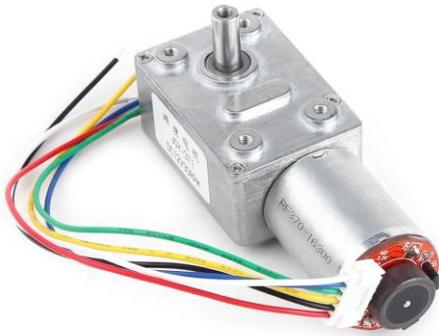
La mise en place des composants précédemment cités nécessaires au contrôle autonome du drone ne sera pas traitée au cours de ce projet. En effet l'idée première ici, est dans un premier temps de faire preuve de concept. Ce point est très important, lors de la réalisation d'un système complexe comme celui-ci, la création d'une preuve de concept initial est essentielle pour plusieurs raisons. Il permet dans un premier temps de valider la faisabilité technique du système imaginé afin de déterminer si les idées et les concepts théoriques peuvent être mis en pratique afin de se lancer dans la réalisation du système final.

Créer une preuve de concept peut permettre aussi d'identifier et de résoudre les problèmes potentiels dès les premières étapes du développement. Cela permet d'économiser du temps et des ressources à long terme en évitant de découvrir des défauts majeurs dans les phases ultérieures du projet. La preuve de concept est aussi importante pour permettre de mieux comprendre les besoins et les préférences du client.

Le système électronique qu'il va être donc être question ici sera donc exclusivement dédié au système de pliage des bras du drone.

## A - Le système

Ce système est composé de plusieurs éléments. Les premiers étant les moteurs responsables de la mise en mouvement des bras. Ce sont des moteurs à vis sans fin comme présenté en figure 35.



Ces moteurs ont été choisis par les groupes précédents pour plusieurs raisons : ils disposent d'un couple important, ils sont précis, et disposent d'un encodeur à leur extrémité permettant de connaître la position radiale de ce dernier.

Ces moteurs seront pilotés en vitesse et en direction par 2 modules de control L298N (chacun des modules pouvant ainsi piloter 2 moteurs). Leur position sera elle commandée par une carte arduino nano qui servira de cerveaux au système, puisqu'elle recevra les position des moteurs via leurs encodeurs respectif et se chargera de communiquer avec les modules de contrôle moteur, pour leur indiquer la puissance

et la direction à fournir au moteur.

Figure 35 : Photo du moteur à vis sans fin

Le système électronique conçu pour ce projet comprend également quatre interrupteurs de fin de course, permettant d'envoyer un signal à la carte Arduino lorsque le bras du drone est complètement horizontal. De plus, pour simuler les commandes envoyées par l'utilisateur, le système sera équipé d'un récepteur infrarouge qui recevra des instructions via une télécommande munie d'un émetteur du même type.

## B - Le montage

Pour réaliser ce système, les différents éléments doivent être interconnectés par des câbles et reliés à l'Arduino pour assurer le pilotage global du système. Étant donné le besoin d'un nombre important de points de connexion avec la carte Arduino, un module d'extension a été ajouté au système pour augmenter le nombre de broches disponibles. Une fois avoir compris le rôle de chacun des éléments du système, le montage final du système à pu être modélisé dans le logiciel "Fritzing". Le schéma du montage obtenu est présenté dans la figure 36.

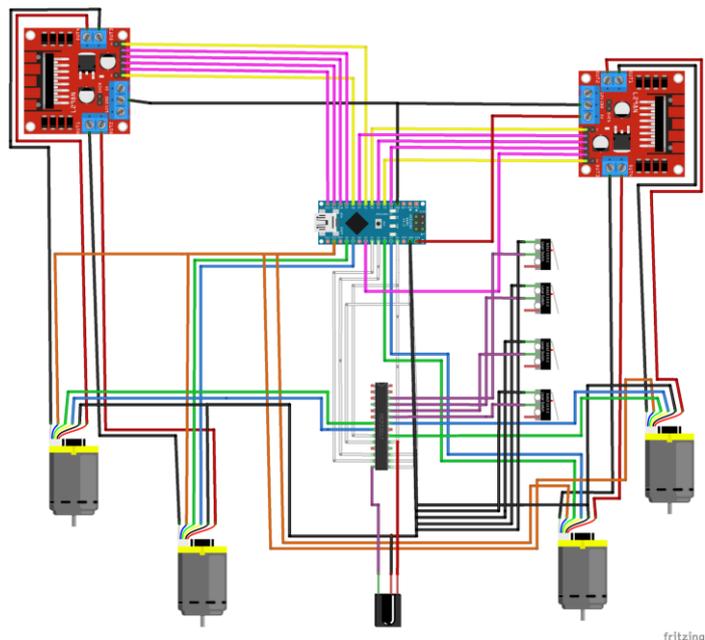


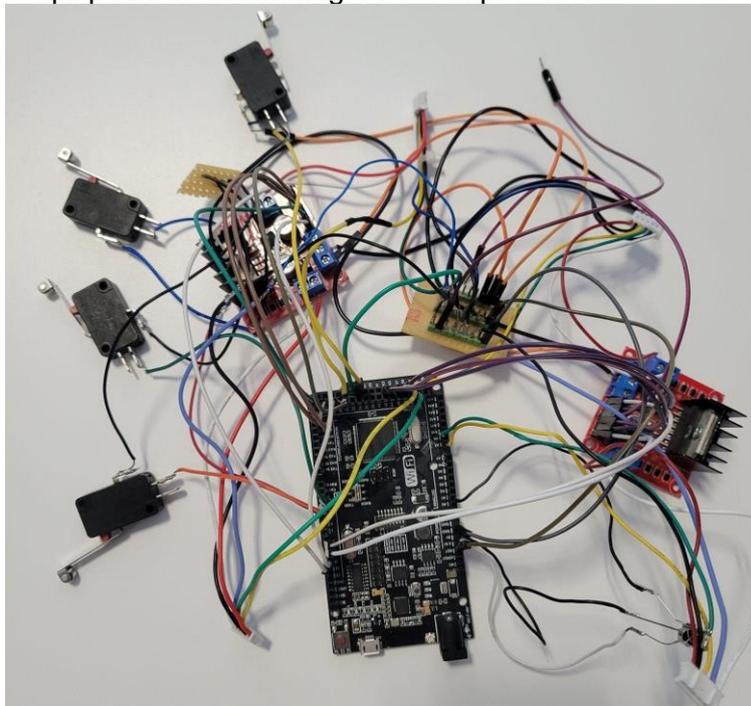
Figure 36 : Schéma électrique contrôlant le pliage

des bras

Ce schéma est très utile pour comprendre rapidement les interactions entre les différents éléments du système, et avoir une référence sur laquelle s'appuyer quand il faudra l'assembler physiquement.

Pour progresser dans la phase de preuve de concept, une approche a été adoptée en travaillant initialement sur un montage électronique plus simple. Ce premier montage comprenait uniquement un moteur, un contrôleur moteur et la carte Arduino. Cette approche a permis de se familiariser avec les différents composants et de comprendre leur fonctionnement. Par la suite, l'ajout du récepteur infrarouge et de la télécommande de contrôle est rapidement devenu nécessaire pour piloter le montage.

Une fois que le premier montage a été maîtrisé, une évolution a été entreprise. Pour cela, les trois autres moteurs, le driver moteur manquant et les différents capteurs de fin de course ont été ajoutés au montage. L'étape de connexion et d'assemblage du circuit était critique, car chaque composant fonctionne sous une tension spécifique et doit être connecté à un emplacement précis. Lors de la soudure des câbles d'alimentation, il était crucial de veiller à éviter tout court-circuit ou mélange de câbles, ce qui pourrait endommager les composants.



*Figure 37 : Montage électrique contrôlant le pliage des bras*

Une fois ce montage réalisé, une autre étape importante a été de programmer le système pour qu'il réponde aux attentes, mais cette partie sera abordée dans la section suivante.

## **C - Optimisation**

La seconde problématique à résoudre était liée à l'encombrement du système électronique. Comme le montre la figure 37, la solution proposée était assez rudimentaire. On remarque en effet que le montage n'était pas viable à long terme : les connexions n'étaient pas fixes et pouvaient facilement se déconnecter par erreur, compromettant ainsi l'intégrité du système. Pour remédier à cela, l'idée était de concevoir un unique circuit imprimé regroupant les deux contrôleurs moteur, la carte Arduino, ainsi que des ports de connexion permettant de connecter rapidement et sans erreur les moteurs et les interrupteurs.

Pour cela, plusieurs entreprises proposant ce service ont été étudiées. Le choix s'est porté sur la simplicité d'utilisation du logiciel et la présence d'une communauté active d'utilisateurs capable de répondre aux éventuelles questions.

La première étape de réalisation de ce circuit électronique a été d'étudier la documentation technique des modules de contrôle moteur pour comprendre leur fonctionnement et avoir une idée des composants électroniques utilisés. Avec ces informations, il a été possible de réaliser le schéma du driver moteur.

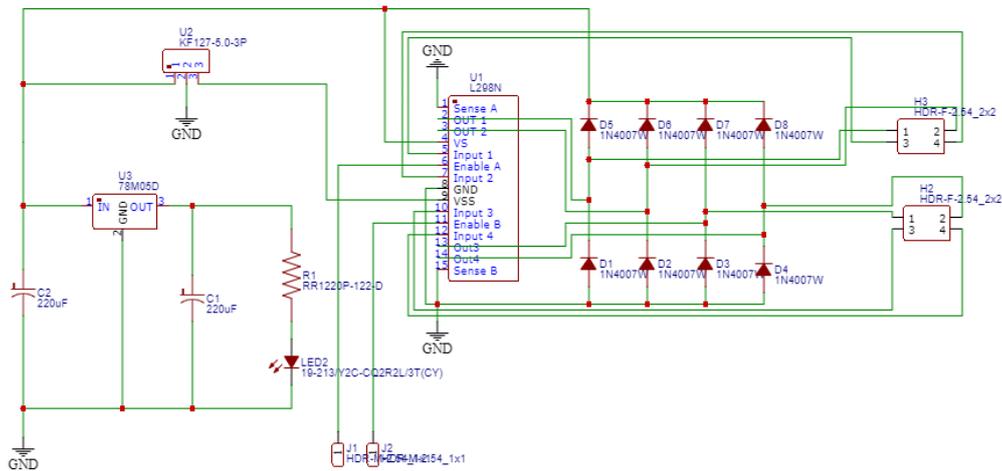


Figure 38: Schéma du circuit imprimé d'un driver moteur

Ensuite, il a fallu assembler le schéma final en doublant le driver moteur, en ajoutant l'emplacement de la carte Arduino, le module d'extension de broches, les connecteurs pour les moteurs et ceux pour les interrupteurs de fin de course. Le câblage de ces différents éléments a ensuite été réalisé, en veillant à ne pas oublier aucun composant.

Le schéma final ainsi réalisé présente les caractéristiques suivantes, telles qu'illustrées dans la figure 39.

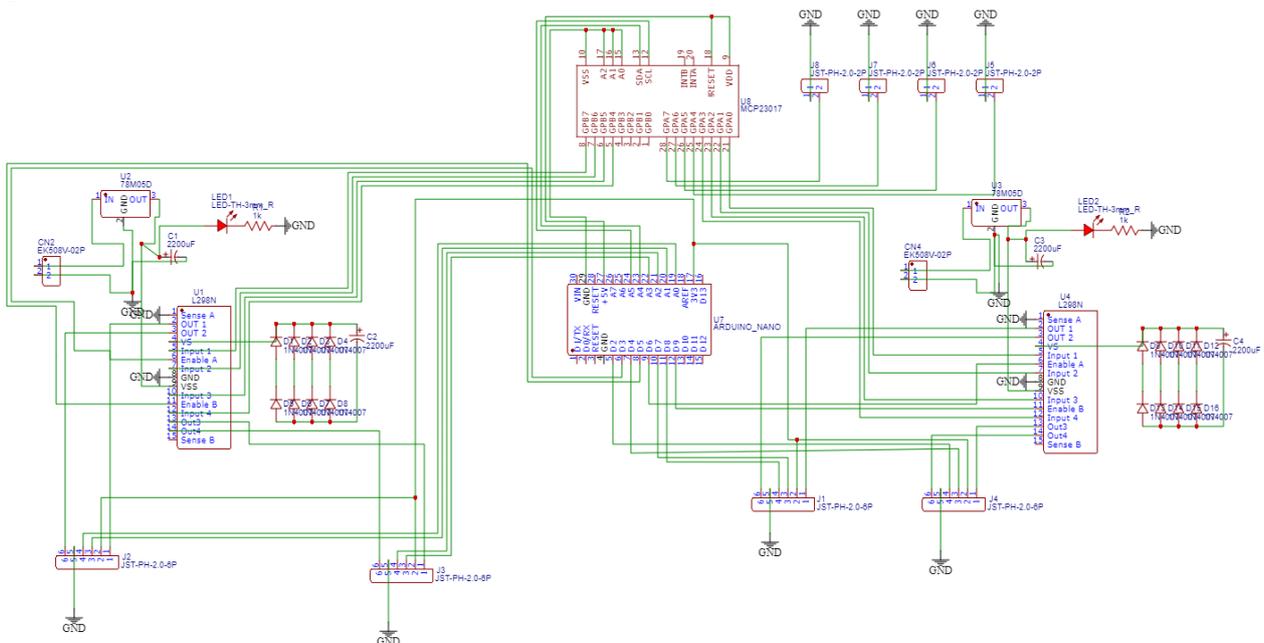


Figure 39: Schéma du circuit imprimé du montage

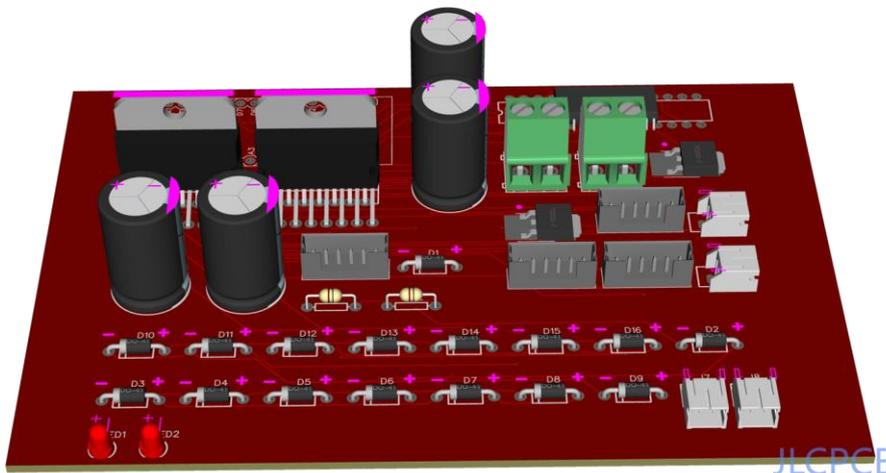


Figure 40: Représentation 3D du circuit imprimé du montage

Il est ici intéressant de voir l'espace gagné en faisant le choix d'un circuit imprimé. Cette solution paraissait idéale, cependant, dû au temps livraison des circuits, et dû au fait que ce projet ne doit simplement que réaliser une preuve de concept, l'idée a été mise de côté, mais pas abandonnée, puisque la solution est développée, et n'attend qu'à être commandée lorsque le projet sera plus abouti.

En conclusion de cette partie électronique, ce système, bien que viable puisqu'il répond au besoins initial du client qui était de permettre aux bras du drone de se plier, possède des défauts qu'il faudra par la suite résoudre. Le premier, étant l'espace occupé et l'aspect expérimental de la solution. Le second concerne les interrupteurs de fin de courses, qui sont volumineux et imprécis, et qui peuvent aisément être remplacés par des capteurs de position optiques, plus précis et petits. Ce dernier détecte instantanément lorsqu'un objet traverse le capteur.

## VIII - Programmation

Afin de pouvoir commander le montage électronique précédemment présenté, une partie du projet à été consacrée à la programmation en C++ de la carte arduino, via le logiciel de la même marque : Arduino IDE.

Les objectifs de cette partie étaient de permettre à l'utilisateur de commander l'inclinaison des bras du drone, indépendamment, et suivant différents degrés pour y effectuer des tests de comportements en vol et sur l'eau. Enfin, l'objectif final sera de lui implémenter un code permettant de voler en toute autonomie à l'aide de différents capteurs.

Dans cette partie programmation, différents points cruciaux ont été à considérer et à analyser en détail. La première d'entre elles à été de pouvoir commander en position les moteurs. En effet, il était primordial de pouvoir avoir une trace en direct de la position de chacun d'entre eux pour pouvoir les commander en position. La seconde problématique concerne quant à elle la commande en puissance des moteurs. En effet, il est nécessaire que le changement de position d'inclinaison se fasse de manière fluide et sans à-coup, pour ne pas déstabiliser le système. Ensuite, afin de proposer une solution viable, il était important de lier informatiquement chacun des composants, pour que le bras du drone se stoppe s'il est arrivé à sa position horizontale maximum.

Ainsi, le premier point important à été de comprendre les informations renvoyées par l'encodeur du moteur qui se trouve à l'extrémité de ce dernier. Ce petit module permet de déterminer avec précision la position du rotor du moteur. Le se présente comme le montre la figure 41. Le principe de fonctionnement repose sur l'effet Hall, qui est un phénomène physique où un courant électrique est généré dans un matériau conducteur placé dans un champ magnétique perpendiculaire à son courant électrique. Lorsque l'aimant (la partie circulaire) se déplace près d'un des 2 capteurs à effet Hall, le champ magnétique à proximité du capteur change. Cela crée une différence de potentiel (tension) à travers le capteur, qui est mesurée électroniquement. Ce phénomène peut être visualisé via l'interface arduino à l'aide du code présenté en annexe 2.



Figure 41 : Représentation d'un encodeur

Les deux broches respectives de ces capteur sont sont définies comme entrées numériques pour lire les signaux renvoyés. Ces valeurs sont ensuite lues et stockées dans des variables, qui sont ensuite affichées sur le moniteur série, ce qui permet d'obtenir la représentation de la figure 39

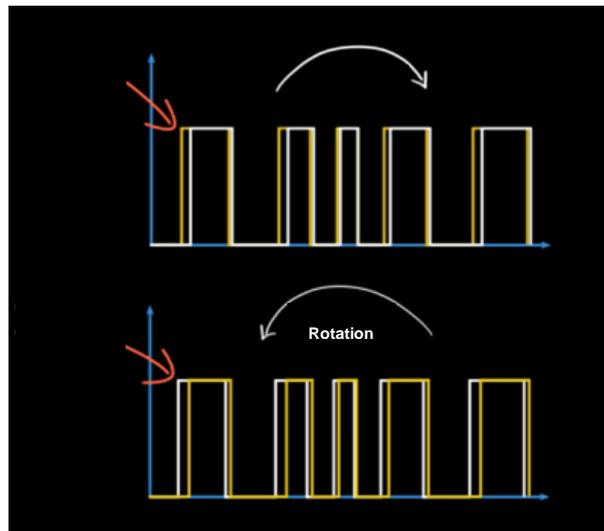


Figure 42 : Graphique de lecture de l'encodeur

On remarque sur la figure 42, que lorsque le moteur tourne dans le sens horaire, le capteur A se déclenche en premier suivi par le capteur B. À l'inverse, lorsque le moteur tourne dans le sens anti-horaire, le capteur B envoie un signal en premier, suivi par le capteur A.

En prenant en compte ce mécanisme, il est possible de créer un compteur de position.

En effet, après avoir compris cela, il a été possible de créer un code permettant de convertir ces fronts montant de tension en compteur de position. Pour ce faire, il faut utiliser des interruptions pour détecter ces changements d'état des signaux provenant de deux broches connectées à l'encodeur du moteur. Lorsque des changements sont détectés, les fonctions d'interruption correspondantes mettent à jour un compteur, ce qui permet de connaître la position radiale du moteur.

Suite à cela, un axe de travail est apparu. En effet, la valeur "0" du compteur de position (représentant sa position initiale) doit correspondre à une position du bras à l'horizontale. Or, l'encodeur prend comme position initiale, celle à laquelle il est lorsqu'il est mis sous tension. Il a donc été impératif de trouver un moyen d'initialiser la position des bras du moteur à leur position horizontale. Pour ce faire, l'utilisation des interrupteurs de fin de course a été importante.

Il a fallu trouver une position adéquate sans gêner les pièces précédemment imprimées en 3D. Une fois implémenté, il a fallu développer un code permettant de les utiliser. Pour ce faire, une fonction d'initialisation du drone a été imaginée pour que lorsque le système électronique est mis sous tension, si l'interrupteur n'est pas appuyé (donc si le bras n'est pas en position horizontale), les bras vont automatiquement se lever jusqu'à ce que chacun d'eux déclenche son interrupteur associé. Cette action va permettre de définir chacune des 4 positions "0" des moteurs. Ce capteur permet aussi au bras du moteur de ne pas se lever trop lorsque l'utilisateur le demande en le stoppant dans sa rotation lorsque le capteur sera actif.

Une fois cet axe de travail réalisé, il a fallu réaliser l'une des fonctions principales du programme, responsable du contrôle en puissance des moteurs. Cette fonction est constituée d'un contrôleur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) permettant de calculer la puissance nécessaire à délivrer au moteur en fonction de la position souhaitée. La sortie de puissance est calculée par la formule suivante :

$$u(t) = K_p \cdot \epsilon(t) + K_i \int_0^t \epsilon(\tau) d\tau + K_d \frac{d\epsilon(t)}{dt}$$

Où  $K_p$  est le gain proportionnel,  $K_i$  est le gain intégral,  $K_d$  est le gain dérivé,  $\epsilon(t)$  la fonction d'erreur (consigne - position actuelle),  $u(t)$  la fonction de commande. Une fois cette fonction appliquée au sein de la fonction, il a fallu la tester en choisissant une valeur de consigne et voir comment le moteur atteignait cette dernière. Les premiers essais n'étaient pas parfaits, il a été

nécessaire de faire de nombreux tests, en modifiant à chaque fois les constantes  $K_i$  et  $K_d$  pour que le système n'oscille pas autour de la valeur de consigne et l'atteigne le plus rapidement possible sans la dépasser. Une fois ces ajustements effectués, la puissance calculée en sortie de cette fonction permet de contrôler le moteur de manière fluide, car cette dernière va décroître à l'approche de la consigne, ce qui ne crée pas d'à-coup. Comme le montre la figure 43 suivante, défini par le code en annexe 3.

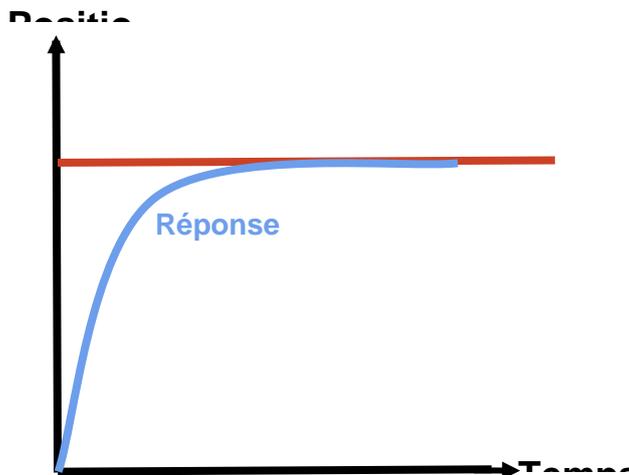


Figure 43 : Graphique présentant la réponse du système sous l'effet d'un PID

Il a ensuite fallu faire évoluer ce code pour qu'il puisse contrôler les 4 moteurs. Cette étape cruciale pour la réussite du projet à durée plus longtemps que prévu. En effet, l'adaptation du contrôleur précédent a entraîné la création de nombreuses variables pour que la rotation des bras puisse se faire de manière indépendante. Ce premier point associé au fait qu'il a fallu faire attention à l'espace disponible par la carte arduino à entraîner de nombreuses optimisations de code. Certains conflits de lecture et d'écriture de variables sont aussi apparus dans le code. Il a donc été important de vérifier indépendamment l'utilisation de chacune des variables, en positionnant aussi dans le code de nombreuses fonctions de vérification permettant de contrôler le bon déroulement du programme.

Ainsi, après de nombreux essais et un certain nombre de retour à une page blanche pour faire fonctionner le pilotage des 4 bras du drone en position, le code était enfin prêt pour être testé en condition réelle au sein de l'architecture du drone.

## IX-

## Test

Comme il en a été question dans les différentes étapes de ce projet, de nombreux tests ont été réalisés sur chacune des parties mécanique, informatique et électronique.

Ainsi, quand chacune des parties fut complétée, il a fallu tester le système dans son ensemble. Pour ce faire, chacune des pièces imprimées en 3D a été installée, ainsi que le montage électronique, et le code a été envoyé sur la carte arduino.

Les premiers résultats n'ont pas été ceux attendus, car les moteurs manquaient de puissance pour lever les bras du drone. Après analyse du problème, l'erreur a été identifiée : l'alimentation de la carte arduino par le simple câble de l'ordinateur n'était pas suffisante. Ainsi, en connectant cette dernière à l'alimentation générale, le problème fut réglé. D'autres contretemps mineurs sont apparus dus au fait que le montage électronique était confiné au sein d'un espace restreint, ce qui avait pour effet de mettre une certaine tension sur les fils de connexion, ce qui avait pour effet de les déconnecter.

Cependant le fait d'avoir procédé à des tests réguliers tout au long de la réalisation de ce projet a permis une implémentation efficace et fluide de chacune des parties.

## **X - Conclusion**

La conclusion de ce projet met en évidence les avancées significatives réalisées, passant de la phase théorique à une expérimentation concrète. Cette transition est remarquable notamment grâce à la capacité du drone à plier ses bras de manière autonome, une fonctionnalité qui n'était pas disponible lors de la reprise du projet en raison de divers défauts de conception, tant physiques que virtuels. Cependant, grâce à une intégration harmonieuse des aspects physiques, électroniques et du code fonctionnel, le projet a atteint un certain nombre de ses objectifs.

Ainsi, le drone est désormais capable de plier ses bras à différentes positions, offrant une grande flexibilité avec la possibilité de les ajuster indépendamment dans une plage d'angles allant de 0° à 60°. Cette réalisation témoigne de la résolution des défis technologiques rencontrés et illustre la progression du projet.

De plus, le projet a été conçu avec une vision de durabilité, visant à résister aux contraintes physiques rencontrées dans son environnement d'utilisation. Des tests théoriques et pratiques ont été menés pour évaluer sa robustesse, et d'autres tests restent à prévoir pour confirmer sa capacité à voler avec le nouveau système d'accroche des bras pliables.

La partie électronique et logicielle du projet a joué un rôle crucial dans sa réalisation. Initialement, le système électrique comportait plusieurs défauts et n'était pas fonctionnel. Cependant, grâce à des efforts de conception et de développement, ces défauts ont été surmontés, et le système est désormais en état de marche.

Un aspect important de cette partie était la réalisation d'une preuve de concept, nécessitant la mise en œuvre d'un montage électronique simplifié pour valider les principes de contrôle des moteurs et des capteurs. Ce premier montage a permis de tester les fonctionnalités de base et de se familiariser avec le fonctionnement des composants. Par la suite, ce système électronique est appelé à être amélioré pour répondre aux exigences du projet en termes d'encombrement et de poids. Pour ce faire, un circuit imprimé a été conçu pour intégrer tous les composants nécessaires, tels que les contrôleurs de moteurs, la carte Arduino et les capteurs. Ce circuit imprimé offre une solution plus robuste et plus fiable que le montage initial, garantissant une meilleure intégration et une plus grande stabilité du système.

Du côté logiciel, le code a été développé pour contrôler les moteurs en fonction des signaux des capteurs et des commandes utilisateur. Des algorithmes de contrôle ont été implémentés pour assurer un fonctionnement précis et fiable du système, en tenant compte des contraintes physiques et des exigences de performance.

L'approche adoptée pour ce projet a été axée sur la progression continue et la facilité de reprise pour les futurs groupes. La structure du projet a été conçue pour simplifier la continuation des travaux, en mettant en avant la modularité et la flexibilité du projet.

Pour l'avenir, l'accent sera mis sur le développement de la coque du drone, un aspect qui a déjà été envisagé cette année. Les concepts et modèles développés offrent une base solide pour l'évolution du projet. Les idées de conception imperméable seront explorées et implémentées par les futurs groupes, avec des tests en conditions réelles pour garantir la capacité de flottaison du drone. De plus, la mise en place et la configuration des éléments de contrôle du vol du drone seront intégrées pour compléter l'ensemble fonctionnel du projet.

# Bibliographie

Rédaction, L. (s. d.). *Hydrophobe : qu'est-ce que c'est ?* Futura. <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-hydrophobe-12597/>

Biget, S. (s. d.). *Ce drone quadrirotor peut voler et se transformer en sous-marin.* Futura. <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/technologie-ce-drone-quadrirotor-peut-voler-transformer-sous-marin-103353/>

 *Dynamique des fluides : définition et explications.* (s. d.). Techno-Science.net. <https://www.techno-science.net/definition/2873.html>

*Drone professionnel - HP30.* (s. d.). [Vidéo]. DIODON DRONE - de Reconnaissance / D'inspection / Pour Recherche et Sauvetage. <https://www.aeroexpo.online/fr/prod/diodon-drone/product-187748-70190.html>

*Aérodynamique : le S.Cx - Communauté de la Fabrique des Mobilités.* (s. d.). [https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/wiki/A%C3%A9rodynamique:\\_le\\_S.Cx](https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/wiki/A%C3%A9rodynamique:_le_S.Cx)

Jerome. (2024, 18 janvier). Tutoriel L298N : fonctionnement, branchement, code arduino. *Passion Electronique*. <https://passionelectronique.fr/tutoriel-l298n/>

*Curio Res.* (s. d.). <https://curiores.com/positioncontrol>

Instructables. (2017, 14 octobre). *How to Burn a Bootloader to Clone Arduino Nano 3.0.* Instructables. <https://www.instructables.com/How-To-Burn-a-Bootloader-to-Clone-Arduino-Nano-30/?comments=all#CZM1P39I95GVRN0>

Meurisse, D. (s. d.). *Utiliser un MCP23017 pour ajouter 16 entrées/sorties à votre Arduino.* MCHobby - le Blog. <https://arduino103.blogspot.com/2013/06/utiliser-un-mcp23017-pour-ajouter-16.html>

Hrisko, J. (2019, 16 juin). *SAMD21 M0 Mini Arduino Board — Maker Portal.* Maker Portal. <https://makersportal.com/blog/2019/6/14/samd21-m0-mini-arduino-board>

# Annexes

## Annexe 1

Corps 3D		Coefficient de traînée
Sphère		0,47
Demi-sphère		0,42
Cône 60° d'angle au sommet		0,50
Cube		1,05
Cube à 45°		0,80
Long cylindre L/D = 2		0,85
Court cylindre L/D = 1		0,91
Corps de moindre traînée		0,04
Demi-corps de moindre traînée		0,09

Coefficients de traînée frontaux

*annexe 1*

sources : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient\\_de\\_tra%C3%AEn%C3%A9e](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_tra%C3%AEn%C3%A9e)

## Annexe 2

```
#include <PinChangeInterrupt.h>
#include <PinChangeInterruptBoards.h>
#include <PinChangeInterruptPins.h>
#include <PinChangeInterruptSettings.h>

#define ENC_A 52
#define ENC_B 50

volatile int CPT = 0;
volatile bool lastA ;
volatile bool lastB ;

void setup() {
    pinMode(ENC_A, INPUT);
    pinMode(ENC_B, INPUT);

    // Activer les résistances de tirage interne
    digitalWrite(ENC_A, HIGH);
    digitalWrite(ENC_B, HIGH);

    Serial.begin(9600);

    // Attacher les interruptions
    attachPCINT(digitalPinToPCINT(ENC_A), encoder_callback_A, CHANGE);
    attachPCINT(digitalPinToPCINT(ENC_B), encoder_callback_B, CHANGE);
}

void loop() {
    Serial.println(CPT);
}
```

## Annexe 3

```
#include <util/atomic.h> // For the ATOMIC_BLOCK macro
#include <ezButton.h>
#include <IRremote.h> // Librairie pour les recepteurs infra-rouge
#include <PinChangeInterrupt.h>
#include <PinChangeInterruptBoards.h>
#include <PinChangeInterruptPins.h>
#include <PinChangeInterruptSettings.h>
#include <PCF8574.h>
#include <stdint.h>

#define PIN A1

IRrecv MonReceveurIR(PIN); // Déclare MonReceveurIr comme objet receveur IR
uint32_t Code; // Déclare la variable code comme étant un entier
sur 32 bits

ezButton limitSwitch_1(4); // create ezButton object that attach to pin 13;

int ENCA = 50; // YELLOW
int ENCB = 52; // WHITE

int PWM = 10; //10
int IN1 = 22; //26
int IN2 = 24; //28

int CPT = 0;

volatile bool lastA = false;
volatile bool lastB = false;

long prevT = 0;
float eprev = 0.0;
float eintegral = 0.0;
long e = 0;
float u = 0;
float pwr = 0;

long target = 0;

int state ;
```

```

void PID1();
void setMotor(int dir, int pwmVal, int pwm, int in1, int in2);

void encoder_callback_A1();
void encoder_callback_B1();

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  state = limitSwitch_1.getState();

  MonReceveurIR.enableIRIn(); // Active MonReceveurIr
  MonReceveurIR.blink13(true); // Fonction qui active la led interne
(13) qui s'allumera à chaque réception IR

  limitSwitch_1.setDebounceTime(50); // set debounce time to 50 milliseconds

  pinMode(ENCA, INPUT);
  pinMode(ENCB, INPUT);

  digitalWrite(ENCA, HIGH);
  digitalWrite(ENCB, HIGH);

  attachPCINT(digitalPinToPCINT(ENCA), encoder_callback_A1, CHANGE);
  attachPCINT(digitalPinToPCINT(ENCB), encoder_callback_B1, CHANGE);

  pinMode(PWM, OUTPUT);
  pinMode(IN1, OUTPUT);
  pinMode(IN2, OUTPUT);

  while (limitSwitch_1.getState() == HIGH) {
    limitSwitch_1.loop(); // MUST call the loop() function first
    Serial.println("waitinggg");
    setMotor(1, 255, PWM, IN1, IN2);
  }
  setMotor(0, 0, PWM, IN1, IN2);
  delay(250);
  CPT = 0;
}

```

```

void loop() {

    limitSwitch_1.loop();

    state = limitSwitch_1.getState();

    if (MonReceveurIR.decode()) {
        Code=MonReceveurIR.decodedIRData.decodedRawData; // Récupère le code brut
du signal et le met dans la variable Code
        if(Code==3108437760){
            target = CPT;
            prevT = 0;
            eintegral = 0;
            eprev = 0;
            e = 0;
            u = 0;
            pwr = 0;
            setMotor(0,0,PWM,IN1,IN2);
        }
        else if(Code==3125149440){
            target -= 2000;

        }
        else if(Code==3091726080){
            target += 2000;

        }
        MonReceveurIR.resume();
    }

    PID1();

    if (state != HIGH){
        target = CPT;
        prevT = 0;
        eintegral = 0;
        eprev = 0;
        e = 0;
        u = 0;
        pwr = 0;
        setMotor(0,0,PWM,IN1,IN2);
    }
}

```

```

    }
}

void PID1(){
    // const
    float kp = 1;
    float kd = 0.00;
    float ki = 0.0;

    e = (CPT) - (target);

    u = (float)kp*e ;
    // power
    pwr = fabs(u);
    if( pwr > 255 ){
        pwr = 255;
    }

    //direction moteur
    int dir = 1;

    if(u<0){
        dir = -1;
    }
    if (pwr<100){
        dir = 0;
        pwr =0;
        prevT = 0;
        eintegral = 0;
        eprev = 0;
        e = 0;
        u = 0;
    }

    setMotor(dir,pwr,PWM,IN1,IN2);
    // previous error
    eprev = e;
    Serial.println(pwr);
}

```

```

void setMotor(int dir, int pwmVal, int pwm, int in1, int in2){
    analogWrite (pwm,pwmVal);
    if(dir == 1){
        digitalWrite (in1,HIGH);
        digitalWrite (in2,LOW);
    }
    else if(dir == -1){
        digitalWrite (in1,LOW);
        digitalWrite (in2,HIGH);
    }
    else{
        digitalWrite (in1,LOW);
        digitalWrite (in2,LOW);
    }
}

void encoder_callback_A1 () {
    bool newA = digitalRead (ENCA);
    bool newB = digitalRead (ENCB);
    if (newA != lastA) {
        if (newA == newB) {
            CPT++;
        } else {
            CPT--;
        }
    }
    lastA = newA;
}

void encoder_callback_B1 () {
    bool newB = digitalRead (ENCB);
    bool newA = digitalRead (ENCA);

    if (newB != lastB) {
        if (newB == newA) {
            CPT--;
        } else {
            CPT++;
        }
    }
    lastB = newB;
}

```