

Rapport final

- DASSAULT UAV CHALLENGE - Équipe Sea'gogne



Rozenn LE BIHAN
Axel RAYNOND
Rémy LABARRE
Matys BIECHE
Alexandre AMARO MONTEIRO
Txomin BISBAU

Professeur référent :
Monsieur OSTRE, Maître de conférence à SeaTech

2023-2024

Remerciements

Nous remercions tout d'abord notre professeur référent M. OSTRE pour son enthousiasme et son aide tout long de notre projet.

Nous souhaitons également remercier notre école d'ingénieurs SeaTech pour les moyens mis à notre disposition et son soutien dans notre projet.

Nous remercions tout particulièrement l'équipe encadrante du DASSAULT UAV Challenge pour l'opportunité qu'ils nous donnent en participant à cette compétition et les conseils avisés qui nous ont été donnés.



FIGURE 1 – Équipe Sea'gogne

Table des matières

Introduction	1
1 Rappel du projet et de sa mission	2
1.1 Contexte et mission : sauvetage en mer	2
1.2 Objectifs du rapport	2
1.3 Fonctionnalités et diagrammes techniques	3
1.3.1 Schéma cinématique	5
2 Le drone	6
2.1 Structure du drone	6
2.1.1 Fuselage	6
2.1.2 Empennage	9
2.1.3 Câblage	9
2.1.4 Aile	10
2.1.5 Moteurs et système tilt-rotor	11
2.1.6 Poutre de liaison entre le fuselage et les moteurs	15
2.1.7 Hélices	18
2.1.8 Système de largage	18
2.2 Système embarqué	19
2.3 Logiciels de contrôle	21
3 Problèmes rencontrés	22
3.1 Point de départ	22
3.2 Choix d'un airframe viable	22
3.3 Paramétrage du Pixhawk	23
4 Estimation du coût	25
4.1 Rendu final	26
5 Enseignements tirés	27
Conclusion	28

Résumé

Dans le cadre de la compétition DASSAULT UAV Challenge, notre équipe s'attelle à la conception d'un drone VTOL dédié aux opérations de sauvetage en mer. De la sélection de la structure au dimensionnement précis des composants, chaque étape de notre processus de développement est réalisée de manière à créer un drone aussi performant que possible, tout en répondant aux exigences rigoureuses définies par la compétition.

Grâce à la diversité de nos compétences et à nos recherches approfondies, nous avons fusionné nos connaissances dans le cadre de ce projet pluridisciplinaire. De la modélisation à la simulation, en passant par la programmation, l'automatisation et l'électronique, chaque domaine a été abordé avec une attention particulière. Notre objectif est de présenter un drone qui allie l'expertise technique à une approche globale pour répondre efficacement aux défis complexes du sauvetage en mer.

Abstract

As part of the Dassault UAV Challenge competition, our team is dedicated to designing a VTOL drone for sea rescue operations. From selecting the structure to precisely sizing the components, each step of our development process is carried out to create a drone that is as high-performing as possible, while meeting the rigorous requirements set by the competition. Thanks to the diversity of our skills and in-depth research, we have integrated our knowledge within the framework of this multidisciplinary project. From modeling to simulation, through programming, automating, and electronics, each domain has been approached with special attention. Our goal is to present a drone that combines technical expertise with a comprehensive approach to effectively address the complex challenges of sea rescue.

Introduction

Dans le cadre de la compétition organisée par Dassault, nous sommes fiers de présenter notre drone conçu pour répondre à des besoins en sauvetage en mer. Inspirée par l'engagement envers l'innovation et la sécurité, notre équipe a développé un drone à décollage et atterrissage vertical (VTOL).

Face aux défis complexes posés par les situations d'urgence en mer, notre drone VTOL offre une solution polyvalente. Pouvant décoller verticalement, ce drone peut être rapidement déployé depuis tous types de plate-forme, depuis un port jusqu'à une petite embarcation.

Afin d'assurer un contrôle le plus sûr possible, notre drone de sauvetage en mer est équipé de capteurs, d'une caméra et d'un système de transmission vidéo. Ces fonctionnalités permettent au drone de localiser rapidement et avec précision les personnes en détresse en mer, fournissant ainsi des informations cruciales pour coordonner des opérations de sauvetage rapides et efficaces.

Nous sommes impatients de démontrer comment notre drone VTOL peut répondre aux exigences et à sa mission de sauvetage en mer. Notre engagement envers l'innovation, la sécurité et l'efficacité se reflète dans chaque aspect de ce projet.

Partie 1

Rappel du projet et de sa mission

1.1 Contexte et mission : sauvetage en mer

Tout d'abord, nous avons à cœur la sécurité de nos côtes : l'école d'ingénieurs SeaTech est ancrée dans l'environnement marin et maritime toulonnais. C'est pourquoi, nous voulons que notre drone porte assistance aux baigneurs. Ce drone serait particulièrement utile en période de forte pression des services de secours, notamment lors de la saison estivale. Le drone permet la détection du baigneur, avec le renvoi d'une coordonnée GPS aux sauveteurs, et l'assistance d'une bouée de sauvetage en les attendant.

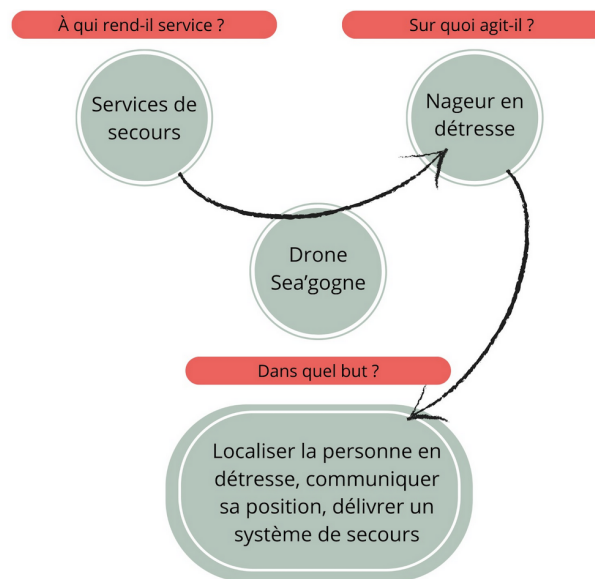


FIGURE 1.1 – Diagramme Bête à Cornes

1.2 Objectifs du rapport

L'objectif de ce second rapport est de faire un point sur la suite du projet et notamment la phase de construction et de configuration du drone. Nous avons également détaillé les problèmes et difficultés rencontrés qui ont ralenti notre avancement.

1.3 Fonctionnalités et diagrammes techniques

Nous rappelons ici les différentes contraintes que nous nous étions fixées lors de la création du drone. Bien que nous ayons donné la priorité à la partie mécanique lors de la fin du projet au détriment de la partie informatique avec la caméra, nos objectifs de performance demeurent inchangés.

Diagramme des interacteurs

De nombreux acteurs ont eu leur importance sur le développement du drone. Ce sont eux qui ont défini les objectifs de notre drone et les contraintes auxquelles ils devraient se soumettre.

Nous résumons ces contraintes liées aux interacteurs sous forme du diagramme suivant.

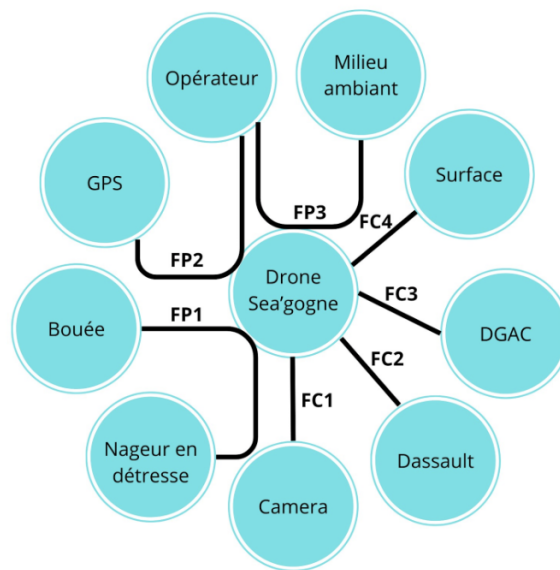


FIGURE 1.2 – Diagramme des interacteurs

Après l'étude de ces acteurs, nous avons défini des contraintes primaires (FP) et secondaires (FC). Les contraintes principales doivent satisfaire l'objectif à atteindre tandis que les contraintes permettent d'assurer la sécurité du drone et des autres utilisateurs. Les exigences que nous détaillons ci-dessous correspondent aux valeurs souhaitées pour le prototype et peuvent donc être imparfaites ou simplifiées. Certaines valeurs seront donc sûrement à modifier à la suite de nos tests.

FP1	Piloter le drone dans son environnement
FP2	Larguer la bouée de manière sûre et précise au nageur
FP3	Fournir la position du drone à l'opérateur et permettre à l'appareil de se rendre à un point précis
FC1	Visualiser l'environnement et détecter le nageur en détresse afin de se positionner
FC2	Respecter les contraintes obligatoires et importantes imposées par Dassault dans le cadre du Dassault UAV Challenge 2024
FC3	Respecter les normes de la DGAC appliquées aux UAV de catégorie C2
FC4	Décoller sur une distance courte et tout type de sol

TABLE 1.1 – Tableau des fonctions : principales et contraintes

Fonctions de service	Critères d'appréciations	Niveaux d'appréciations	Limite d'acceptation	Classe
FP1	Propulsion (puissance moteur) Vitesse horizontal Vitesse vertical Altitude (niveau mer) Portée communication	2x 300W 80 km/h 2m/s 120m > 500m	>2 x 300W min 80 m	F1 F2 F2 F1 F1
FP2	Capacité de charge Dispositif de largage Précision largage	500g Gâchette + Filin +/-30cm		F1 F1 F1
FP3	Récepteur GPS	Position exacte	± 2m	F1
FC1	Caméra Précision du positionnement	Résolution de 1920x1080 Position exacte	± 0.5m	F1 F1
FC2	Bouton d'arrêt d'urgence Suivre une trajectoire Respecter un périmètre de vol Capacité de vol autonome Retour du drone si perte de signal Retour niveau batterie Retour paramètres de vol	instantané Précision de 3m 100x50x120m Précision au pourcentage		F0 F0 F0 F0 F0 F1 F1
FC3	Poids Dispositif de signalement à distance Fonction de géovigilance	< 4kg (classe C2) Portée de 1km		F0 F0 F0
FC4	Système VTOL Switch mode avion-hélicoptère	Durée : 2 secondes		F0 F1

TABLE 1.2 – Tableau des contraintes détaillées

Diagramme Fast

Le diagramme FAST (Function Analysis System Technique) permet de visualiser les relations entre les différents composants d'un système. Voici celui que nous avons établi.

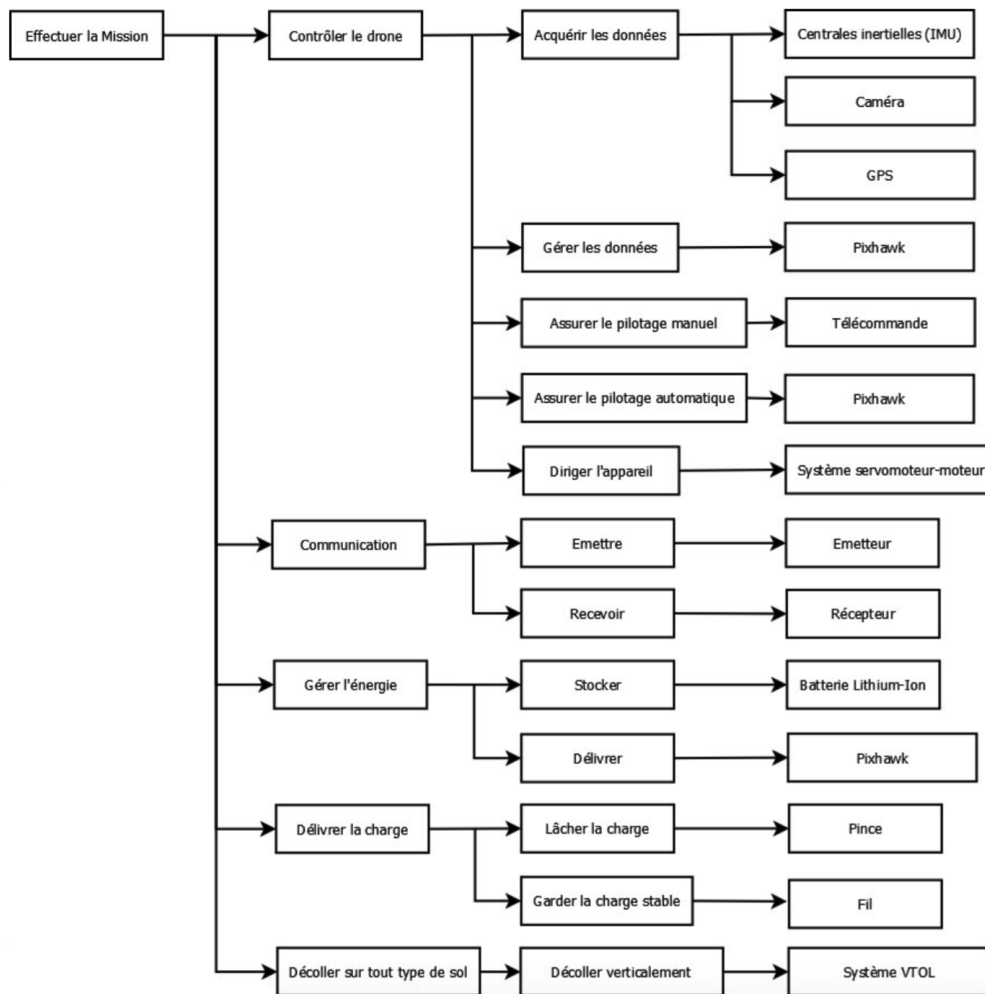


FIGURE 1.3 – Diagramme Fast

1.3.1 Schéma cinématique

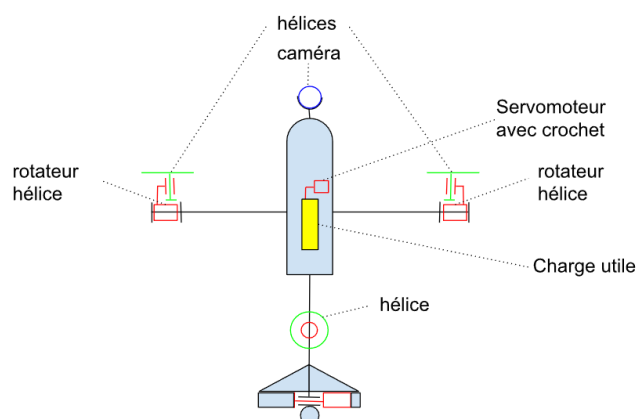


FIGURE 1.4 – Schéma cinématique

Comme nous l’expliquerons par la suite, nous sommes passés d’une configuration 2 moteurs à une configuration 3 moteurs pour faciliter le contrôle de l’appareil et augmenter sa puissance pour lui permettre de décoller verticalement.

Partie 2

Le drone

L'objectif du drone est de pouvoir secourir des personnes en mer. Il doit donc être capable de repérer des personnes, de se maintenir à une position proche de la personne à secourir, et de larguer une bouée de sauvetage à proximité de la personne. Tout cela dans rapidement et de manière sécurisée.

Le type de drone semblant répondre le mieux aux critères précédents est le VTOL. En effet, ce dernier est rapide pour intervenir le plus vite possible, et il peut rester à un point fixe de l'espace. De plus son décollage/atterrissage vertical est adapté au bord de mer. Pour la réalisation de notre drone, nous nous sommes inspirés du V-22 et du drone réalisé par Tom Stanton ([1]).

Nous avons modélisé différentes pièces du drone à l'aide du logiciel Catia V5.

2.1 Structure du drone

2.1.1 Fuselage

Pour le fuselage du drone, nous avons créé une structure pouvant accueillir la batterie, le pack pixhawk ainsi que la Jetson, tout en maintenant les ailes, l'empennage et la nacelle de largage de la bouée en place, et de manière à pouvoir contrôler les moteurs et les servomoteurs.

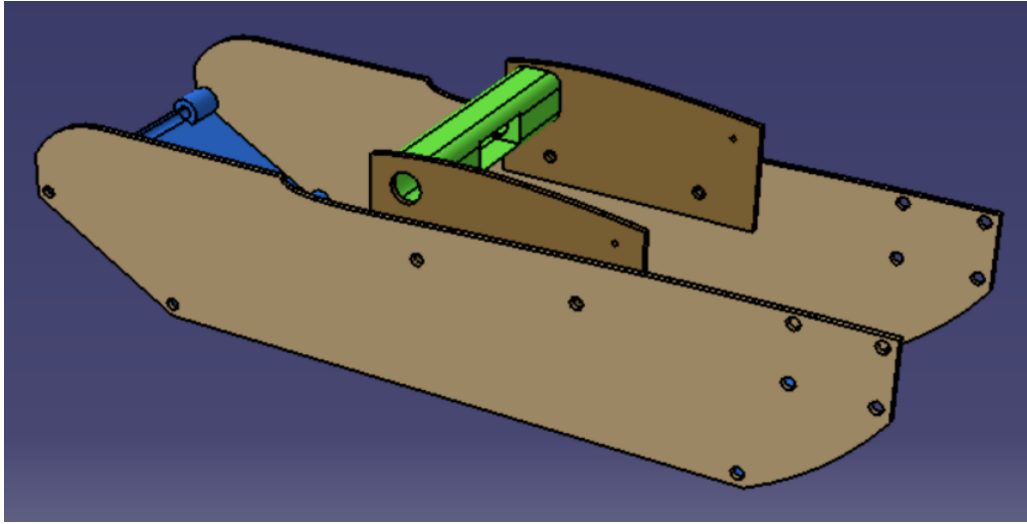


FIGURE 2.1 – Modélisation du fuselage assemblé

Le fond du fuselage est une plaque imprimée en 3D, et dimensionnée dans le but de supporter les composants électroniques, au-dessus de lui, à savoir la batterie, la Jetson, la caméra et le pack Pixhawk. Il est également suffisamment large pour soutenir la nacelle, fixée en dessous de lui. L'avant de la plaque, incliné de 30° et percé en son centre, est conçu pour accueillir la caméra.

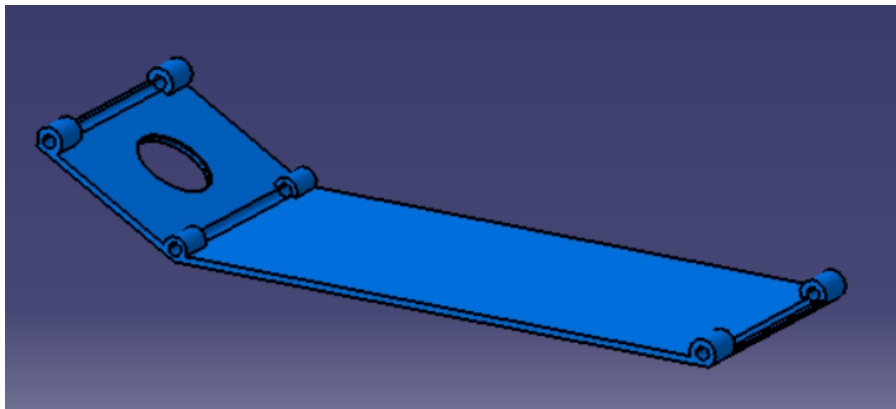


FIGURE 2.2 – Plaquette du fond

Deux plaques extérieures en bois forment une protection pour l'électronique et lient la structure en épousant la forme des ailes et de la plaque du fond. Des trous permettent d'y fixer les deux plaquettes et le tube qui supporte le moteur arrière et l'empennage par un système de tiges sans fond, permettant ainsi de démonter le drone rapidement pour faciliter son transport.

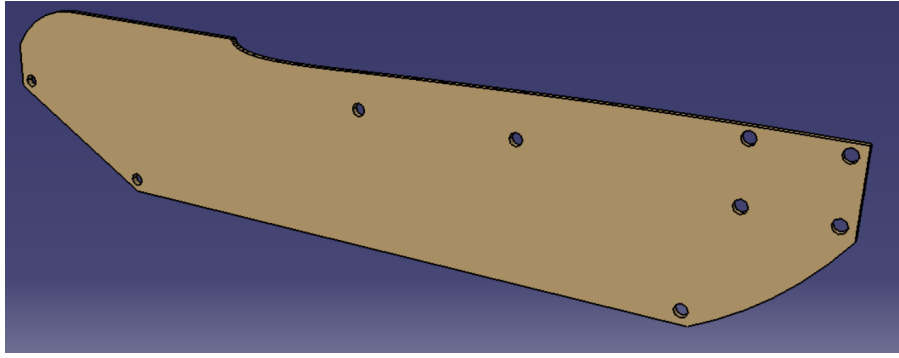


FIGURE 2.3 – Plaque extérieur

Deux plaques extérieures en bois forment une protection pour l'électronique et lient la structure en épousant la forme des ailes et de la plaque du fond. Des trous permettent d'y fixer les deux plaquettes et le tube qui supporte le moteur arrière et l'empennage par un système de tiges filetées, permettant ainsi de démonter le drone rapidement pour faciliter son transport.

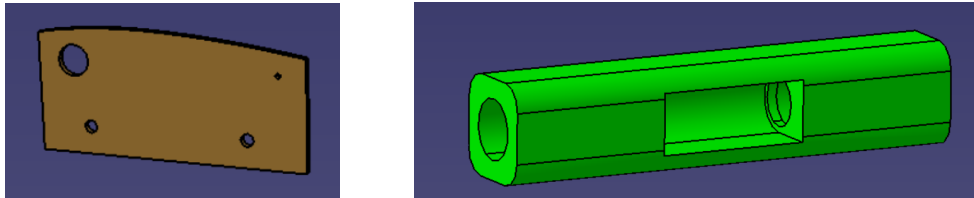


FIGURE 2.4 – Plaquette (gauche) et Clé d'aile (droite)

2.1.2 Empennage

Pour l'empennage, nous avons choisi de réaliser un empennage classique monobloc, car il simplifie la réalisation et offre de la légèreté et une bonne manœuvrabilité. De plus, il permet d'utiliser une seule gouverne, donc un seul servomoteur, ce qui réduit le nombre de parties mobiles à six (trois moteurs et trois servomoteurs) pour contrôler tous les axes de rotation du drone, grâce au fonctionnement du VTOL.

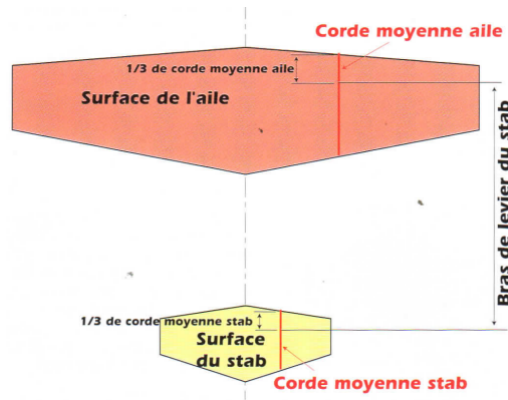


FIGURE 2.5 – Illustration pour comprendre le calcul

Il est réalisé avec des panneaux de mousse. Nous l'avons dimensionné en calculant le "volume de stabilisateur" (V_{stab}) pour obtenir une valeur de $V_{stab} = 0,665$, avec la formule suivante :

$$V_{stab} = \frac{SurfaceStab \cdot BrasDeLevier}{SurfaceAile \cdot CordeMoyenneAile}$$

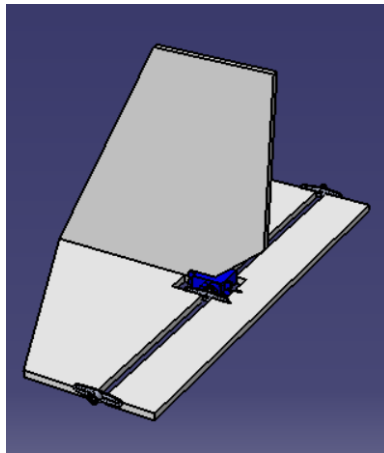


FIGURE 2.6 – Modélisation de l'empennage

2.1.3 Câblage

Le câblage électronique, fait sûr mesure, est pensé de tel sorte à ce que l'on puisse facilement et rapidement le défaire, dans le but de démonter le drone ou de changer des pièces en cas de problème.

2.1.4 Aile

Pour le profil de nos deux ailes, nous avons choisi le profil NACA 4412. En effet, c'est un profil qui est stable sans décrochage brutal du coefficient de portance. D'autre part, dans notre cas d'utilisation, nous ne faisons pas de voltige donc il n'aurait pas été judicieux de prendre un profil symétrique par exemple.



FIGURE 2.7 – Profil NACA 4412

Nous avons par la suite calculé la surface à l'air de notre aile. Pour cela, nous avons utilisé l'expression de la portance.

$$F_p = \frac{1}{2} \rho S C_z v^2$$

Avec C_z le coefficient de portance.
Nous déterminons ainsi la surface.

$$S = \frac{2F_p}{\rho C_z v^2}$$

Nous réalisons les calculs lorsque la force de portance égale celle du poids du drone : $F_p = P$. Avec une masse de $m = 1\text{kg}$, nous avons $F_p = 9,81\text{N}$. Nous choisissons un angle d'incidence de 6° ce qui nous donne un coefficient de portance $C_z = 1,2$.

Nous trouvons après application numérique une surface de $S = 1,265\text{m}^2$, avec $\rho = 1,292\text{kg/m}^3$ et $v = 10\text{m/s}$.

Nous décidons ainsi de dimensionner notre aile de 60cm de longueur et 20cm de large.

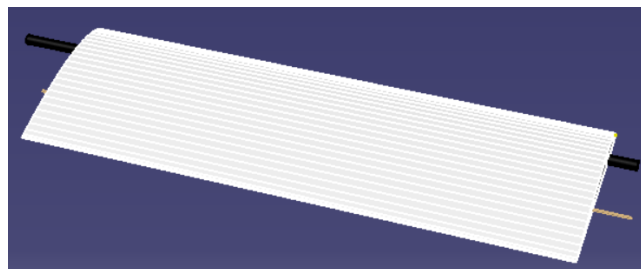


FIGURE 2.8 – Rendu 3D de l'aile sur Catia V5

Des tubes métalliques de 12mm de diamètre et 700mm de long traversant les ailes assurent la rigidité de ces dernières, ainsi que l'accueil des câbles et le support du mécanisme VTOL. Des tiges en bois de 2mm de diamètre reliées au fuselage traversent également l'aile pour assurer sa stabilité et sa rigidité.

2.1.5 Moteurs et système tilt-rotor

Notre VTOL, au départ composé de deux moteurs au bout de chaque aile, s'est vu affublé d'un troisième moteur sur l'axe de queue de l'appareil. Cela a permis de correspondre à un modèle de vol déjà enregistré sur le logiciel QGroundControl afin de faciliter son contrôle (Partie 3.2).

Les moteurs choisis sont des brushless Kyrio BR2212 1400KV, choisis pour leur faible taille et poids, ainsi que leur performance (800 grammes de poussée avec une hélice 9x4,7, alimenté en 11V). Chaque moteur est associé à un régulateur Brushless (modèle Reely Sky-Series 12A) adapté à la batterie 3S LiPo 5000mA qui vient alimenter le système.



FIGURE 2.9 – Moteur Kyrio BR2212 1400KV

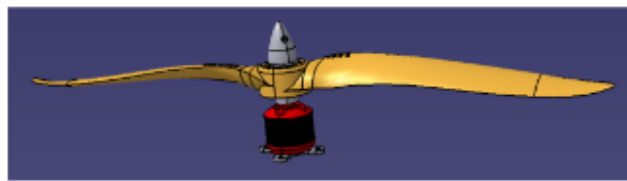


FIGURE 2.10 – Modélisation de l'assemblage moteur + hélice

Description du système tilt-rotor

On a finalement choisi de faire un système de transmission de puissance assez simple. Il est constitué d'un engrenage fixé au support moteur et d'un autre mobile fixé sur le servo moteur. Ce système permet au drone de combiner les avantages du décollage vertical (moteurs vers le haut : angle de 90°) avec la capacité de vol horizontal (moteurs en position horizontale : angle de 0°). Le moteur est fixé à l'aide d'une croix métallique sur son support imprimé en 3D à l'aide de vis.

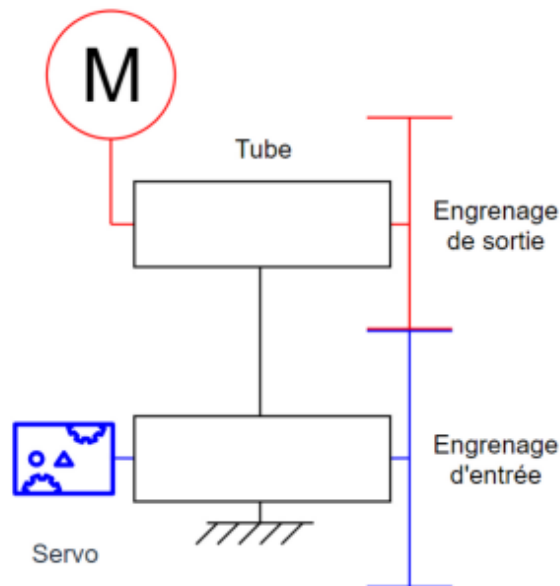


FIGURE 2.11 – Schéma cinématique du système moteur

Les dimensions des deux engrenages sont importantes. Celles-ci peuvent influencer sur le rapport de transmission à choisir en fonction du couple / vitesse de rotation voulu et la solidité des engrenages. Le rapport de transmission est défini ainsi :

$$r = \frac{\text{nombre de dents roue menante}}{\text{nombre de dents roue menée}} \quad (2.1)$$

Nous avons choisi un rapport de transmission de 1 car les micro-servomoteurs SG90 ont un couple de 1 kg.cm, c'est-à-dire un poids de 1 kg au bout d'une distance d'un centimètre. Cela est suffisant pour faire pivoter la partie liée au moteur même en considérant la force de portance liée à l'hélice sachant que le moteur peut tirer jusqu'à 800 g.

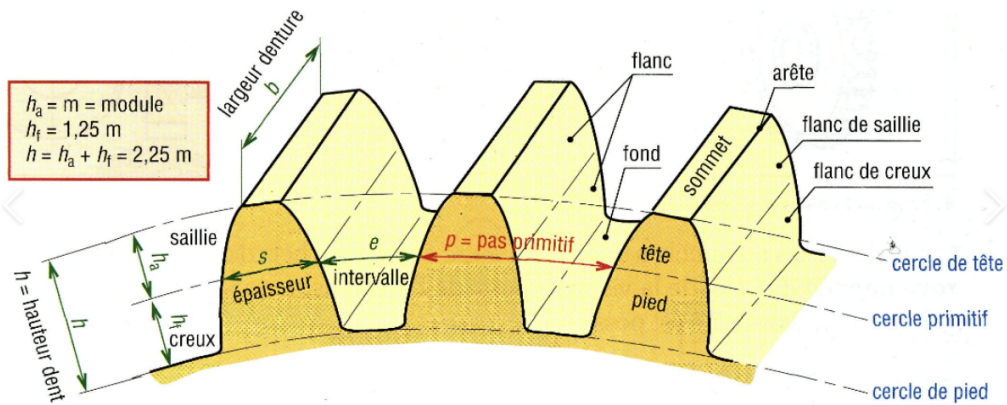


FIGURE 2.12 – Dimensionnement d'un engrenage

Calcul des dimensions des deux engrenages

- Angle de pression $\alpha = 20^\circ$
- Nombre de dents $Z = 13$

- Intervalle $e = \text{Épaisseur } s = \frac{p}{2} = 3,42 \text{ mm}$
- Pas primitif $p = \pi \cdot m = 6,85 \text{ mm}$
- Diamètre cercle de pied : $df = d - 2,5 \cdot m = 23,32 \text{ mm}$
- Diamètre cercle primitif : $d = m \cdot Z = 28,3 \text{ mm}$
- Diamètre cercle de tête : $da = d + 2 \cdot m = 31,24 \text{ mm}$
- Largeur des dentures $b : b = 6 \text{ mm}$
- Module $m : m = \frac{d}{Z} = 2,18 \text{ mm}$
- $ha = m = 2,18 \text{ mm}$
- $hf = 1,25 \cdot m = 2,72 \text{ mm}$
- Hauteur des dents $h = 4,9 \text{ mm}$

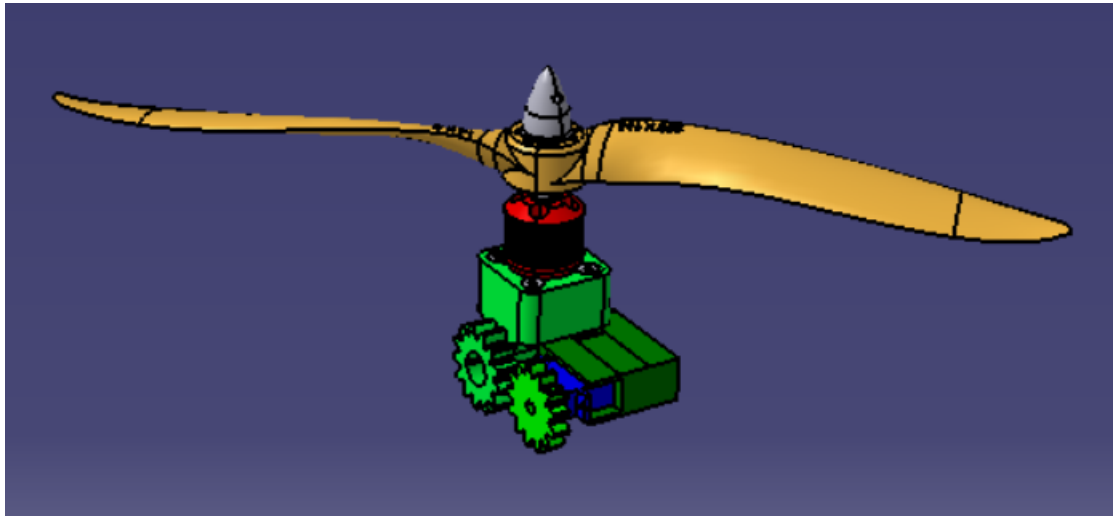


FIGURE 2.13 – Système tilt-rotor

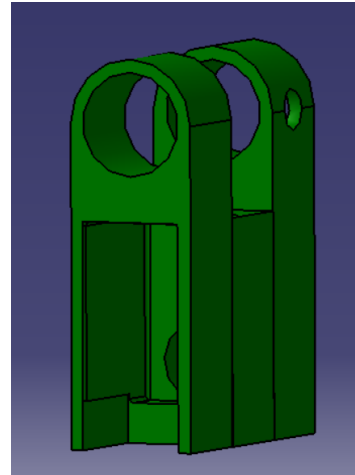
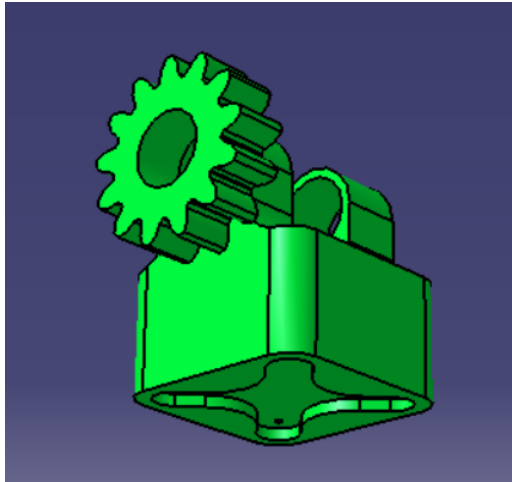


FIGURE 2.14 – Support moteur (gauche) et support servomoteur (droite)

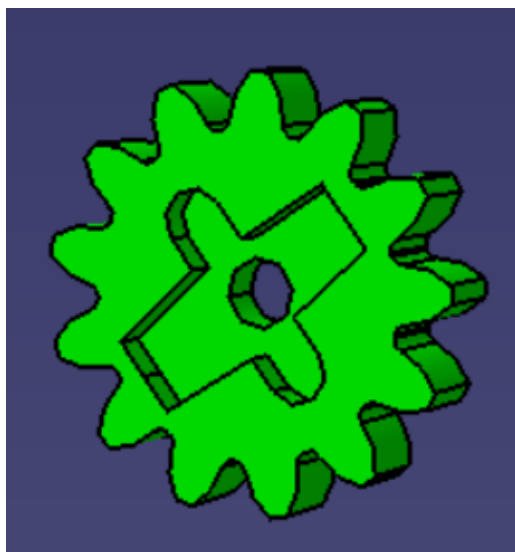


FIGURE 2.15 – Engrenage lié au servomoteur

Impression 3D Nous avons ensuite imprimé les pièces à l'aide d'une imprimante 3D. Nous avons utilisé du PLA. Le remplissage a été fixé à 20 ce qui donne des pièces solides et légères. Une attention particulière a été apportée à l'orientation des pièces avant l'impression 3D. C'est un élément crucial du processus de conception et de fabrication additive. En choisissant la bonne orientation, nous pouvons optimiser la qualité, la résistance, l'apparence et l'efficacité de la fabrication de nos pièces.

Remarque

En assemblant la pièce, on observe un petit jeu (quelques millimètres) qui n'empêche cependant pas au système tilt-rotor de fonctionner.

Concernant le moteur arrière ayant pour objectif de limiter le tangage du drone ainsi que de faciliter son élévation en mode hélicoptère, on a choisi un moteur fixe. Il est également fixé à l'aide d'une croix métallique sur son propre support imprimé en 3D à l'aide de vis.

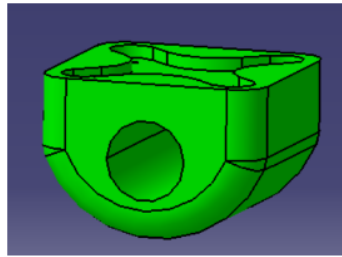


FIGURE 2.16 – Support moteur arrière

2.1.6 Poutre de liaison entre le fuselage et les moteurs

Nos systèmes moteurs sont reliés au fuselage par l'intermédiaire de tubes creux en aluminium. Pour cela, nous devons mener une étude pour choisir judicieusement les dimensions de ce tube.

Tout d'abord, nous choisissons un tube d'une longueur de 70cm qui prend en compte la longueur de l'aile (60cm) et le support moteur en bout de tube.

Dans un second temps, nous devons choisir le diamètre du tube. Nous avons donc fait une étude de résistance des matériaux afin de le déterminer en fonction de la limite d'élasticité de l'aluminium et les paramètres de notre système.

Cela nous a amené à calculer le diamètre dans trois cas (2.17) :

- Cas 1 : drone à l'arrêt, le tube supporte la force du poids (P),
- Cas 2 : drone en vol vertical, le tube supporte la force du poids (P) et la force moteur (F),
- Cas 3 : drone en vol horizontale, le tube supporte la force du poids (P) et la force linéique de la portance (w) sur toute l'aile.

Les résultats analytiques nous ont guidé à choisir un tube avec un diamètre supérieur 8mm afin de ne pas dépasser la limite d'élasticité de l'aluminium. Nous sommes parti sur un tube de 12mm car nous en avons à notre disposition et qu'il nous semblait adapter à nos besoins. En effet, les fils électroniques pour le moteur et le servomoteur doivent pouvoir circuler dans le tube.

Nous avons retenu un tube de 12mm car :

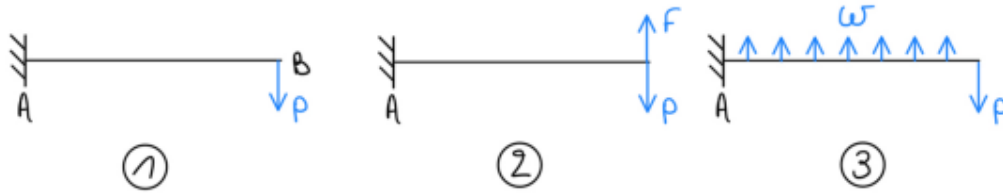


FIGURE 2.17 – Schémas des 3 cas d'étude de poutre en flexion

- il permet le passage des câbles d'alimentation et de commande des servomoteurs et des moteurs
- nous en avons à disposition

Nous avons mené nos expériences avec le tube de 12mm. Nous confirmons sa résistance à la flexion grâce aux résultats qui suivent.

Simulation de la flexion du tube sur Abaqus

Avant de réaliser des expériences qui pourraient potentiellement endommager notre prototype, nous faisons une simulation informatique permettant d'évaluer l'ordre de grandeur du poids maximal applicable en bout d'aile sans déformation irréversible. Nous avons réalisé cette simulation sur Abaqus. Nous avons utilisé les modélisations du tube et de l'aile aux dimensions de notre prototype lors de l'expérience. Nous avons pris le module d'Young de l'aluminium $E=70\,000\text{ MPa}$ et du polystyrène $E=3\,000\text{ MPa}$, ne connaissant pas ceux exacts de nos matériaux.

Nous avons réalisé la simulation pour une force en bout de tube correspondant à notre masse maximale (530g) lors de l'expérience. C'est-à-dire une force $F=5,2\text{N}$.

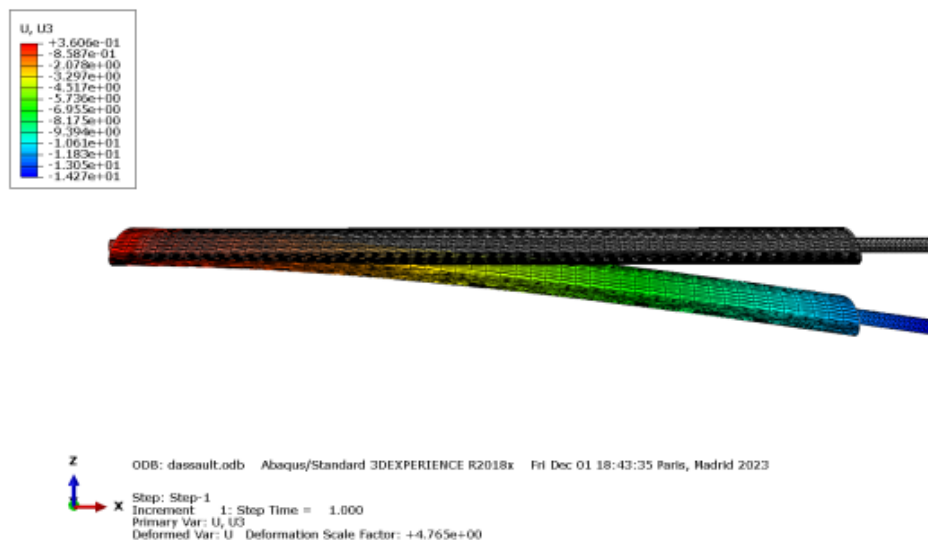


FIGURE 2.18 – Simulation sur Abaqus du déplacement du tube pour une masse de 530g

Nous obtenons un déplacement en bout du tube de 14,3mm.

Expérience de validation du dimensionnement du tube : contrainte de flexion

Le but de notre expérience est d'obtenir le déplacement de notre tube lorsque des efforts sont appliqués sur son extrémité libre. Pour cela, nous avons fixé l'extrémité du côté du fuselage pour avoir un encastrement. Nous avons réalisé notre mesure par photogrammétrie à l'aide d'une caméra. Nous avons mis en place des petites étiquettes, point blanc sur fond noir, qui servent de points de référence aux mesures.



FIGURE 2.19 – Montage pour l'expérience de flexion du tube

Nous avons d'abord fait l'acquisition d'une photo sans poids pour avoir la photo de référence. Puis, nous avons progressivement ajouter des masses au bout libre du tube pour réaliser plusieurs photos (130g, 230g, 330g, 430g, 530g). Sur le logiciel Gom Correlate 2018, nous avons sélectionné les points de référence sur l'image initiale. Puis, nous avons obtenu les résultats de flexion de notre tube pour les différentes masses.

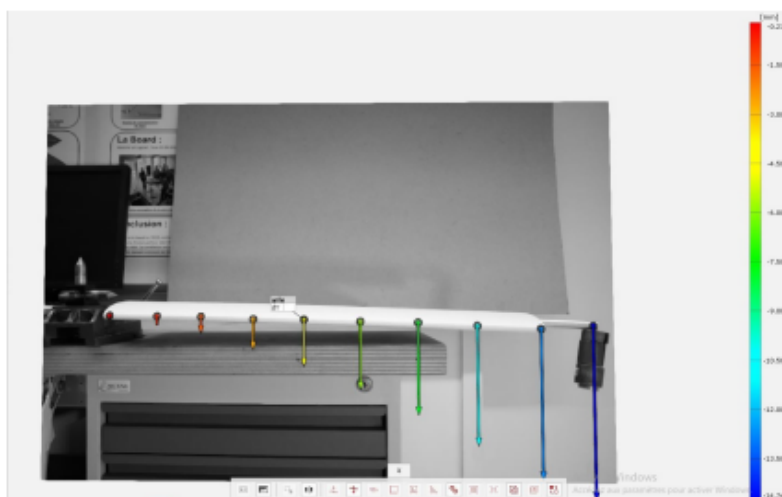


FIGURE 2.20 – Résultat du déplacement du tube pour une masse de 530g

Pour la masse la plus importante testée $m=530g$, nous avons obtenu un déplacement de 14,75mm. Ce résultat est satisfaisant car il confirme la cohérence du résultat obtenu par la simulation.

2.1.7 Hélices

Le choix de l'hélice fut difficile, car voulant réaliser un VTOL, il fallait que les trois hélices soient dans un premier temps capable de soulever l'appareil, ce qui nécessite une traction considérable, puis d'avoir également un bon rendement lors du passage en mode avion (pour les deux hélices au bout des ailes, qui basculent à 90 degrés, la troisième sur la queue restant fixe).

Nous avons décidé d'utiliser des hélices plastiques en raison du budget limité de l'appareil, ainsi que du fort risque de casse lors des premiers vols. Concernant la taille de l'hélice, le choix de notre moteur nous conseillait une hélice de taille 9x4,7, ce qui lui fournirait une poussée de 800g au maximum. En possédant 3, nous devrions donc en théorie pouvoir soulever notre drone qui ne pèsera pas plus de 2 kg. Nous avons toutefois fait le choix de prendre des hélices de taille 10x4.5 pour espérer avoir une meilleure traction au décollage en mode hélicoptère. Nous n'avions cependant dans la première commande pas pris en compte que nos deux moteurs au bout des ailes tournaient en sens inversé afin de garder le drone stable. Il a donc fallu une seconde commande avec des hélices de même taille mais avec un pas inversé.

2.1.8 Système de largage

Le but de notre robot est de délivrer une charge utile, qui dans notre cas est une bouée auto-gonflante. Nous avons alors conçu une nacelle placée sous l'avion pour la transporter et pouvoir la larguer en toute sécurité. Nous avons choisi la bouée OneUp, qui mesure 17 cm de longueur pour 5,7 cm de diamètre et pèse normalement 370 grammes. Nous la simulerons avec un cylindre de mêmes dimensions pour un poids de 500 grammes afin de répondre aux exigences de Dassault.



FIGURE 2.21 – Illustration de la bouée auto-gonflante OneUp

Le système de largage est constitué d'une nacelle imprimée en PLA. Le flanc est un trapèze mesurant 21 cm de long pour la base, 23 cm pour le "toit", et 6,3 cm de hauteur. La largeur de la nacelle est également de 6,3cm. Ces dimensions nous permettent d'insérer facilement la bouée sans pour autant qu'elle ne bouge en vol et ne déplace le centre de gravité de l'avion. Le plancher est, quant à lui, constitué d'une partie fixe (orange) et d'une partie mobile (bleue). La partie mobile pivote autour d'un petit pivot de 0.6cm de diamètre sur 2cm de long, fixé sur chaque côté. On évite ainsi un pivot faisant la largeur du plancher (6.3cm) et on économise quelques grammes.

La partie mobile est maintenue fermée en vol par un servomoteur, positionné sur la partie fixe, qui lui applique une pression par le dessous à l'aide d'un crochet. Lorsque le servomoteur pivote, plus rien ne retient le plancher qui tombe alors sous l'effet du poids de la bouée. Le plancher reste alors ouvert, n'ayant pas d'intérêt d'être refermé. Le système pourrait être amélioré avec des ressorts sur le plancher mobile pour le faire remonter seul une fois la charge larguée,

puis le servomoteur pivoterait alors de nouveau pour replacer le crochet sous le plancher mobile et le maintenir fermé.

Des cales sur le plancher fixe permettent de fixer le servomoteur et d'éviter que la bouée ne glisse vers l'avant de l'appareil. Nous avons de plus décidé de creuser les différents côtés de la nacelle pour gagner en masse. L'épaisseur de toutes les pièces est de 0,3 cm.

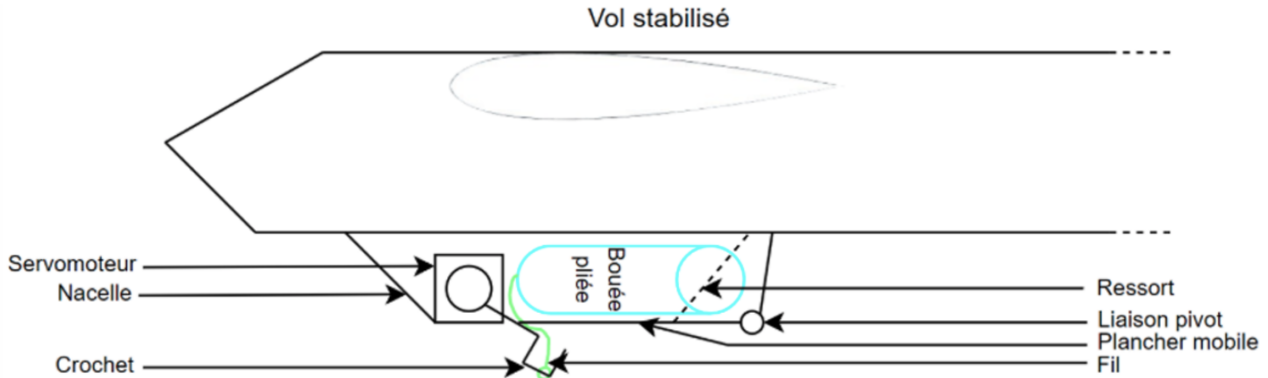


FIGURE 2.22 – Illustration du système de largage en vol stabilisé

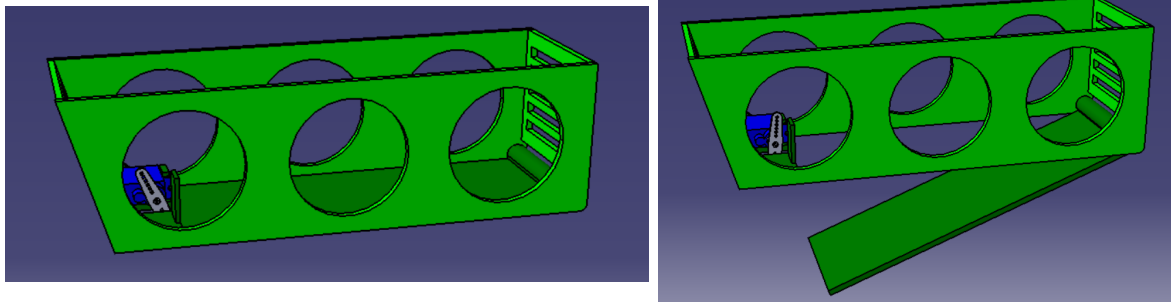


FIGURE 2.23 – Vue de la nacelle ouverte et fermée

2.2 Système embarqué

Le module GPS choisi est la u-block NEO-M8N. Ce dernier permet une précision de 0.6 mètres. Celle-ci repose principalement sur deux facteurs essentiels : premièrement, l'emploi de technologies avancées de traitement multi-fréquences GNSS (Global Navigation Satellite System), telles que GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou ; deuxièmement, une gestion dynamique de l'anti-brouillage et de la résistance aux interférences radioélectriques externes.

Cette combinaison de fonctions améliore significativement la qualité des signaux reçus, même dans des environnements difficiles où règnent généralement des conditions défavorables à la réception satellite optimale (zones urbaines densément construites, canyons artificiels créés par des gratte-ciel, etc.). Par conséquent, on peut compter sur des calculs de trajectoire plus précis et stables, minimisant ainsi les risques potentiels liés aux déviations imprévues lors du pilotage automatisé de notre appareil. Ce module fut commandé avec le pack Pixhawk pour s'assurer un branchement compatible.

De plus, la faible consommation d'énergie offerte par le module NEO-M8N joue également un rôle crucial dans notre décision, car elle contribue à prolonger l'autonomie globale de notre

drone.

Notre capteur de vitesse est un JST-GH - MS4525DO. Il est branché à un tube de Pitot qui mesure la pression totale et la pression statique, le capteur en déduit la pression dynamique et par conséquent la vitesse. Il a été choisi pour ses mesures précises de la vitesse et de l'altitude nécessaires au maintien de la stabilité en vol de notre drone. Outre ses attributs techniques, ce capteur présente l'avantage d'être entièrement compatible et certifiée conforme aux exigences du Pixhawk. Enfin, le capteur propose également des algorithmes sophistiqués de compensation thermique, permettant d'atténuer les perturbations causées par des variations de température ambiante ainsi que des vibrations mécaniques internes nuisibles engendrées par d'autres composants installés dans la nacelle.

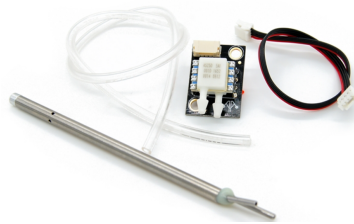


FIGURE 2.24 – Tube de Pitot et capteur de vitesse

Enfin, une ESP-32 est utilisée pour la communication wifi par télémétrie. Ce module est reconnu comme étant performant, polyvalent et fiable dans le domaine de la communication sans fil. Sa capacité à gérer simultanément plusieurs protocoles réseau fait de l'ESP-32 un choix idéal pour les communications WIFI longues distances telles que celles requises pour nos besoins en télémétrie et en reconnaissance avec notre Jetson nano.

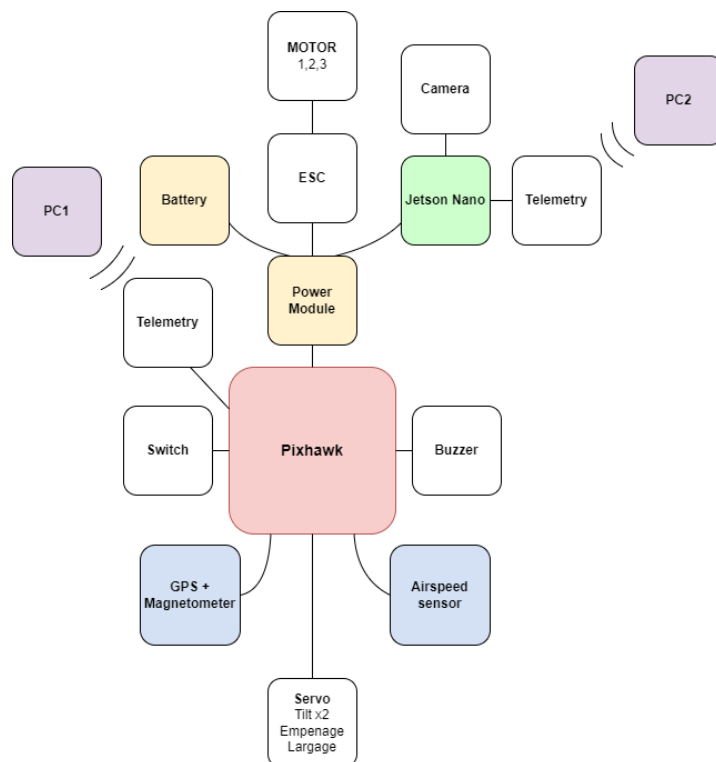


FIGURE 2.25 – Schéma des connexions Pixhawk

2.3 Logiciels de contrôle

Dans le cadre de notre projet, le choix du matériel et du logiciel de contrôle a été étudié pour garantir des performances optimales de notre drone. Notre solution repose sur une combinaison de logiciels et de composants très répandus dans l'industrie des drones autonomes.

Tout d'abord, en ce qui concerne le matériel, nous avons opté pour le Pixhawk [2] comme autopilote. Le Pixhawk est largement reconnu pour sa fiabilité et sa polyvalence, ce qui en fait un choix idéal pour notre application. Sa conception modulaire permet une intégration facile avec différents types d'airframes et de contrôleurs de vol, ce qui nous offre une grande flexibilité dans la conception de notre drone.

Pour le contrôleur de vol, nous avons choisi PX4[3], une plateforme de développement open source très populaire. Nous utilisons spécifiquement la version stable de PX4FMUv2.4.8 que nous avons flashée sur notre autopilote pour garantir la compatibilité et la stabilité de notre système. PX4 offre une large gamme de fonctionnalités avancées, notamment d'airframes, qui répondent à nos besoins en termes de contrôle et de navigation. PX4 est un choix privilégié pour notre projet en raison de son soutien par Dronecode[4], une organisation qui favorise le développement collaboratif de logiciels open source pour les drones, garantissant ainsi des mises à jour régulières et un support continu de la communauté.

En ce qui concerne le logiciel de contrôle au sol, nous avons retenu QGroundControl[5] pour sa simplicité d'utilisation et ses fonctionnalités avancées. QGroundControl nous permet de planifier des missions, de surveiller en temps réel le statut du drone, de configurer ses paramètres avec facilité et permet la connectivité via smartphone.

En résumé, notre choix de matériel et de logiciel de contrôle reflète notre engagement envers la qualité et la fiabilité de notre drone. En utilisant des composants éprouvés et bien intégrés, nous sommes confiants dans notre capacité à atteindre nos objectifs de manière efficace et sûre.

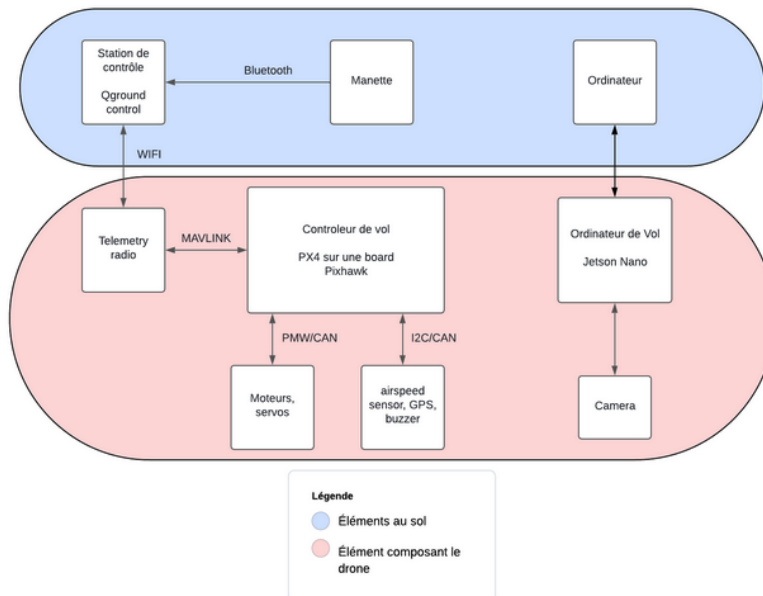


FIGURE 2.26 – Schéma des communications

Partie 3

Problèmes rencontrés

3.1 Point de départ

Nous avons été entravés par le fait de ne jamais avoir manipulé ce type de matériel précédemment, en effet tous les membres de l'équipe se sont découverts au modélisme avec ce projet, sans qu'il n'y ait d'anciens élèves pour transmettre leur savoir ou une base sur laquelle étudier.

L'association nouvellement créée pour l'occasion de ce projet a ainsi dû démarrer avec très peu de matériel et de connaissances en la matière. Il a alors fallu tout apprendre de zéro en avançant à tâtons, avec les erreurs que cela implique dans la création et le dimensionnement de certaines pièces, bien que nous remercier notre professeur référent Mr Ostre dans le conseil des matériaux, des mécanismes, et la réalisation des découpes.

L'apprentissage de QGroundControl fut également difficile, spécialement pour notre configuration initiale. En effet bien qu'internet existe, notre configuration était très peu utilisée et les données de références presque impossibles à trouver, d'où le choix d'un airframe différent, choix opté trop tardivement.

3.2 Choix d'un airframe viable

Dans le cadre de notre projet, nous avons entrepris des modélisations sur Gazebo, un environnement de simulation largement utilisé pour les drones. Ces modélisations visaient à simuler le parcours d'un bi-copter tilt-rotor [6] et à obtenir des retours sur son comportement à travers le logiciel QGround Control [5] ainsi que des visuels via Gazebo. Cependant, les résultats obtenus n'ont pas été aussi concluants que prévu.

Les simulations sur Gazebo semblaient prometteuses au départ, offrant un environnement virtuel et un modèle de bi-copter pour tester le comportement du drone. De même, le retour de parcours, de l'assiette et des paramètres de l'appareil sur Ground Control semblait fournir des données utiles pour évaluer sa performance.

Cependant, au fur et à mesure que nous avançons dans le projet, il est devenu évident que les modélisations sur Gazebo reflétaient une forte instabilité de la plateforme de vol. On remarquait une perte de contrôle chronique de l'appareil sur la majorité des modes. De plus, cela se confirmait sur Ground Control où les paramètres affichés ne correspondaient pas à nos attentes, ce qui a influencé l'abandon de la frame du bi-copter.

Malgré nos efforts pour utiliser les modélisations sur Gazebo avec le retour de parcours sur Ground Control, les résultats obtenus n'ont pas été suffisamment probants pour lancer avec certitude le développement de la partie contrôleur de vol.

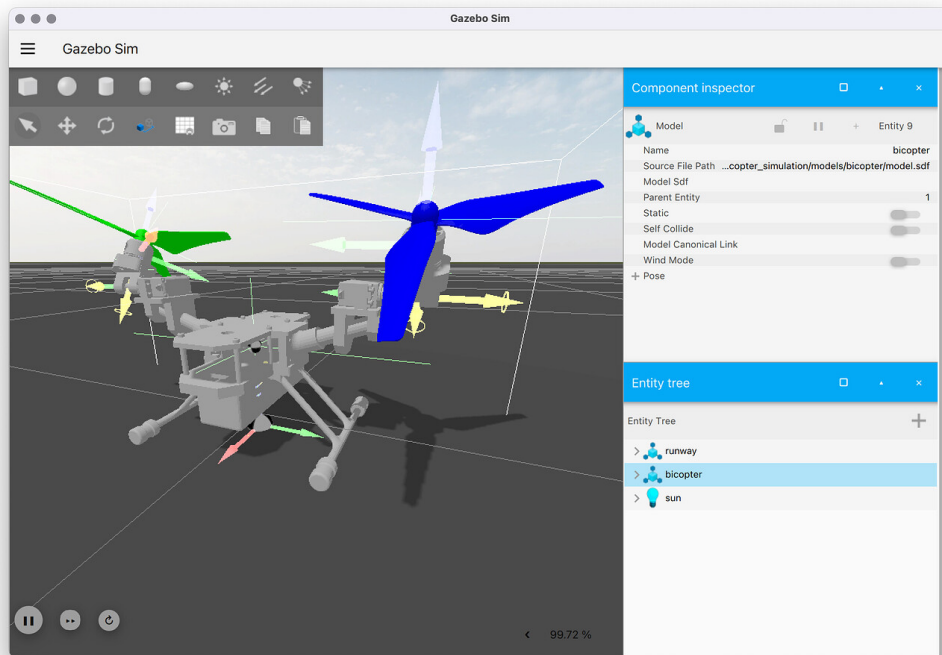


FIGURE 3.1 – Essai simulation SITL avec rendu Gazebo

Après avoir identifié les limitations des modélisations sur Gazebo et les retours sur Ground Control, nous avons pris la décision stratégique de revoir notre approche de conception. Au lieu de persister dans l'utilisation du bi-copter tilt-rotor, nous avons décidé de rechercher une alternative plus viable en nous inspirant des modèles actuels utilisés dans l'aéromodélisme. De plus, la constatation selon laquelle le développement complet de cette airframe n'existe dans aucun des contrôleurs de vols open source actuels a renforcé notre conviction quant à la nécessité de changer d'approche.

Dans cette optique, nous avons entrepris une évaluation minutieuse des différentes options d'airframes proposées par les différents contrôleurs de vols. Nous avons recherché des modèles qui répondaient à nos critères en termes de stabilité, de contrôle et de performances générales, notamment sur l'autonomie en vol. Après une analyse approfondie, nous avons identifié une airframe déjà créée, celle du generic VTOL tilt-rotor disponible via le contrôleur de vol PX4. Ce modèle comprend toujours les deux moteurs au bout des ailes et ajoute un troisième moteur sur l'axe central de l'appareil, à l'arrière du fuselage. Cela répondait à la plupart de nos besoins, nécessitant seulement quelques ajustements de la partie physique pour correspondre au maximum à notre modèle original.

3.3 Paramétrage du Pixhawk

Le Pixhawk est un des éléments nous ayant fait prendre du retard. Nous cherchions tout d'abord à tester ses sorties via QGroundControl avec de vieux servomoteurs et un moteur. Nous

avons alors branché la batterie sur l'adaptateur du pixhawk mais cela ne faisait pas tourner les servomoteurs. Alors nous avons branché la batterie sur l'ESC (variateur) du moteur mais une nouvelle fois rien ne se passait.

C'est lorsque que nous avons finalement branché la batterie sur la prise femelle de l'adaptateur du pixhawk, puis la prise mâle de l'adaptateur sur la prise femelle de l'ESC que le moteur s'est mis à tourner. Nous avons alors compris que les servomoteurs que nous utilisions pour nos tests étaient morts depuis longtemps, une fois remplacés nous avons maîtrisé comment fonctionnait les branchements du Pixhawk.

Partie 4

Estimation du coût

Matériel	Nombre	Prix à l'unité	Poids	Description
Raspberry Pi Caméra	1	60,45 €	9.8g	12MP - Résolution 1920x1080 - Fréquence 60 fps
Objectif camera	1	36,07 €	53g	3MP
Helices	2	12 €	3g	
Kyrio BR2212 1400KV	3	56,62 €	68g	Version 1400kv
Pack Pixhawk + ESP8266 + GPS	1	168,63€	350g	Version 2.4.8 Inclus les modules de télémétrie, le buzzer et le power module
ESC	3	29,90€	75g	35A
Airspeed Sensor	1	27,16€	33.8g	JST-GH - MS4525DO
Jetson Nano	1	289€	253g	
Batterie Li-po	1	69,90€	420.5g	4000mAh, 40C
Polystyrène	1	7.08€	15 kg/m ³	120 x 60 cm, ép.40 mm (ailes et empennage)
Tube aluminium	3	5,9€	100g/m	12x1x1000mm
PLA impression 3D	1	12,99€	1kg	
Manette Xbox Series	1	59.95€	345g	

Nous avons déjà les éléments suivants :

- Servomoteurs
- Moteurs pour les tests fonctionnels, cependant ils sont pas assez puissants pour soulever le drone avec sa charge utile.

Prix total : 706,47 € (Il est à noter que notre association part avec très peu de matériel initial).

Des frais annexes ont été engagé par l'association à hauteur de x euros afin de mener à bien le projet. (Convertisseur, tiges filetées, boulons, chargeur de batterie notamment...)

Poids : 892 grammes pour la motorisation et l'électronique, auquel il faudra ajouter les 500 grammes de la bouée, et la masse fixe du drone (polystyrène, fuselage en PLA et tubes) qui fera moins de 300 grammes. On arrive à une masse totale de 1692 grammes, inférieure à 1700 grammes.

4.1 Rendu final

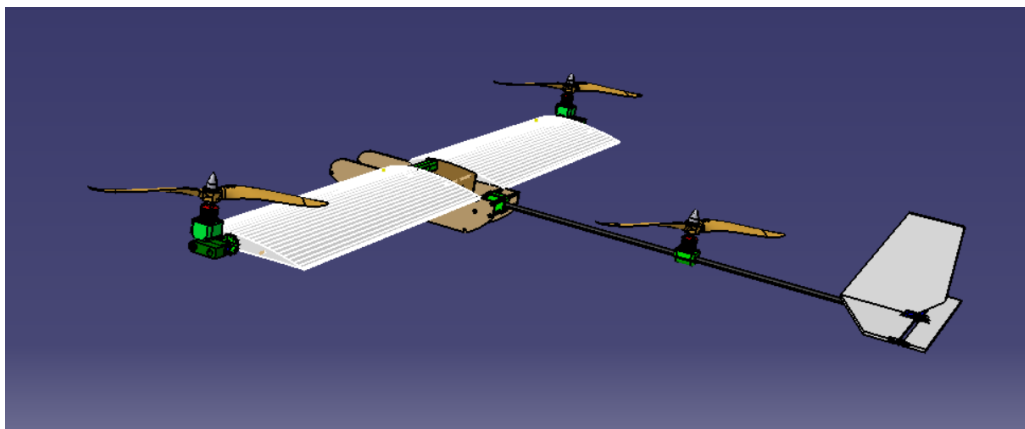


FIGURE 4.1 – VTOL en mode hélicoptère
(Vue arrière sans nacelle)

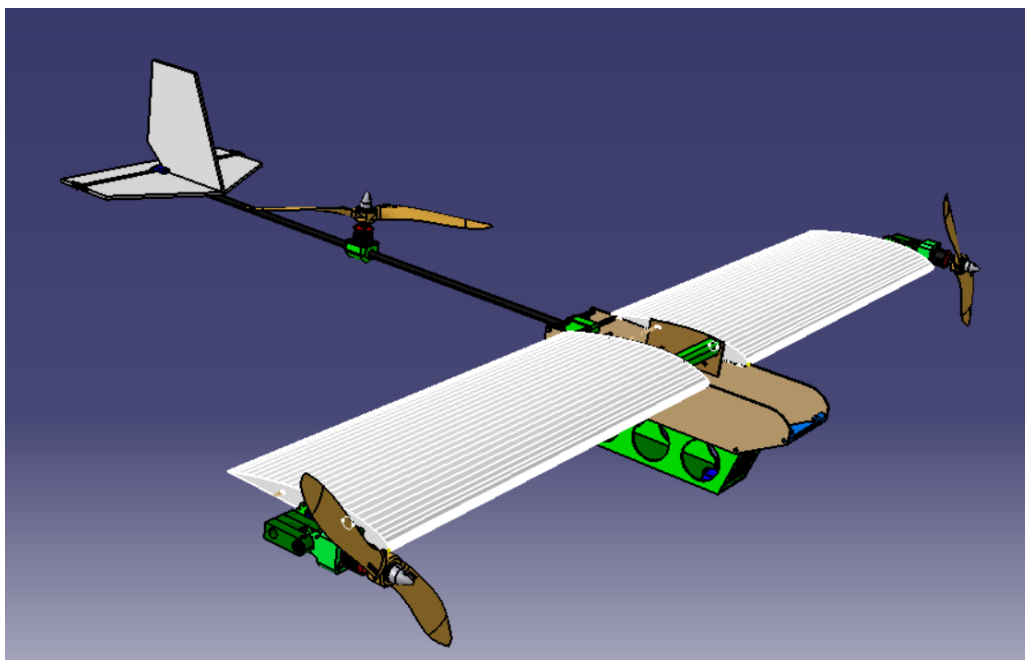


FIGURE 4.2 – VTOL en mode avion
(Vue avant avec nacelle)

Partie 5

Enseignements tirés

Les résultats n'ont donc pas été ceux escomptés lors de ce projet qui aura vu beaucoup de déboires. L'enseignement principal qu'il faut en tirer est d'apprendre à son rythme et de commencer par les bases du drone. Concevoir un VTOL aussi complexe, avec une caméra et un traitement d'image, était un projet trop complexe pour une équipe débutante comme la nôtre. Nous aurions dû partir sur un modèle de vol plus basique comme un avion ou un quadricoptère qui nous aurait permis d'avoir accès à davantage de données et de sûreté dans le choix des composants.

Nous ressortons toutefois de ce projet grandis des problèmes que nous avons pu rencontrer et surmonter. Ce concours nous a appris à relativiser les échecs et améliorer nos compétences en électronique et en mécanique. De plus, nous avons maintenant les connaissances et le matériel de base pour prolonger l'expérience et le développement de notre drone de notre côté. Nous espérons ainsi aller plus loin dans notre volonté d'obtenir un drone abouti pouvant effectuer sa mission avec précision. Ce projet nous a aussi motivé à perpétuer l'association l'année prochaine, afin d'attirer de nouvelles recrues et leur transmettre nos savoirs acquis tout au long de ce projet. C'est avec plaisir que nous participerons de nouveau l'année prochaine avec une base cette fois plus simple.

Conclusion

En conclusion, notre projet de drone VTOL est un projet ambitieux qui nécessite une attention toute particulière à de nombreux paramètres dont nous n'avons pour certains pas prévu les difficultés qu'ils pourraient engendrer par manques d'expérience. Avec l'aide de certains des encadrants de chez Dassault ainsi que d'enseignants et chercheurs au sein de notre établissement, nous avons tout de même pu proposer une maquette fonctionnelle de notre drone.

Bien que celui-ci ne puisse pas dans l'état actuel remplir sa mission dans les conditions définies au début du projet, nous avons réalisé des choix de conception qui assurent une base solide pour des ajouts et optimisations futures. Nous sommes confiants quant à la capacité de ce système à pouvoir être déployé après des améliorations que nous porterons à l'avenir.

Nous tenons à remercier sincèrement Dassault de nous avoir fait confiance et de nous avoir offert l'opportunité de présenter notre projet.

Bibliographie

- [1] Tom STANTON. *Optimizing a VTOL*. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=XPXN0QejqM0&t=971s>.
- [2] *Pixhawk*. URL : <https://pixhawk.org/>.
- [3] *PX4 Autopilot User Guide*. URL : <https://docs.px4.io/main/en/>.
- [4] *Dronecode*. URL : <https://dronecode.org/>.
- [5] *QGroundControl*. URL : <http://qgroundcontrol.com/>.
- [6] *Simulation Bicopter*. URL : https://github.com/GreenPine-CK/bicopter_simulation/blob/main/README.md.