

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

LABORATORY OF GREEN AND MECHANICAL
DEVELOPMENT - LGMD

Département Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Mécanique

**Étude, Conception, Simulation numérique,
et Réalisation d'un mini-hélicoptère**

BARAKA Slimane & SEDIKI Anis Hocine

Sous la direction de **Prof. Samir HANCHI & Prof. Arezki SMAILI**

Présenté et soutenu publiquement le (17/07/2024)

Composition du jury :

Président : Mr. Mohamed BENBRAIKA

Examineur : Dr. Abdelhamid BOUHELAL

Invité : Dr. Samir OUCHENE

Invité : Dr. M'hamed BOUSBAI

ENP 2024

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



L G M D

LABORATORY OF GREEN AND MECHANICAL
DEVELOPMENT - LGMD

Département Génie Mécanique

Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Mécanique

**Étude, Conception, Simulation numérique,
et Réalisation d'un mini-hélicoptère**

BARAKA Slimane & SEDIKI Anis Hocine

Sous la direction de **Prof. Samir HANCHI & Prof. Arezki SMAILI**

Présenté et soutenu publiquement le (17/07/2024)

Composition du jury :

Président : Mr. Mohamed BENBRAIKA

Examineur : Dr. Abdelhamid BOUHELAL

Invité : Dr. Samir OUCHENE

Invité : Dr. M'hamed BOUSBAI

ENP 2024

REMERCIEMENTS

On remercie le bon Dieu de nous avoir donné le courage et le pouvoir pour réaliser ce modeste travail et terminer nos études supérieures.

Nous remercions profondément nos encadrants, Pr. Samir HANCHI et Pr. Arezki SMAILI pour leurs conseils avisés et éclairés, ainsi que leur disponibilité durant toute la période du travail.

Nous tenant également à remercier le président de jury Mr. BENBRAIKA, l'examineur Dr. BOUHELAL et l'invité Dr. OUCHENE d'avoir accepté d'évaluer ce travail. C'est un honneur de les avoir dans le jury de ce projet modeste.

Nous remercions particulièrement aussi le responsable du « Fablab », M. Abdelkarim LAHLAH, pour son aide gracieuse et sa disponibilité lors de la réalisation de ce projet, M. Mohamed DAHAMA pour la réalisation des ailes volantes.

Nous remercions tous nos enseignants du département de génie mécanique qui ont assuré notre excellente formation au sein de l'École Nationale Polytechnique.

On remercie l'Incubateur de l'ENP pour leur support et leur orientation, notamment Mr. M'hamed BOUSBAI pour ses sages conseils, qui nous ont donné une vue éclairée sur les entreprises et les start-ups.

Nous remercions aussi l'École Polytechnique de l'Architecture et d'Urbanisme ainsi que l'entreprise Alcadworks pour nous avoir gracieusement donné accès à leur matériel d'impression 3D pour terminer ce travail.

On exprime enfin nos reconnaissances envers nos familles et nos camarades pour leur soutien tout au long de nos études.

خلاصة

الهدف من هذا المشروع هو تصميم حل للتطبيقات الزراعية باستخدام طائرات هليكوبتر صغيرة يتم التحكم فيها عن بعد. نظرًا للنمو السريع في مجال الطائرات بدون طيار وأنظمة الطيران الآلية، فإن الحل المقترح هو تكييف نموذج طائرة هليكوبتر صغيرة حالية وتعديله لجعله قادرًا على رش كمية من المبيدات الحشرية أو المنتجات الكيميائية تلقائيًا في منطقة زراعة معينة باستخدام مروحية صغيرة كمنصة. ويتضمن المشروع تصميم وتعديل أجزاء مختلفة لإضافتها إلى المروحية الصغيرة باستخدام برنامج CAD، وتحليل الخصائص الديناميكية الهوائية للنظام باستخدام محاكاة CFD لضمان الأداء الأمثل، وأخيرًا إنشاء نموذج عن طريق الطباعة ثلاثية الأبعاد ليكون جاهزًا للاستخدام. المستخدمة في الاختبارات العملية المستقبلية. وأثبتت نتائج المحاكاة الديناميكية الهوائية أن التطبيق ممكن من الناحية النظرية، في حين سُلط إنشاء النموذج الضوء على العديد من الصعوبات التي يجب التغلب عليها لتحويل المشروع إلى واقع.

الكلمات المفتاحية: التحليل الديناميكي الهوائي، التعديل التحديتي، المحاكاة العددية، الطائرة بدون طيار، التصميم بمساعدة الكمبيوتر.

Abstract

The ultimate aim of this project is to design and manufacture a remote controlled helicopter for agriculture applications. Given the rapid growth in the field of drones and automated flying systems, the solution proposed involves the adaptation of an existing mini-helicopter model and retrofitting it to make it capable of spraying a quantity of pesticide and other chemicals on a given plantation area automatically using the mini-helicopter as platform. The project includes designing and modifying different parts to be added to the mini-helicopter using CAD, analyzing the aerodynamic characteristics of the system using CFD simulation to insure optimized performance, and finally realizing a model using 3D printing for use in future practical tests. The aerodynamic simulation's results have proven the application theoretically possible, while the creation of the model highlighted many difficulties that must be overcome in order to bring the project into reality.

Keywords: Aerodynamic analysis, Retrofit, Numerical simulation, Drone, Computer-assisted design.

Résumé

L'objectif ultime de ce projet est de concevoir et réaliser un mini-hélicoptère télécommandé pour des applications en agriculture. Étant donné la croissance rapide dans le domaine des drones et des systèmes de vol automatisés, la solution proposée consiste à adapter un modèle de mini-hélicoptère existant et à le moderniser par retrofit pour le rendre capable de pulvériser automatiquement une quantité de pesticides ou de produits chimiques sur une zone de plantation donnée en utilisant le mini-hélicoptère comme plateforme. Le projet comprend la conception et la modification de différentes pièces à ajouter au mini-hélicoptère à l'aide de la CAO, l'analyse des caractéristiques aérodynamiques du système à l'aide de la simulation CFD pour garantir des performances optimisées, et enfin la réalisation d'un modèle par impression 3D à utiliser dans de futurs tests pratiques. Les résultats de la simulation aérodynamique ont prouvé que l'application était théoriquement possible, tandis que la création du modèle a mis en évidence de nombreuses difficultés qui doivent être surmontées pour concrétiser le projet.

Mots clés : Analyse aérodynamique, Retrofit, Simulation numérique, Drone, Conception assisté par ordinateur.

TABLE DES MATIÈRES

Page

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION.....	9
1. Généralité sur les mini-hélicoptères.....	12
1.1. Définition d'un mini-hélicoptère.....	13
1.2. Historique.....	14
1.3. Applications des mini-hélicoptères.....	14
1.4. Principe de fonctionnement.....	15
1.4.1. Système de propulsion.....	15
1.4.2. Système de rotor.....	16
1.4.3. Structure.....	17
1.4.4. Système électrique/électronique.....	18
1.4.5. Système de commande.....	18
1.5. Type de mini-hélicoptères.....	19
1.5.1. Monorotor à rotor de queue.....	19
1.5.2. Birotor coaxial.....	20
1.5.3. Quadricoptère/multirotor.....	20
2. Processus et Méthodologie de Rétrofit.....	22
2.1. Rétrofit.....	23
2.2. Exemples réels de mini-hélicoptères utilisés dans l'industrie.....	24
2.3. Rétrofit et modifications sur la T-REX 550E PRO.....	26
2.4. Calcul de la vitesse de rotation des pales.....	27
3. Conception et Réalisation d'une Maquette.....	29
3.1. Conception et modification.....	30

3.1.1.	Le réservoir.....	30
3.1.2.	Le train d’atterrissage.....	32
3.1.3.	Automatisation et commande.....	32
3.2.	Impression 3D.....	33
3.3.	Réalisation des pièces et assemblage.....	33
4.	Analyse Aérodynamique et Simulation Numérique.....	36
4.1.	Analyse aérodynamique : Définition et rappel théorique.....	37
4.2.	Simulation numérique.....	39
4.2.1.	Modèle mathématique.....	39
4.2.2.	Loi de paroi.....	40
4.3.	Étude CFD.....	41
4.3.1.	Création du domaine de calcul.....	41
4.3.2.	Maillage.....	43
4.3.3.	Déroulement des simulations et calculs.....	44
4.4.	Résultats.....	44
4.4.1.	Force de portance.....	44
4.4.2.	Puissance nécessaire.....	45
4.4.3.	Calcul de l’autonomie.....	46
4.4.4.	Pression appliquée sur les pales.....	49
4.4.5.	Conclusion et commentaire.....	49
5.	Start-up et Business Model.....	51
5.1.	Introduction.....	52
5.2.	Partition.....	52
5.2.1.	Bureau d’études.....	52
5.2.2.	Atelier de fabrication.....	53
5.2.3.	Unités et machines.....	53
5.2.4.	Unité spéciale R&D.....	56
5.3.	Business Model.....	56

5.4. Analyse PESTEL.....	60
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	62
RÉFÉRENCES.....	63
ANNEXES.....	66

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Exemple d'un drone d'agriculture fabriqué par DJI Agriculture

Figure 1.1 - Exemple d'un mini-hélicoptère radiocommandé

Figure 1.2 - Graupner Bell 212 (1973)

Figure 1.3 - Moteur sans balais d'un mini-hélicoptère

Figure 1.4 - Plateau cyclique simple d'un mini-hélicoptère

Figure 1.5 - Mini-hélicoptère coaxial « Big Lama »

Figure 1.6 - DJI Phantom 4 quadcopter

Figure 2.1 - ALIGN T-REX 550E PRO DFC

Figure 2.2 - ALIGN E1 PLUS Agricultural Helicopter

Figure 2.3 - Modèle 3D de la T-REX 550E PRO DFC sur GrabCAD

Figure 2.4 - Vue de coupe du châssis montrant le pignon moteur et la roue principale

Figure 3.1 - Conception du réservoir

Figure 3.2 - Dimensions modifiées du train d'atterrissage

Figure 3.3 - Imprimantes 3D utilisées. (a) : CR-10 Smart, (b) : Neptune 4 Max

Figure 3.4 - Quelques pièces imprimées

Figure 3.5 - Maquette du mini-hélicoptère

Figure 4.1 - Forces aérodynamiques soumis sur un hélicoptère

Figure 4.2 - Domaine de calcul

Figure 4.3 - Maillage du domaine rotatif montrant le raffinement au niveau des pales

Figure 4.4 - Distribution de la valeur de y^+ le long des pales pour l'essai #3

Figure 4.5 - Puissance fournie en fonction de la de la masse soulevée

Figure 4.6 - Distribution de la pression relative le long de la pale

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 - Coordonné du centre de gravité sans réservoir.

Tableau 3.2 - Coordonnés du centre de gravité avec le réservoir rempli.

Tableau 3.3 - Caractéristique mécanique et paramètre d'impression de quelques filaments

Tableau 4.1 - Évolution de la valeur de portance en fonction du raffinement du maillage.

Tableau 4.2 - Variation de la force de portance en fonction de l'angle d'incidence.

Tableau 4.3 - Puissance nécessaire pour faire tourner le rotor en fonction de l'angle d'incidence.

Tableau 4.4 - Puissance spécifique en fonction de la force de portance générée.

NOMENCLATURE

P	Puissance	(W)
ω	Vitesse angulaire	(rad/s)
Ω	Vitesse de rotation	(tr/min)
Ω_m	Vitesse de rotation fournit par le moteur	(tr/min)
m	Masse	(kg)
η	Rendement	(%)
u_i	Composant de vitesse	(m/s)
ρ	Densité	(kg/m ³)
μ	Viscosité dynamique	(kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
C	Couple	(N.m)
V	Tension	(V)
I	Intensité de courant	(A)
Q	Capacité de la batterie	(Ah)

INTRODUCTION

La croissance exponentielle qu'a vécue la population humaine durant le dernier siècle [1], plus remarquable dans les pays du tiers monde, ainsi que la diminution des terres disponibles pour l'agriculture [2], et face à l'expansion urbaine et les avancées de la technologie qui nécessite plus en plus d'infrastructures, pose un défi exceptionnel : comment répondre aux besoins alimentaires de cette population ? En effet, la pensée prédominante a toujours été que l'avancement technologique est l'ennemi de l'environnement et des ressources naturelles. Mais plusieurs pays ont déjà montré qu'une vision guidée vers le développement durable et la protection de l'environnement est nécessaire pour la protection des ressources limitées et l'augmentation de la qualité de vie humaine.

Étant donné l'avancement rapide qu'a vu le domaine des aéronefs télécommandés, ou bien appelé drones, plusieurs domaines industriels aujourd'hui cherchent à implémenter des solutions innovantes en utilisant les drones et les mini-hélicoptères comme plateforme [3]. Ces systèmes complexes et robustes offrent un moyen de transport rapide et efficace et permettent d'introduire un niveau de contrôle plus élevé dans plusieurs industries. Une application très intéressante de ces engins est donc envisagée dans le domaine de l'agriculture, notamment dans l'inspection des plantes et la veille sur la santé et la qualité de la récolte, mais aussi dans la protection active des ressources agricoles. Une utilisation très récente qui a vu une grande adoption dans la Chine [4] et les pays agricoles est l'utilisation des mini-hélicoptères pour l'application des pesticides et divers produits chimiques sur une ou plusieurs zones de plantation spécifiques. Cette solution offre aux agriculteurs et aux exploitants plus de contrôle sur la qualité, un temps réduit pour l'application des produits, des coûts plus bas pour la formation de la main d'œuvre, car ces mini-hélicoptères peuvent être programmés pour couvrir une zone précise sans intervention humaine.



Figure 1 – Exemple d'un drone d'agriculture fabriqué par DJI Agriculture [4]

La vaste zone désertique de l'Algérie limite les activités agricoles. Environ 17% des terres du pays sont utilisées pour l'agriculture, l'une des proportions les plus faibles d'Afrique [5]. Cependant, en chiffres absolus, la superficie agricole de notre pays couvre environ 41 millions d'hectares, ce qui la classe au neuvième rang du continent. En 2019, près de 80% de la superficie agricole totale était constituée de prairies et de pâturages permanents, tandis que les cultures permanentes occupaient 2,5% de la superficie [5]. L'Algérie consacre la plupart de ses terres agricoles à la culture de certains produits agricoles clés, notamment les céréales, les olives et les dattes [5].

La perspective d'utiliser les mini-hélicoptères dans l'agriculture en Algérie est donc une idée qui doit être prise au sérieux si nous voulons bien exploiter les ressources naturelles et être en avance sur les autres pays dans le domaine de l'automatisation et de la modernisation de l'agriculture. Les méthodes de cultivations traditionnelles employées dans notre pays impliquent des coûts élevés, une utilisation inefficace de produits chimiques comme les pesticides, et des risques pour la sécurité et la santé des travailleurs.

Il est donc intéressant d'essayer d'appliquer une solution technologique pour résoudre les problèmes qui tourmentent le secteur agricole depuis des décennies, et le rapprocher à la réalité d'aujourd'hui.

Ce mémoire est structuré sur 5 chapitres de la manière suivante :

Chapitre 1 : Ce chapitre couvrira les généralités sur les mini-hélicoptères, et vise à mettre en valeur les différents aspects de ces engins, leurs avantages et inconvénients, expliquera leur principe de fonctionnement général, et démontrera les différents types de mini-hélicoptères utilisés dans l'industrie. Ce chapitre abordera aussi les différentes applications des mini-hélicoptères pour mettre en valeur la diversité et l'utilité de ces aéronefs comme plateforme rapide, robuste et fiable.

Chapitre 2 : Ce chapitre montrera les étapes suivies pour faire le retrofit d'un modèle existant expliquera les critères suivis pour faire la sélection du modèle de base. Ce chapitre mettra en valeur les aspects du nouveau design, afin de démontrer son impact sur la stabilité du mini-hélicoptère.

Chapitre 3 : Ce chapitre montrera la nouvelle conception et les modifications apportées au modèle existant et montrera aussi les étapes pour faire la réalisation d'une maquette de test par impression 3D, tout en illustrant les difficultés liées à la réalisation d'un modèle réel.

Chapitre 4 : Ce chapitre portera sur les simulations numériques des propriétés aérodynamiques du mini-hélicoptère, en analysant la possibilité que ce dernier soit assez performant pour accomplir la tâche pour laquelle il a été conçu.

Chapitre 5 : Ce chapitre expliquera les aspects économiques et légaux de notre start-up consacrée à l'étude, au prototypage et à la fabrication des solutions dans le domaine de la mécanique généralement et de l'aéronautique spécifiquement.

Chapitre 1.

Généralité sur les Mini- Hélicoptères

1.1. Définition d'un mini-hélicoptère

L'adoption des hélicoptères dans le domaine militaire a démontré l'importance cruciale d'un engin volant qui offre la capacité de décoller et atterrir verticalement sur quelconque terrain, ainsi que la stabilité durant le vol et la possibilité de se déplacer librement dans toutes les directions, mais aussi la capacité de rester immobile sur place.

Avec le développement rapide du dernier siècle dans le domaine de l'automatique et de la commande à distance, les grandes utilités que les hélicoptères offrent restent aussi désirables pour des systèmes automatiques et moins complexes de taille réduite. Ces engins peuvent ainsi être employés dans divers domaines auxquels il est favorable d'utiliser un système volant qui porte les caractéristiques d'un hélicoptère, sans équipage à bord, et ayant la capacité d'accomplir des tâches spécifiques. On appelle ces systèmes les drones hélicoptères ou mini-hélicoptères.

Les mini-hélicoptères sont des modèles réduits d'hélicoptères sans équipage qui peuvent être automatiquement contrôlés ou manuellement télécommandés. Ces engins varient dans leur taille, leur masse et leurs dimensions, dépendant de leurs spécifications, de quelques centimètres à environ quelques mètres et d'une masse de plusieurs grammes à quelques kilogrammes. Les mini-hélicoptères offrent une grande utilité dans plusieurs domaines selon leurs conceptions et performances : les mini-hélicoptères peuvent être équipés d'un ou plusieurs accessoires qui servent à accomplir des tâches spécifiques, comme les caméras, les capteurs, ou des modules pour livraison de petits objets ou transport et application des pesticides sur un champ.

Ces aéronefs à construction complexe sont capables de réaliser des manœuvres de vol qui ne sont pas réalisables avec les hélicoptères de taille réelle. La taille des mini-hélicoptères réduite ainsi que leur poids très léger permettent d'avoir un contrôle plus précis sur le mouvement, soit par radiocommande ou par commande automatique (programmation d'une trajectoire de vol).



Figure 1.1 - Exemple d'un mini-hélicoptère radiocommandé [6]

1.2. Historique

Il existe dès le XVIIIe siècle les premiers modèles réduits d'hélicoptères à moteur (mécanisme d'horlogerie ou ressort), mais ils n'étaient évidemment pas radiocommandés. C'est en 1907, après une longue période de recherche, que l'hélicoptère a pu se soulever avec un pilote, pour prendre véritablement son essor après 1945, éclipsant les modèles réduits. Dieter Schlüter a développé le premier véritable hélicoptère radiocommandé en 1969 [7]. Son hélicoptère a été fait voler sur deux vols de 5 secondes, à 3 mètres du sol [8].

Le Bell 222 a été le premier modèle commercialisé en 1977. Il s'agissait du premier hélicoptère radiocommandé à ne pas utiliser de courroie. Le record (non officiel) a été battu avec un vol de 10 min 36 s [8]. Avec ce même modèle, le record officiel a été de 27 min 51 s de vol sur un circuit de 11,5 km en juin 1970. Le Twin Jet de Graupner a été le premier hélicoptère radiocommandé à traverser la Manche avec un moteur thermique de 10 cm³ et un pas collectif. Par la suite, plusieurs modèles ont été vendus avant d'atteindre les hélicoptères standards sur le marché.



Figure 1.2 - Graupner Bell 212 (1973) [9]

1.3. Applications des mini-hélicoptères

Il existe plusieurs types de mini-hélicoptères, selon les différentes applications que l'engin peut accomplir :

- Photographie : Les mini-hélicoptères peuvent être équipés d'une ou plusieurs caméras, pour faire la photographie aérienne ou la surveillance des terrains et périmètres dans le domaine de la sécurité personnelle ou nationale.

- Livraison des marchandises : Les petits objets et marchandises peuvent être livrés aux domiciles des clients en utilisant une flotte de mini-hélicoptères équipés de GPS et automatiquement guidés.
- Inspection et contrôle d'état des structures comme les ponts, les barrages, les buildings, et les grandes structures où l'accès pour un superviseur spécialiste peut être difficile ou dangereux.
- Agriculture : Les mini-hélicoptères sont utilisés pour l'inspection des récoltes et les terres agricoles, ainsi que l'application des pesticides ou des substances nécessaires pour assurer la santé des plantes en se concentrant sur une partie du terrain où il est favorable d'augmenter le dosage de ces produits.
- Protection de l'environnement comme la détection précoce des feux des bois, soit visuellement en détectant la fumée ou à l'aide des caméras thermiques infrarouges pour trouver la source de la chaleur. Il est aussi possible d'équiper les mini-hélicoptères par des capteurs de polluants pour faire une analyse sur l'état de propreté d'air ou des eaux dans une région.
- Test et analyse des propriétés aérodynamiques des géométries et formes complexes destinés à être utilisés sur les hélicoptères à taille standard, sur des modèles réduits, en utilisant par exemple une soufflerie.

1.4. Principe de fonctionnement

Comme les hélicoptères à taille typique, les mini-hélicoptères consistent de plusieurs sous-systèmes complexes qui gèrent un fonctionnement spécifique de l'aéronef.

En général, on peut citer cinq systèmes essentiels : 1. Système de propulsion. 2. Système des rotors. 3. Structure. 4. Système électrique (dans le cas d'un mini-hélicoptère à moteur électrique, la batterie fait partie du système de propulsion, car elle fournit la puissance nécessaire pour faire tourner le rotor). 5. Système de commande.

1.4.1. Système de propulsion

C'est le système le plus important dans un mini-hélicoptère, car il génère la puissance nécessaire pour faire voler l'aéronef. Dans le cas d'un mini-hélicoptère électrique, ce système est composé d'un moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en une énergie mécanique pour faire tourner les rotors à des vitesses élevées afin de générer la portance. Ces

moteurs sont alimentés par une batterie qui doit avoir la capacité de fournir l'énergie nécessaire pour assurer le vol du mini-hélicoptère pour quelques minutes à quelques heures.

Le système de propulsion peut être aussi alimenté par des moteurs thermiques qui génèrent une puissance plus grande, mais aussi des vibrations plus importantes. Dans les mini-hélicoptères thermiques, le système consistera aussi en un sous-système de carburation qui sert à contrôler la consommation du carburant durant le vol.



Figure 1.3 - Moteur sans balais d'un mini-hélicoptère [10]

Le fonctionnement d'un mini-hélicoptère repose sur le système de propulsion, qui comprend des moteurs puissants, des hélices bien élaborées, des contrôleurs de vitesse précis et des batteries performantes afin de fournir la portance et la poussée requises pour le vol. Cependant, ce système est très sensible pour quelconque changement dans la taille ou le poids du mini-hélicoptère, il est donc nécessaire de dimensionner le moteur et la batterie pour assurer les performances optimales et faire l'équilibre entre le poids total et la poussée générée.

1.4.2. Système de rotor

Le système des rotors consiste du rotor principal et le rotor anticouple dans certains modèles. Les rotors sont composés principalement des hélices, et un système de transmission qui traduit la puissance fournie par le moteur à une rotation des hélices, ainsi que le servomoteur et le plateau cyclique qui permettent de contrôler l'angle d'incidence du rotor principal [11].

Les hélices du rotor doivent être équilibrées pour minimiser les vibrations et sont choisies en fonction des performances désirées du mini-hélicoptère. Leur taille et leur forme aérodynamique assurent la génération de la poussée en fonction de différents angles d'incidence.

Le plateau cyclique est une partie essentielle du rotor, il contrôle le mouvement vertical et horizontal du mini-hélicoptère, ainsi que son inclinaison en roulis et en tangage. Le plateau

modifie continuellement l'angle d'incidence des pales comme réponse aux commandes de vols pour contrôler le mini-hélicoptère.

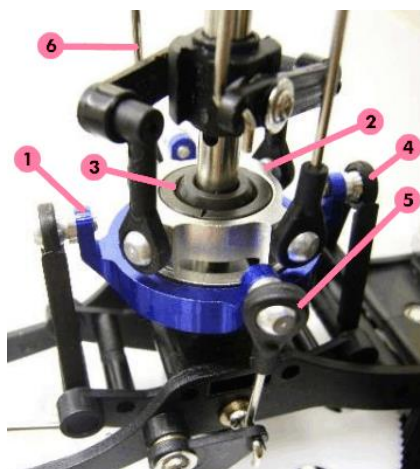


Figure 1.4 - Plateau cyclique simple d'un mini-hélicoptère [12]

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 1. couronne fixe (bleu) | 4. tige de commande (tangage) |
| 2. couronne mobile (argent) | 5. tige de commande (roulis) |
| 3. roulement | 6. bielle de pas (vers la pale) |

Le système consiste aussi de rotor de queue, ce rotor sert à stabiliser le mini-hélicoptère en générant une force latéral qui contre le couple produit par le rotor principal, ce qui aide à mieux contrôler le fuselage en ajustant l'angle d'incidence des hélices du rotor à queue et permet de tourner le mini-hélicoptère autour de son axe.

1.4.3. Structure

La structure d'un mini-hélicoptère doit être rigide pour résister aux forces aérodynamiques que subit l'aéronef durant son vol, mais aussi légère pour ne pas affecter la maniabilité et les performances du mini-hélicoptère.

La structure générale d'un mini-hélicoptère consiste d'un châssis rigide qui abrite les composants internes comme le moteur, la batterie, les systèmes de transmission et les différents composants électroniques, tout en minimisant les vibrations. Le châssis est souvent fabriqué en matière légère et forte comme les alliages d'aluminium et les matériaux composites comme les fibres de carbone ainsi que les plastiques renforcés de fibres [11].

Une autre partie de la structure d'un mini-hélicoptère est le train d'atterrissage situé au pied du fuselage et qui sert à stabiliser le mini-hélicoptère sur le sol, à absorber les chocs durant l'atterrissage. Le train doit être rigide et assez élevé afin de protéger les accessoires liés au

fuselage comme les caméras ou les réservoirs attachés. Le train est fabriqué en matériaux rigides et malléables qui peuvent absorber les impacts comme les plastiques et l'aluminium.

1.4.4. Système électrique/électronique

Le système électrique réfère aux différents composants essentiels et accessoires du mini-hélicoptère qui sont alimentés par la batterie.

La batterie elle-même est la source principale d'énergie pour un mini-hélicoptère à moteur électrique. Elle alimente tout le circuit et composant électronique comme les capteurs et les servomoteurs et détermine l'autonomie du mini-hélicoptère (la durée ou la distance maximale que peut parcourir le mini-hélicoptère par unité d'énergie consommée).

Un contrôleur de vitesse électronique commandé par le contrôleur de vol régule la puissance fournie au moteur et, par conséquent, la vitesse de rotation des hélices et la portance générée par le rotor. Un servomoteur rapide et réactif fait aussi partie de ce système et sert à contrôler les angles des pales du rotor.

1.4.5. Système de commande

Le contrôle du mini-hélicoptère est une procédure complexe qui fait appelle à plusieurs composants qui sert à traduire les commandes du pilote à des actions que le mini-hélicoptère peut exécuter afin de contrôler le vol.

Le transmetteur ou la télécommande est l'interface entre l'opérateur et le mini-hélicoptère. Il transmet des commandes en forme de signaux que le récepteur radio reçoit et les transmet à la carte de contrôle de vol.

Cette carte de contrôle représente le cerveau du mini-hélicoptère. Elle gouverne les différents systèmes et ajuste les paramètres liés au vol en réponse aux commandes de l'opérateur. C'est paramètres inclus la direction : Dans les hélicoptères traditionnels, le rotor de queue est utilisé pour contrôler le lacet.

En ajustant l'angle des pales du rotor de queue, le pilote peut faire tourner l'hélicoptère à gauche ou à droite, ainsi que le contrôle du tangage (Pitch) et du roulis (Roll) : Pour avancer, reculer, ou se déplacer latéralement, le contrôleur de vol modifie la vitesse relative du rotor et le plan de rotation pour créer une résultante de force à la direction de mouvement souhaité.

Le système de contrôle contient aussi plusieurs parties électroniques et capteurs comme :

- Gyroscopes pour mesurer l'orientation autour des axes et sa position angulaire, nécessaire pour stabiliser le mini-hélicoptère en détectant les rotations et transmettre l'information à l'utilisateur pour compenser ces rotations.
- Accéléromètres pour mesurer l'accélération durant le vol, jouant un rôle aussi important dans la stabilisation.
- Baromètre pour mesurer la pression atmosphérique et déduire l'altitude du mini-hélicoptère, utilisé pour localiser la position dans l'air.
- GPS qui aide pour la navigation automatique du mini-hélicoptère et donne des informations détaillées sur son positionnement globales. Ce capteur est nécessaire pour faire des vols programmés et pour trouver des routes optimiser durant la navigation.
- Un magnétomètre peut aussi être utilisé pour compléter les données du gyroscope et de l'accéléromètre et fournir des informations plus précises sur le positionnement et la localisation du mini-hélicoptère pour les vols automatiques et la route de retour programmée. Ce capteur reçoit le champ magnétique terrestre et déduit la direction du mini-hélicoptère en fonction des quatre directions nord, sud, est et ouest.
- Capteur ultrasonique qui mesure la distance à des objets proches en émettant et recevant des ondes sonores. Utilisé pour éviter les obstacles automatiquement ou en alertant l'utilisateur avant l'impact et pour l'atterrissage automatique.

Le rôle de ces capteurs est de traduire les paramètres liés aux vols en des données utiles qui sont transmises au contrôleur de vol qui les traduit en des actions pour contrôler et stabiliser le mini-hélicoptère. Le contrôle de vol utilise des algorithmes et des calculs en utilisant les données fournies par les capteurs pour combiner les informations et avoir une image précise de la position, de l'orientation et de la vitesse du mini-hélicoptère. Les données sont ensuite traduites en des commandes et des actions pour ajuster les paramètres du moteur comme la vitesse et les angles d'incidence des hélices en fonction des conditions de vol changeantes.

1.5. Types de mini-hélicoptère

Il existe plusieurs types de mini-hélicoptères, chaque type est conçu pour être utilisé dans des applications spécifiques qui font appel à des caractéristiques et des performances exactes.

1.5.1. Monorotor à rotor de queue

Mini-hélicoptère à un rotor principal et un rotor de queue pour contrer le couple de rotation et contrôler le lacet. Offrent une bonne maniabilité et contrôle avec des performances proches aux hélicoptères à taille standard [13].

Utilisé pour diverses applications qui nécessitent un grand degré de contrôle et de maniabilité.

- Monorotor à pales fixes : les pales sur le rotor principal ont un angle d'incidence fixe. Ce type de mini-hélicoptère est simple à concevoir, mais offre moins de maniabilité et de performance.
- Monorotor à pales mobiles : L'angle des pales sur le rotor principal peut changer pour plus de contrôle sur la force de poussée, la vitesse et la direction du vol. Ce type offre des performances et une maniabilité meilleures, mais nécessite plus de complexité.

1.5.2. Birotors coaxiaux

Mini-hélicoptère à deux rotors principaux contrarotatif montés sur le même axe. Ce type de mini-hélicoptère offre une grande stabilité à cause d'avoir deux rotors qui tournent dans des directions opposées, ce qui annule les couples générés par la rotation d'un rotor par l'autre, ce qui minimise les moments d'inertie et les vibrations lors du vol [13, 14].

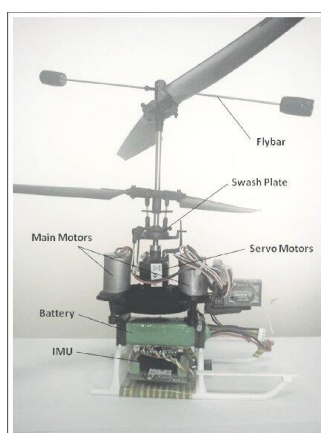


Figure 1.5 – Mini-hélicoptère coaxial «Big Lama » [14]

Ces modèles sont d'une taille plus réduite, car il ne nécessite pas un rotor de queue, ce qui les rend idéales pour les vols dans les espaces restreints.

1.5.3. Quadricoptère/multirotor

Mini-hélicoptère à quatre rotors principaux disposés en forme carré (quadricoptère) ou plus (hexacoptère, octocoptère). Ce type de mini-hélicoptère génère une force de poussée

considérable, ce qui le rend idéal pour soulever des charges plus importantes, tout en fournissant une meilleure stabilité que les autres modèles et un degré de contrôle plus élevé.



Figure 1.6 – DJI Phantom 4 quadcopter [15]

Alimenter plusieurs rotors nécessite une consommation d'énergie plus élevée, ce qui rend ces modèles moins énergétiquement efficaces et plus complexes à concevoir.

Le type de mini-hélicoptère choisi est principalement déterminé par l'utilisation prévue, les compétences du pilote et les conditions de vol : Les multirotors sont idéals pour la photographie aérienne et cartographie ou pour sécurité, ainsi que pour les inspections industrielles. Les mini-hélicoptères coaxiaux ainsi que les modèles à rotor de queue sont parfaits pour les pilotes et utilisateurs novices en raison de leur stabilité et de leur facilité de pilotage. [16]

Chapitre 2.

Processus et Méthodologie du Rétrofit

2.1. Rétrofit

Le rétrofit est le processus de modernisation, de mise à niveau ou d'amélioration des systèmes, équipements ou infrastructures existants en y intégrant de nouvelles technologies ou en y apportant des modifications pour améliorer leur performance, efficacité, sécurité ou ajout de nouvelles fonctionnalités [17]. Le rétrofit passe par plusieurs étapes :

- **Étape 1 : Collection d'informations**

Il est nécessaire de collecter le maximum d'informations liées au produit qu'on souhaite analyser. La documentation comme les articles, les brevets, les fiches techniques et les manuels d'utilisateur si sont disponibles peuvent donner des informations importantes sur les dimensions, les performances du système et les matériaux utilisés.

Les modèles 3D de conception qui sont disponibles sur internet sont aussi une bonne substitution pour un modèle physique, car il permet non seulement de voir les différents systèmes qui font partie des produits, les logiciels de conception comme SOLIDWORKS et CATIA fournissent des outils de mesure et d'évaluation très utiles. Ces programmes donnent la possibilité d'examiner chaque pièce individuellement, de voir le système dans différents plans et même de faire des coupes pour voir les composants internes, de calculer les propriétés mécaniques comme les centres de gravité et la résistance des matières automatiquement.

- **Étape 2 : Analyse des composants**

Identifier les différents composants et sous-systèmes du produit en utilisant la documentation déjà réunis, et bien comprendre le fonctionnement de chaque composant.

- **Étape 3 : Mesure des caractéristiques physiques**

On peut mesurer les différentes dimensions du produit et ces parties. En utilisant les appareils de mesure comme les pieds à coulisse ou les multimètres pour trouver les différentes tailles des composants, ainsi que des analyses sur le modèle 3D.

- **Étape 4 : Modification et amélioration**

Après avoir compris les différents systèmes du produit et leur fonctionnement. Il est maintenant possible d'apporter des modifications sur la conception existante.

Le but des modifications et de résoudre des problèmes dans la version existante ou d'abordé à des solutions plus efficace en se basant sur la base déjà réalisée. Il est aussi possible

d'envisager des procédures de fabrication plus économiques et efficaces, ou qui puisse donner des composants plus robustes [17]. À cette étape, des schémas, des diagrammes et des modèles sont réalisés pour représenter les différents systèmes.

Dans notre projet, la conception d'un mini-hélicoptère est une tâche ardue qui nécessite un temps plus important que celui qui nous est alloué. Il est préférable de faire le rétrofit sur un système existant et essayer de lui apporter des modifications pour atteindre un produit qui puisse accomplir les tâches souhaitées.

Il est donc nécessaire de voir quelques exemples de mini-hélicoptères déjà utilisés dans l'industrie afin de choisir le modèle le plus adapté à nos besoins.

2.2. Exemples réels de mini-hélicoptères utilisés dans l'industrie

Exemple 1 : ALIGN T-REX 550E PRO DFC



Figure 2.1 - ALIGN T-REX 550E PRO DFC [18]

Mini-hélicoptère monorotor à rotor de queue. Utilisé dans les compétitions de vols à cause de sa maniabilité exceptionnelle et de son poids léger.

Caractéristiques Techniques [19] :

- longueur : 1160 mm
- hauteur : 330 mm
- largeur : 216 mm
- longueur de la pàle principale : 550 mm
- Diamètre du rotor principal : 1248 mm
- Diamètre rotor anticouple (de queue) : 254 mm
- Pignon moteur : 16T
- Couronne principale : 112T
- Couronne d'autorotation : 131T
- Couronne anticouple : 34T

- Ratio : 1:7:3.85
- Poids : 2,400 g

Composants [19] :

- Moteur Brushless 730MX 850KV
- Contrôleur Brushless Castle Talon 90 Brushless ESC
- Servo anticouple DS615 digital X1
- Servos DS655 digital X3

Exemple 2 : ALIGN E1 PLUS Agricultural Helicopter



Figure 2.2 - ALIGN E1 PLUS Agricultural Helicopter [20]

Monorotor à rotor de queue utilisé pour les applications d'agriculture. Sert à appliquer les pesticides ou les produits chimiques sur les récoltes.

Caractéristiques Techniques [20] :

- Longueur : 1587 mm
- Hauteur : 570 mm
- Largeur : 427 mm
- Longueur du rotor principal : 830 mm
- Diamètre du rotor principal : 1846 mm
- Diamètre du rotor de queue : 313 mm
- Poids à vide : Env. 13,7 kg

Composants [20] :

- Poids au décollage : environ 24 kg (rempli de conteneurs de 10 L)
- Moteur sans balais 950MX 440KV/4540

- Puissance de sortie maximale 5 300 W/11 000 W (2 secondes)
- Conteneur chimique 15L
- Vitesse de travail maximale 8 m/sec

2.3. Rétrofit et modifications sur la T-REX 550E PRO DFC

Après une recherche bibliographique et une comparaison entre différents modèles de mini-hélicoptères, la T-REX 550E PRO DFC a été choisie pour être utilisée comme une base pour réaliser notre nouveau design d'un mini-hélicoptère destiné à l'utilisation agricole.

La documentation liée à la T-REX 550E PRO DFC est disponible d'après le site officiel de ALIGN. Et un modèle 3D de ce mini-hélicoptère a été réalisé par L. J. Smee et publié sur la plateforme GrabCAD où il est disponible à télécharger gratuitement [21].



Figure 2.3 – Modèle 3D de la T-REX 550E PRO DFC sur GrabCAD [21]

Le modèle 3D nous donne aussi les différents matériaux utilisés pour chaque composant. Ces matériaux incluent l'aluminium, les plastiques et la fibre de carbone.

Ce modèle a été choisi à cause de l'accessibilité et de la disponibilité des informations sur ce mini-hélicoptère, ainsi que de ses caractéristiques techniques et de ses performances qui sont idéales comme modèle de départ. Avoir un modèle 3D nous permet de voir en détail les différents composants du mini-hélicoptère et de copier ainsi leur placement dans notre modèle.

Dimension du modèle :

- Longueur : 1160 mm
- Hauteur : 330 mm
- Largeur : 216 mm

- Longueur des pâles principales : 550 mm
- Diamètre du rotor principal : 1248 mm
- Diamètre du rotor anticouple : 254 mm
- Masse : 2,650 g.

2.4. Calcul de la vitesse de rotation des pales

La vitesse de rotation est liée à la puissance que fournit le moteur. Pour notre cas, le moteur utilisé est le moteur brushless Align 730MX 960KV (HML73M02) et fournit une puissance maximale de 2550W et jusqu'à 4330W pour cinq secondes. Ce moteur est alimenté par une batterie Li-Po 12,000 mAh qui possède 6 cellules en série et une tension de 3,7 volts pour chaque cellule, donnant une tension de 22,2 volts.

Une valeur KV de 960 indique le nombre de tours/min par Volt, donc la vitesse maximale théorique de ce moteur est :

$$\Omega_{max} = KV \times V \quad (2.1)$$

$$\Omega_{max} = 960 \times 22.2 = 21312 \text{ tr/min}$$

On estime un rendement mécanique de ce moteur de 90%, ce qui donne :

$$\Omega_m = \Omega_{max} \times \eta_m \quad (2.2)$$

$$\Omega_m = 21312 \times 0.9$$

$$\Omega_m = 19180.8 \text{ tr/min}$$

Où :

Ω_m : La vitesse maximale fournit par le moteur

η_m : Rendement mécanique du moteur

La vitesse de rotation du moteur est principalement gérée par le contrôleur de vitesse électronique (ESC), il donne la possibilité à l'utilisateur ou au pilote de contrôler la vitesse de rotation du rotor. Il est donc nécessaire d'inclure les pertes de puissance générées par ce composant. On estime ces pertes à 5% de la puissance nominale.

$$\Omega = \Omega_m \times 0.95 \quad (2.3)$$

$$\Omega = 18221.76 \text{ tr/min}$$

Cependant, on cherche encore à trouver la vitesse du rotor. La transmission de la puissance du moteur vers le rotor principale ce passe par un système d'engrenage entre le pignon moteur et la roue principale.

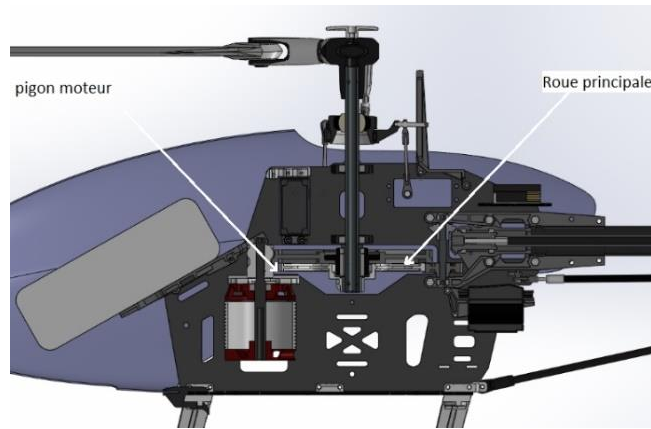


Figure 2.4 – Vue de coupe du châssis montrant le pignon moteur et la roue principale

Il est possible de trouver la vitesse de rotation du rotor en sachant le ratio entre le nombre des dents du pignon et de la roue. Dans notre conception, le pignon moteur possède 16 dents, et la roue principale se compose de 112 dents [19].

Le principe de transmission de mouvement par engrenage nous donne que la vitesse de rotation d'un pignon multipliée par son nombre de dents est égale à la vitesse de rotation d'une roue qui lui fait contact multipliée par son nombre de dents comme indiqué :

$$\Omega_1 \times Z_1 = \Omega_2 \times Z_2 \quad (2.4)$$

Tel que :

Ω_1 : vitesse de rotation du pignon

Z_1 : nombre des dents du pignon

Ω_2 : vitesse de rotation de la roue

Z_2 : nombre des dents de la roue

Ce qui nous donne :

$$\Omega_2 = 18221.76 \times \frac{16}{112}$$
$$\Omega_2 = 2603 \approx 2600 \text{ tr/min}$$

Ces modifications nécessitent l'expertise des ingénieurs en électronique et automatique, afin bien programmer et dimensionner le système électronique de contrôle et de commande.

Chapitre 3.

Conception et Réalisation d'une Maquette

3.1. Conception et modification

Le but de ce projet est de concevoir un modèle d'un mini-hélicoptère capable d'appliquer des pesticides sur un terrain d'agriculture, sans impacter la stabilité et les performances du système. La modification du modèle de mini-hélicoptère existant pour accomplir notre but peut impliquer plusieurs étapes, allant de l'évaluation des composants existants à l'intégration de nouvelles technologies.

Basés sur le but défini, les composants comme le fuselage, le moteur, le système de contrôle, et le train d'atterrissage doivent être modifiés.

Le châssis doit être équipé d'un réservoir de pesticide. Pour assurer la stabilité du mini-hélicoptère durant le vol et l'éjection du pesticide, il est nécessaire d'installer le réservoir d'une façon où il est aligné avec le centre de gravité de l'hélicoptère. Il est donc nécessaire d'abord de déterminer le centre de gravité sur notre modèle existant.

Le logiciel de conception 3D SOLIDWORKS offre des outils qui permettent de calculer et d'identifier les coordonnées du centre de gravité comme suit :

On sélectionne le modèle complet et on utilise l'outil « Mass Properties » situé dans la section « Evaluate ». On trouve les résultats suivants sur la position du centre de gravité :

Tableau 3.1 – Coordonné du centre de gravité sans réservoir

Coordonnés	Distance (mm)
X	- 0.48
Y	20.21
Z	116.95

Il est nécessaire de vérifier que le centre de gravité de notre mini-hélicoptère soit parfaitement aligné avec l'axe du rotor afin de minimiser les vibrations et améliorer la maniabilité et la stabilité durant le vol, ce qui est bien le cas dans notre modèle.

3.1.1. Le réservoir :

Une fois le centre de masse est calculé, on réalise une conception d'un réservoir qui doit répondre à 3 critères importants :

3. Conception et Réalisation d'une Maquette

- **Critère 1** : le réservoir doit être placé d'une telle façon ou il n'influera pas négativement sur la nouvelle position du centre de gravité (qui doit être toujours sur l'axe de rotation du rotor). On étudiera l'effet du réservoir à vide et à plein sur la stabilité du mini-hélicoptère.
- **Critère 2** : le réservoir doit être assez volumineux pour maximiser la charge de pesticide que peut faire le mini-hélicoptère dans un seul vol. La conception doit respecter les dimensions du mini-hélicoptère (taille, diamètre du rotor principal, etc.) et adhérer à ses performances et limitations.
- **Critère 3** : la conception doit être réalisable à moindre coût, nécessite des modifications minimales sur le châssis, et doit être utilisable et agronomique.

Suivant ces critères, on arrive à la conception suivante :

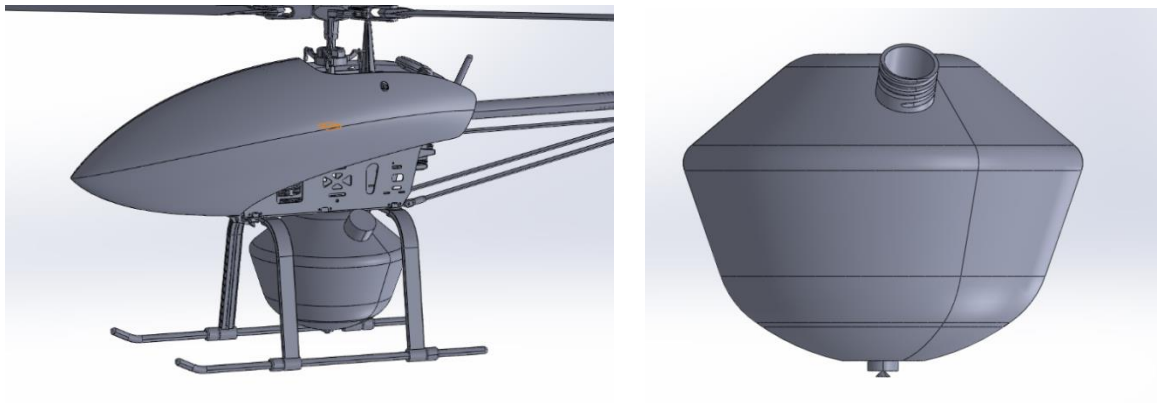


Figure 3.1 – Conception du réservoir

Ce réservoir est fabriqué en plastique comme le polyéthylène pour assurer l'endiguement des produits chimiques et les isoler des facteurs environnementaux comme la chaleur, les rayons du soleil et l'humidité. Il est équipé d'un vaporiser qui pulvérise ces produits chimiques.

L'évaluation des propriétés de masse de ce réservoir donne que son volume est de 2.85 litres, donc on estime une charge effective de 2.85 kilogrammes lorsque ce réservoir est totalement plein.

On peut donc calculer encore une fois le centre de gravité :

Tableau 3.2 – Coordonnés du centre de gravité avec le réservoir rempli

Coordonnés	Distance (mm)
X	- 0.15
Y	17.6
Z	- 8.47

Le centre de masse reste toujours sur l'axe de rotation du rotor à cause de la conception symétrique du réservoir, donc la stabilité ne sera pas largement affectée. La masse additionnelle attachée au châssis nécessite une force de poussée plus importante pour compenser la nouvelle charge.

La masse totale du mini-hélicoptère est donc de **5.5 kilogrammes**.

3.1.2. Le train d'atterrissage :

L'addition de ce réservoir a aussi nécessité d'apporter des modifications sur le train d'atterrissage pour s'adapter au poids supplémentaire. Le train d'atterrissage a été élargi à une hauteur de 165 mm et un écart de 210 mm afin d'assurer la stabilité du mini-hélicoptère posé sur le sol et de protéger le réservoir des impacts.

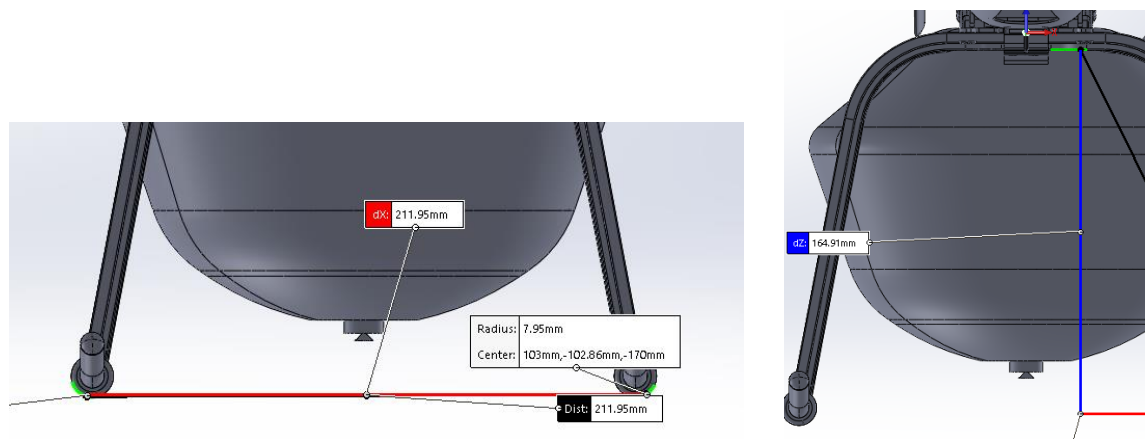


Figure 3.2 – Dimensions modifiées du train d'atterrissage

3.1.3. Automatisation et commande :

En ajoutant des capteurs et des modules de commandes, il est possible de rendre le vol du mini-hélicoptère automatique. Le module GPS Pixhawk PX4 est ajouté pour fournir les informations de position durant le vol ainsi qu'une boussole magnétique triple axes HMC5883L qui assure le positionnement du mini-hélicoptère suivant les trois axes x, y et z. Ces composants sont branchés au contrôleur de vol Pixhawk autopilote qui reçoit les informations fournies par les capteurs et renvoie des commandes aux ESC (Electronic Speed Controller) et servomoteurs pour ajuster les différents paramètres comme la vitesse de rotation du moteur, l'angle d'incidence, et l'orientation durant le vol. Ces modules doivent être montés sur le châssis et orientés verticalement de telle sorte que la marque indicatrice pointe vers le nez du mini-hélicoptère. Il est aussi nécessaire de faire en sorte que les modules sont montés loin des sources d'interférences électromagnétiques comme le moteur et l'ESC [22].

3.2. Impression 3D

Dû à des contraintes de temps et un manque de matériel, il n'était pas possible de réaliser un prototype volant du mini-hélicoptère. Néanmoins, une maquette peut être réalisée pour démontrer la viabilité du concept final et peut aussi être utilisée pour réaliser des tests et des essais en soufflerie dans une autre étude ultérieurement.

Il est possible de réaliser la majorité des pièces du mini-hélicoptère par fabrication additive (impression 3D) en utilisant la matière de PLA qui offre un moyen assez rigide et léger pour préserver les caractéristiques aérodynamiques réelles du mini-hélicoptère.

L'impression 3D nous permet aussi de réaliser des modèles des pièces qui ont des géométries complexes comme les hélices, et le fuselage, ainsi que le pignon moteur et le train d'atterrissage.

Il est important de noter que ce prototype ne peut pas être soumis à des conditions de vol réel, mais sert plutôt comme un test pour les propriétés aérodynamiques du design.

Tableau 3.3 – Caractéristique mécanique et paramètre d'impression de quelques filaments [23]

Filament	Température d'impression (°C)	Température du lit (°C)	Masse volumique (g/cm³)	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)
PLA	180 - 230	60 - 80	1.25	66	99
ABS	200 - 250	80 - 110	1.05	37	54
PETG	200 - 250	70 - 90	1.27	53	80

3.3. Réalisation des pièces et assemblage

Afin d'imprimer les différentes parties du mini-hélicoptère, il faut d'abord créer un modèle 3D sous format .stl pour chacune de ces pièces. Ensuite, en utilisant un logiciel d'impression 3D comme UltiMaker Cura, on peut exporter ces modèles pour réaliser un fichier code G qui fournit les commandes et les étapes que doit suivre l'imprimante pour réaliser le design, tout en spécifiant les différents paramètres d'impression comme la vitesse d'avance, la température, la masse volumique, etc. Ce logiciel est disponible gratuitement et donne accès à une large bibliothèque d'imprimante 3D, ce qui permet de personnaliser le code G en fonction de la caractéristique et de la spécification de l'imprimante.

3. Conception et Réalisation d'une Maquette

Les dimensions du mini-hélicoptère nécessitent parfois que quelques pièces soient divisées en deux ou plusieurs parties afin qu'elles puissent être imprimées sur les imprimantes 3D disponibles.

On utilise deux imprimantes 3D situées chez l'École Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU) :

CREALITY CR-10 SMART : possède un volume d'impression de $300 \times 300 \times 400 \text{ mm}^3$. Peut-être utilisé pour les pièces qui ne nécessitent pas une hauteur très importante. [24]

ELEGOO Neptune 4 Max : possède un volume d'impression de $420 \times 420 \times 480 \text{ mm}^3$. [25]

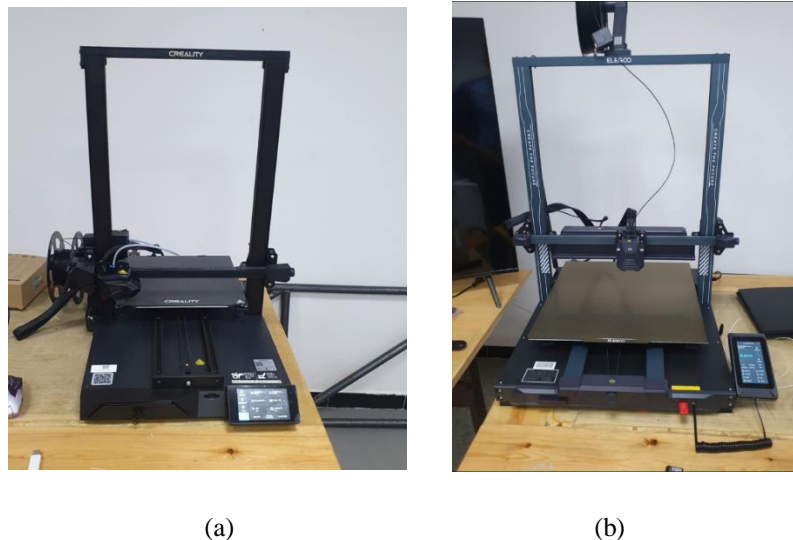


Figure 3.3 – Imprimantes 3D utilisées. (a) : CR-10 Smart, (b) : Neptune 4 Max

Il est nécessaire de s'assurer que les imprimantes sont bien calibrées avant de commencer. Le niveau du tapis doit être réglé et mis à zéro et la quantité de plastique dans le rouleau doit être vérifiée pour éviter d'arrêter l'impression à cause de manque de matière.

Une fois le réglage terminé, les fichiers d'impression sont transférés à l'imprimante par carte SD et l'opération est lancée. L'impression peut prendre quelques minutes jusqu'à plusieurs heures, ceci en fonction de la taille et des dimensions de la pièce réalisée, des paramètres de qualité de l'impression et de la vitesse de mouvement de la buse, avec une tolérance de $\pm 0.4 \text{ mm}$.

Les pièces imprimées incluent les pales, le fuselage, le réservoir, la poutre de queue et le train d'atterrissage, ainsi que les composants internes comme la roue principale et les différents supports comme le support de la poutre de queue et les supports des capteurs.

3. Conception et Réalisation d'une Maquette



Figure 3.4 – Quelques pièces imprimées

Pour assurer la rigidité de la maquette, les plaques du châssis ont été fabriquées en plexiglass.

Une fois les pièces réalisées, le modèle est monté et assemblé pour produire la maquette finale.



Figure 3.5 – Maquette du mini-hélicoptère

Chapitre 4.

Analyse Aérodynamique et Simulation Numérique

Avant de valider le design, il est nécessaire d'exécuter une analyse théorique sur les performances du mini-hélicoptère. Cela fait appel à des simulations sur les différents aspects aérodynamiques et énergiques du système en utilisant des logiciels comme ANSYS Fluent.

4.1. Analyse aérodynamique : Définition et rappel théorique

Forces aérodynamiques sur un hélicoptère

Après avoir quitté le sol, un hélicoptère est soumis à quatre forces principales : la portance, la poussée, la traînée et le poids. Il est crucial de comprendre comment ces forces fonctionnent et de savoir comment les contrôler en utilisant les commandes de vol en ajustant les paramètres de vol [27].

La portance est une force verticale perpendiculaire par rapport à la direction de vol, et est produite par l'effet aérodynamique de l'air agissant sur le rotor. Elle sert à maintenir le mini-hélicoptère dans l'air en opposant la force de poids. La portance peut être contrôlée en changeant la vitesse de rotation des hélices ainsi que leur angle d'incidence.

Le poids est la force liée à la masse du mini-hélicoptère « m » et l'accélération de la gravité.

$$P = m \times g \quad (3.1)$$

La poussée est la force motrice qui propulse le mini-hélicoptère vers l'avant. Comme la portance, cette force est générée par la rotation des hélices. La résultante des vecteurs de poussée et de portance détermine la direction de mouvement de l'hélicoptère.

La traînée est une force opposante à la poussée. Elle est générée par des perturbations de l'écoulement d'air à cause des solides qui font contact avec l'air comme le fuselage, le rotor, etc.

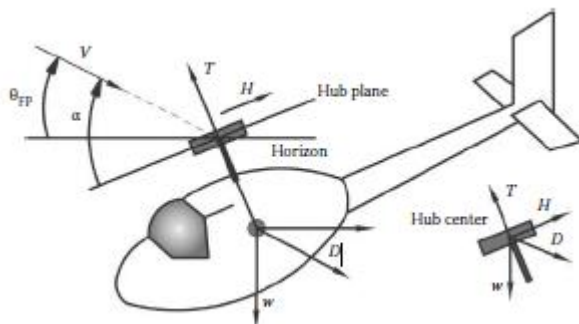


Figure 4.1 – Forces aérodynamiques soumis sur un hélicoptère [27]

Tel que :

\vec{H} : Force longitudinale

\vec{T} : Force de poussée

\vec{D} : Force de traîné

\vec{w} : Force de poids

Principe de mouvement stationnaire

Lors du vol stationnaire, la totalité du disque du rotor est parallèle au sol. La force générée par le rotor est donc verticale sous forme d'une force de portance qui agit contre le poids de l'hélicoptère. Par le principe d'équilibre des forces, l'hélicoptère reste suspendu dans l'air si la force de portance est égale au poids de l'hélicoptère [26].

Pales d'un hélicoptère

Le rotor d'un hélicoptère est composé de deux ou plusieurs pales qui ont une forme aérodynamique qui génère les forces de portance et de poussée par leur rotation autour d'un axe. Ce sont des diapositives aérodynamiques destinées à transformer une énergie motrice en accélération du fluide dans lequel il se déplace [26].

Les pales peuvent être faites de métal, de bois ou de stratifiés, en fibres de verre ou en fibres de carbone. Dans ces deux derniers cas, elles sont renforcées au niveau du bord d'attaque par une pièce de métal, le blindage, pour améliorer la robustesse en cas de choc avec un objet.

Il est nécessaire de définir la terminologie liée à la géométrie et au fonctionnement des pales [26] :

- bord d'attaque : l'avant arrondi de la pale
- bord de fuite : l'arrière effilé de la pale
- emplanture ou "pied de pale" : la base de la pale qui se fixe sur le moyeu
- profil : le profil aérodynamique de la pale vu en coupe
- corde : la corde d'un profil est la droite joignant le bord d'attaque au bord de fuite
- extradados : contour supérieur du profil.
- intrados : contour inférieur du profil.

Types de pales

Pales symétriques : L'intrados et l'extrados sont symétriques par rapport à la corde. Pour un profil symétrique, aucune force portance n'est produite lorsque l'angle d'incidence est nul.

Pales asymétriques : Ces profils peuvent générer de la portance pour un angle d'incidence nul ou même négatif [27].

Angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle entre la corde de la pale et la direction du flux d'air relatif qui la rencontre. Lorsque l'angle d'incidence augmente, la portance générée par la pale augmente jusqu'à un certain point [27].

La traînée, qui est la force résistive agissant dans la direction du flux d'air, augmente également avec l'angle d'incidence. Cependant, la relation entre l'angle d'incidence et la traînée est généralement non linéaire et dépend du profil aérodynamique de la pale.

Si l'angle d'incidence devient trop grand, le flux d'air ne peut plus suivre la surface de la pale et se détache, provoquant une perte soudaine de portance et une augmentation drastique de la traînée. Ce phénomène est connu sous le nom de décrochage.

4.2. Simulation numérique

La simulation numérique sur ANSYS Fluent a été effectuée pour analyser les performances du rotor et calculer la force de portance générée par sa rotation. Le domaine de calcul est réalisé dans Fluent, ensuite un maillage est généré pour résoudre les équations de Navier-Stokes gouvernant l'écoulement et suivant des modèles de calcul sous des variables d'entrées et des valeurs limites spécifiées.

4.2.1. Modèle mathématique

Le mouvement d'un fluide newtonien est décrit par les équations de Navier-Stokes. Ces équations sont un ensemble d'équations différentielles couplées et pourraient, en théorie, être résolues pour un problème d'écoulement donné. Mais, en pratique, ces équations sont trop difficiles à résoudre analytiquement. La méthode de calcul de CFD, ici, le logiciel ANSYS-Fluent, est basée sur la formation des volumes finis.

Équations de Navier-Stokes sans termes sources

Pour un fluide Newtonien incompressible, les équations de Navier-Stokes sont présentées comme suit :

Continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

Conservation de quantité de mouvement suivant x :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 u}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 u}{\partial^2 z} \right] + \rho g_x \quad (4.3)$$

Conservation de quantité de mouvement suivant y :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 v}{\partial^2 z} \right] + \rho g_y \quad (4.4)$$

Conservation de quantité de mouvement suivant z :

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 w}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 w}{\partial^2 z} \right] + \rho g_z \quad (4.5)$$

Pour résoudre ces équations, on utilisera la procédure RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) et on adoptera le modèle de turbulence k-epsilon standard. Ainsi, on utilise la loi de paroi (the wall function) pour approximer les valeurs au voisinage de la pale sans avoir besoin d'un maillage très fin à cause des limitations techniques.

4.2.2. Loi de paroi

Lorsque l'écoulement s'approche d'une surface solide, une forte pente se forme en raison de la condition d'adhérence à la surface. C'est ce qu'on appelle la couche limite qui se développe près de la surface solide en contact avec l'écoulement. L'épaisseur de cette couche limite affecte la contrainte de cisaillement de la paroi. Afin d'estimer avec précision la contrainte de cisaillement des murs, nous devons résoudre la couche limite avec précision. Pour y parvenir, nous avons besoin d'un maillage raffiné convenablement près de la paroi pour bien décrire ce gradient.

Lorsque le maillage près de la paroi est dans la région : ($y^+ < 5$), l'expression de la vitesse adimensionnelle U^+ ($= U/U_\tau$) est donnée par

$$U^+ = y^+ \quad (4.6)$$

Sinon quand $y^+ \geq 30$, U^+ sera donnée par la loi logarithmique.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad (4.7)$$

Avec κ est donné comme la constant de Von Kármán $\kappa \approx 0.41$ et $C \approx 5.0$ pour une paroi lisse.

Le modèle mathématique k-epsilon standard est présenté sous deux équations comme suit :

Pour l'énergie cinétique turbulente k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (4.8)$$

Pour la dissipation ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.9)$$

Tel que :

u_i : représente le composant de la vitesse dans une direction

E_{ij} : représente un composant du taux de déformation

μ_t : représente la viscosité de Foucault

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.10)$$

Ces équations faites appellent à plusieurs constantes qui sont définies comme suit :

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\varepsilon = 1.30 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

4.3. Étude CFD

La simulation numérique à l'aide de la CFD présentée dans cette section nous permettra d'estimer la force de portance que peut générer le rotor de notre mini-hélicoptère et par conséquent ses performances aérodynamiques.

Les équations du modèle mathématique, décrites dans la section 3.3.1, sont résolues à l'aide de la méthode des volumes finis implantée (i.e. méthode CFD) dans le logiciel ANSYS-Fluent. Les différentes étapes de notre méthode de CFD sont présentées ci-dessous.

4.3.1. Création du domaine de calcul

On utilise le module DesignModeler de ANSYS Fluent pour réaliser le domaine de calcul de nos simulations. DesignModeler nous permet d'exporter un modèle format .stl.

On remarque que les pales ne sont pas alignées avec notre système de coordonnées. Il est donc nécessaire de modifier leur position avant de commencer la simulation afin de faire en sorte que l'axe de rotation passe par le centre de gravité de notre pièce.

On crée un point de construction dans les coordonnées 0, 0, 0.

4. Analyse Aérodynamique et Simulation Numérique

On doit ensuite déterminer le centre de symétrie de notre pièce. On crée d'abord une ligne « frozen line » qui relie deux parties symétriques entre eux par rapport à ce centre de symétrie. Le point milieu de cette ligne représente notre centre.

Le centre de cette ligne peut être déterminé en utilisant la fonction « split edges ».

Maintenant qu'on a deux points, il est possible de faire la translation de la pièce d'une façon ou le centre de symétrie de notre pièce soit sur le centre du repère en utilisant la fonction « move » et en sélectionnant le type de mouvement « by point ».

Après avoir bien positionné notre pièce, on ajoute une fonction « rotate » pour chaque pale. Cette fonction nous permet de modifier l'angle d'incidence de chaque pale pour savoir son impact sur la génération de la force de portance.

On réalise ensuite nos géométries. Cette simulation est basée sur deux domaines, un domaine statique et un domaine rotatif. Le domaine rotatif comprendra les deux pales qui seront simulées en rotation suivant l'axe Y, et le domaine statique pour représenter le milieu ambiant.

On commence par créer les deux géométries en utilisant la fonction « enclosure » qui génère une enceinte autour des corps sélectionnés. La première enceinte sera d'une forme cylindrique suivant l'axe Y, avec un épaisseur de $4H$ la hauteur des pales. La deuxième enceinte sera d'une forme parallélépipède avec une hauteur de $2D$ et une largeur et une profondeur de $1,5D$.

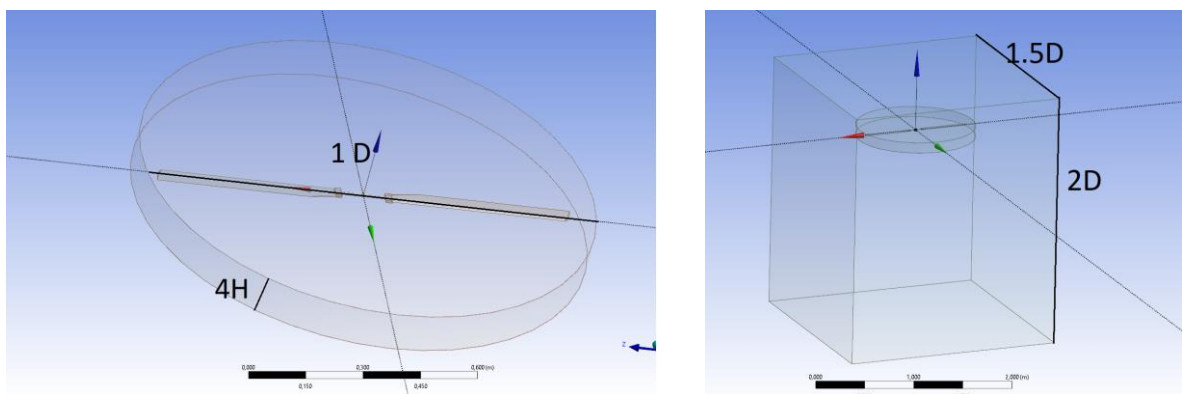


Figure 4.2 – Domaine de calcul

On utilise la fonction « Boolean » avec l'opération « subtract » pour réaliser les domaines.

Le domaine rotatif et l'enceinte à forme cylindrique moins les pales, et le domaine statique et l'enceinte à forme d'un parallélépipède moins le domaine rotatif.

On utilisera la même géométrie pour effectuer les calculs à différent angle d'incidence.

4.3.2. Maillage

Une fois la géométrie est réalisée, ANSYS nous permet de créer un maillage.

Le but de cette simulation est de calculer les forces générées par les hélices durant leur rotation. Il est donc nécessaire de raffiner le maillage sur les hélices pour avoir des calculs plus précis. On utilise alors la fonction « sizing » et on sélectionne les faces des hélices pour sélectionner une taille d'élément plus petite que le reste de la géométrie et essayer de raffiner le maillage de plus en plus lorsqu'on se rapproche des pales.

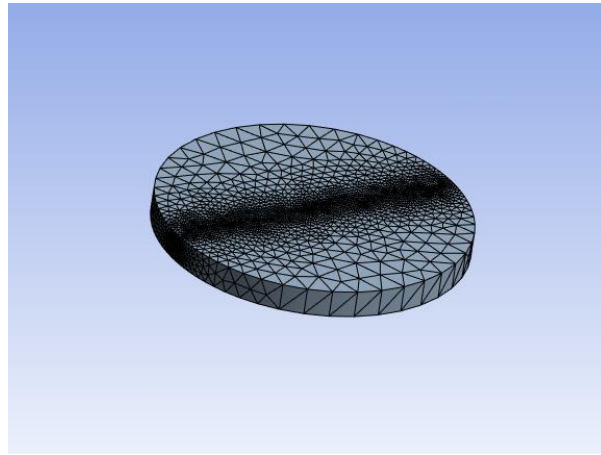


Figure 4.3 – Maillage du domaine rotatif montrant le raffinement au niveau des pales

On ajoute ensuite trois sélections nommées : Inlet, Outlet, et Propeller qui représentent l'entrée, la sortie et les pales respectivement.

Étude de dépendance du maillage

En se basant sur la loi de paroi, il est nécessaire de faire en sorte que la valeur du paramètre adimensionnel y^+ soit entre 30 et 100 pour avoir des résultats de calcul assez proches de la réalité. L'étude CFD dans notre cas a rapidement donné des résultats satisfaisants sans avoir besoin de plusieurs itérations de maillage.

Le raffinement du maillage pour un angle d'incidence de 6° est résumé sur le tableau suivant :

Tableau 4.1 – Évolution de la valeur de portance en fonction du raffinement du maillage

Essai	Nœuds	Portance (N)	Valeurs Y^+
#1	118805	51.6	[~40, ~130]
#2	195124	49.5156	[~35, ~100]
#3	268876	49.4184	[~30, ~85]

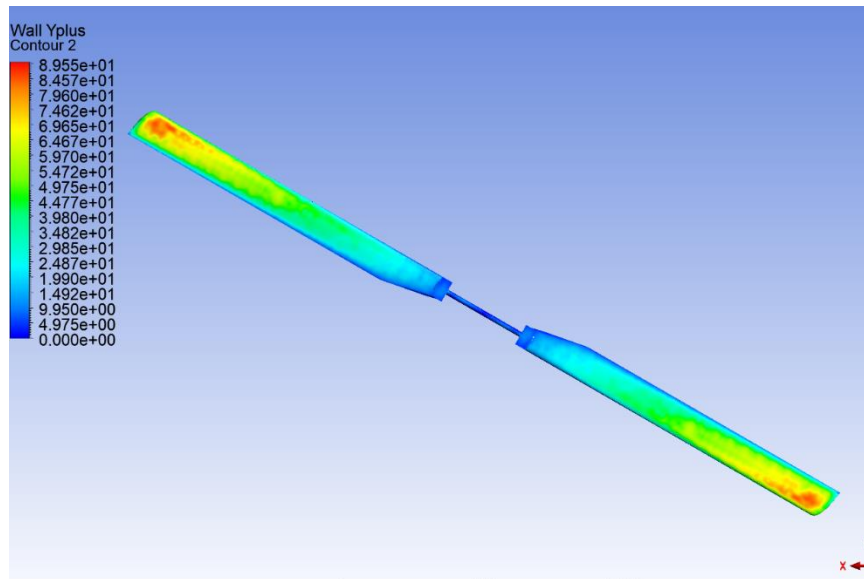


Figure 4.4 – Distribution de la valeur de y^+ le long des pales pour l'essai #3

4.3.3. Déroulement des simulations et calculs

Après avoir réalisé le maillage, on peut commencer notre calcul. Le calcul numérique sera fait sur un temps transitoire puisque le domaine rotatif sera en mouvement. On précise le modèle de calcul k-epsilon standard et on sélectionne la loi de paroi standard pour le traitement près des pales. Le mouvement du rotor est simulé par la rotation du maillage du domaine rotatif, il faut spécifier sa direction et sa vitesse de rotation par la valeur trouvée précédemment. Les conditions limites à l'entrée spécifiées comme « velocity inlet » sont définies par une pression d'entrée de 1 atm et une vitesse de 0.1 m/s, la turbulence de l'écoulement est modélisée par une intensité de turbulence de 5% et un taux de viscosité de 10.

La force de portance est une force générée par la rotation des pales. Elle se manifeste comme une force perpendiculaire au plan de rotation, donc afin d'identifier cette force, on ajoute dans le calcul numérique un rapport d'une force appliquée sur les hélices et dirigée suivant l'axe y.

On exécute le calcul pour 100 pas de temps de 0.01 s et 10 itérations pour chaque pas, et on répète ces étapes en changeant les angles d'incidences pour avoir des différentes valeurs de portance.

4.4. Résultats

4.4.1. Force de portance

Les résultats de la force de portance sont résumés sur le tableau suivant :

Tableau 4.2 – Variation de la force de portance en fonction de l'angle d'incidence

Angle d'incidence (°)	Force de portance (N)	Masse supportée (kg)
0	- 0,1728	- 0,0176
1	3,6694	0,37405
2	10,8546	1,10648
3	19,7371	2,01194
4	28,7476	2,93044
5	38,9577	3,97122
6	49,4184	5,03755
7	59,551	6,07044
8	69,8704	7,12236
9	82,8271	8,44313
10	93,6925	9,55071
11	106,545	10,8609
12	117,213	11,9483
13	130,01	13,2528
14	140,032	14,2744
15	153,363	15,6333

4.4.2. Puissance nécessaire

On doit encore calculer la puissance nécessaire maximale pour faire tourner le rotor.

$$P = C \times \omega \quad (4.11)$$

Tel que :

P : La puissance à fournir en Watt (W).

C : Le couple en Newton-mètre (N.m).

ω : La vitesse angulaire en radian par seconde (rad/s).

La vitesse angulaire est donnée comme suit :

$$\omega = \frac{N \times 2\pi}{60} \quad (4.12)$$

N : La vitesse de rotation en tours par minutes (tr/min).

Pour $N = 2600$ tr/min :

$$\omega = \frac{2600 \times 2\pi}{60}$$

$$\omega = 272.27 \text{ rad/s}$$

Le couple pour chaque cas est donné par la même façon que la force, ce qui donne les résultats suivant en fonction des angles d'incidences :

Tableau 4.3 – Puissance nécessaire pour faire tourner le rotor en fonction de l'angle d'incidence

Angle d'incidence (°)	Couple (N.m)	Puissance (W)
0	2.92	794.48
1	2.96	806.14
2	3.09	840.28
3	3.25	883.82
4	3.58	974.18
5	3.97	1082.36
6	4.51	1227.83
7	5.107	1390.46
8	5.93	1614.07
9	6.81	1854.785
10	7.92	2155.78
11	9.27	2524.08
12	10.48	2852.60
13	11.9	3239.66
14	13.47	3667.26
15	15.32	4170.82

4.4.3. Calcul de l'autonomie

Dans le cas d'un mini-hélicoptère, l'autonomie est exprimée par la durée ou la distance maximale que parcourt l'aéronef pour une batterie complètement chargée. Cette valeur est liée à la capacité de la batterie ainsi que la consommation du moteur. L'autonomie est calculée comme suit :

$$t_{max} = \frac{Q}{I} \tag{4.13}$$

Avec :

$$I = \frac{P}{V} \quad (4.14)$$

Tel que :

t_{max} : Temps de vol en seconde

Q : Capacité de la batterie en mAh ou Ah

I : Consommation du moteur en mA ou A

P : Puissance fournie par le moteur en Watts

V : Tension entre le moteur en Volts

La puissance fournie par notre moteur varie en fonction de la masse totale du mini-hélicoptère qui elle-même varie avec la consommation des produits dans le réservoir durant le vol. Si on suppose une application de 0,5 kg/min, la masse du mini-hélicoptère diminue d'un taux fixe pour une valeur maximale de 5,5 kg et minimale de 2.65 kg selon la formule suivante :

$$m(t) = 5.5 - 0.5t \quad (4.15)$$

Avec : $t \in [0 ; 5.7]$ tel que la masse reste fixe après 5.7 minutes.

Il est nécessaire de bien définir la relation entre la masse et la consommation d'énergie.

Tableau 4.4 – Puissance spécifique en fonction de la force de portance générée

Force de portance (N)	Puissance (W)	Puissance spécifique (W/kg)
- 0,1728	794.48	- 45104
3,6694	806.14	2155.18
10,8546	840.28	759.41
19,7371	883.82	439.29
28,7476	974.18	332.44
38,9577	1082.36	272.55
49,4184	1227.83	243.73
59,551	1390.46	229.05
69,8704	1614.07	226.62
82,8271	1854.785	219.68
93,6925	2155.78	225.72
106,545	2524.08	232.40
117,213	2852.60	238.74
130,01	3239.66	244.45
140,032	3667.26	256.91
153,363	4170.82	266.79

Par interpolation numérique sur le logiciel EXCEL, on trouve que la relation entre la puissance et la poussée dans le régime transitoire durant la consommation du produit peut être exprimée par la relation polynomiale suivante :

$$P_t = 793 + 25.3 \times m + 12.2 \times m^2 \quad (4.16)$$

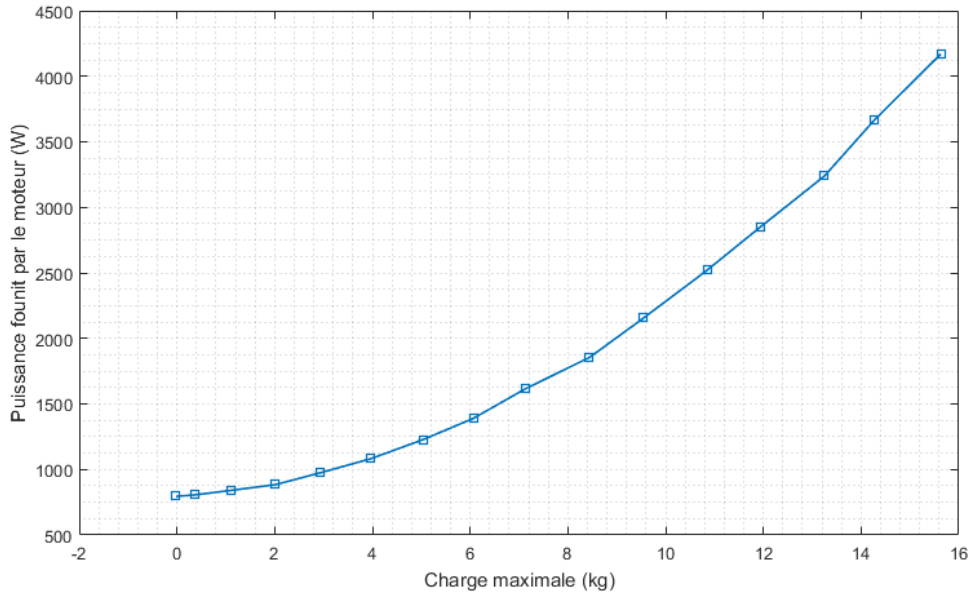


Figure 4.5 – Puissance fournie en fonction de la masse soulevée

En remplaçons par l'expression de la masse :

$$P_t(t) = 3.05t^2 - 79.75t + 1301.2$$

$$P_t = \frac{\left(\int_0^{5.7} 3.05t^2 - 79.75t + 1301.2 dt \right)}{5.7}$$

Ce qui donne :

$$P_t = 1107.1 W$$

La masse du mini-hélicoptère devient fixe (2.65 kg) après ce point et donc le moteur consommera une puissance qui vaut :

$$P_s = 793 + 25.3 \times 2.65 + 12.2 \times 2.65^2$$

$$P_s = 945.72 W$$

Si on suppose que le mini-hélicoptère passera la majorité du temps de vol en régime transitoire (consommation du produit et vidage du réservoir consistera environ 75% du temps total de fonctionnement), alors on trouve une consommation moyenne de :

$$P_m = 0.75P_t + 0.25P_s \quad (4.17)$$

$$P_m = 0.75 \times 1107.1 + 0.25 \times 945.72$$

$$P_m = 1066.75 \text{ W}$$

Pour une batterie Li-Po 6S 22.2 V et une capacité de 12,000 mAh, le calcul du temps de vol est comme suit :

$$t_{max} = \frac{Q}{\frac{P}{V}} = \frac{12000}{1066.75 * \frac{1000}{22.2}}$$

$$t_{max} = 0.2497 \text{ heure}$$

$$t_{max} = 14.98 \approx 15 \text{ minutes}$$

4.4.4. Pression appliquée sur les pales

Durant le mouvement du rotor, les hélices seront soumises à des forces de pression qu'on doit bien déterminer pour pouvoir les renforcer durant la fabrication ou choisir des matériaux appropriés pour résister à ces forces.

Dans le cas d'un angle de 15°, la distribution de la pression est présentée sur le contour ci-dessous, où on trouve une valeur de pression relative minimale de -22389.6 Pa et une valeur maximale de 13967.7 Pa :

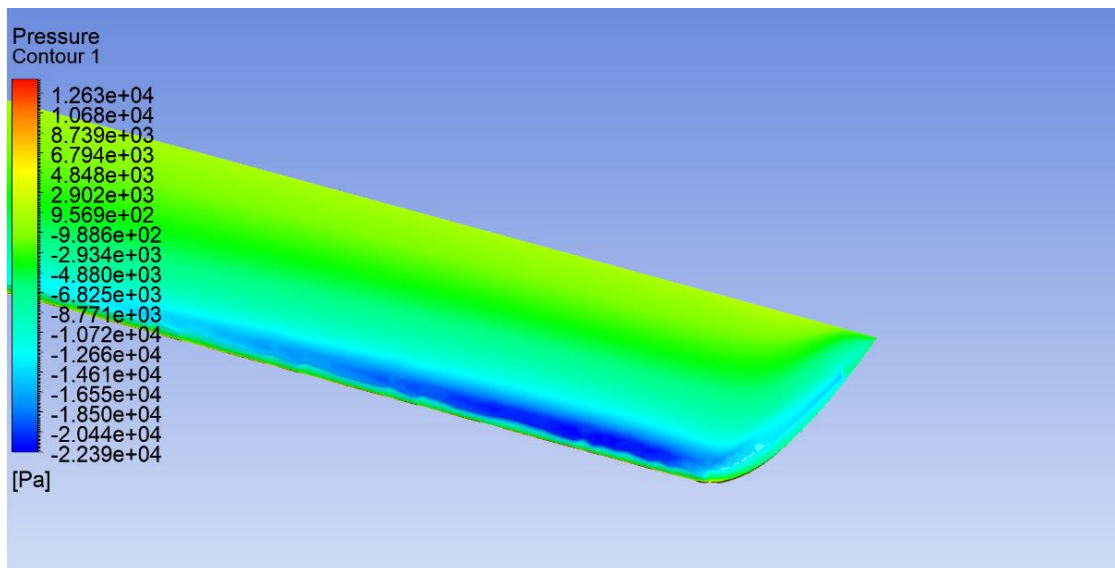


Figure 4.6 – Distribution de la pression relative le long de la pale

4.4.5. Conclusion et commentaire

Notre moteur brushless Align 730MX 960KV (HML73M02) fournit une puissance maximale de 2550W, donc il peut confortablement voler le mini-hélicoptère avec un angle d'incidence de 9° qui correspond pour une vitesse de rotation de 2600 tr/min à une portance de 82.83 N ou 8.44 kg, ce qui est assez suffisant pour maintenir le mini-hélicoptère qui pèse non plus 2.65 kg à vide et de 5.5 kg avec un réservoir plein dans l'air.

Il est aussi possible d'utiliser ce moteur pour produire plus de portance que nécessaire pour les cas de décollage. Une puissance de 4330 W que peut faire tourner le rotor à une vitesse de 2600 tr/min et avec un angle de plus de 12° , générant ainsi plus de 117.21 N ou 11.95 kg pour 5 secondes, ce qui est idéal pour un décollage rapide.

On conclut donc que l'ajout d'un réservoir de pesticide n'affecte pas drastiquement les performances de notre mini-hélicoptère, mais diminue la maniabilité et la vitesse de l'aéronef à cause de la masse ajoutée, ce qui ne pose aucun problème étant donné que le mini-hélicoptère est destiné à des applications de petite altitude et pour des petites vitesses de vol.

Il est donc nécessaire de faire un calibrage approprié des instruments de contrôle pour introduire l'effet de la masse ajoutée sur le centre de gravité est ainsi sur la stabilité de l'aéronef. La force de portance doit aussi être modifiée au fur et à mesure avec la déplétion du produit chimique dans le réservoir et donc la diminution de la masse totale du mini-hélicoptère.

Chapitre 5.

Start-up et Business Model

5.1. Introduction

Notre start-up, pionnière dans le domaine de l'ingénierie mécanique, aéronautique, automatique et électronique, se distinguera par son approche innovante et sa passion pour l'excellence. Elle sera fondée par des purs produits des grandes écoles d'ingénieurs algériennes passionnés et dotés d'une vaste expertise technique. Notre entreprise se consacrera à la conception, au prototypage et à la fabrication de solutions technologiques avancées.

En combinant des technologies de pointe telles que l'impression 3D, l'usinage CNC et les matériaux composites, nous offrirons à nos clients des produits de haute qualité, personnalisés pour répondre à leurs besoins spécifiques. Notre engagement envers la recherche et le développement garantira des avancées significatives et un avantage concurrentiel dans un marché en constante évolution.

Dès son lancement, notre start-up sera également spécialisée dans le développement de modèles de drones, de planeurs et d'UAV (véhicules aériens sans pilote) pour divers types de missions et de secteurs industriels. En combinant des technologies de pointe, nous produirons des produits de haute qualité, personnalisés pour répondre à leurs besoins spécifiques dans le domaine aéronautique.

Grâce à notre atelier de fabrication entièrement équipé, à notre bureau d'études innovant et à notre unité spéciale de R&D, nous transformerons aussi les idées en réalités tangibles, tout en assurant la qualité et la fiabilité de chaque projet. Notre mission est de créer des solutions révolutionnaires qui répondent aux défis actuels et futurs de nos clients et de notre industrie.

5.2. Partition

Notre startup sera répartie en 3 unités principales, bureau d'études, atelier de fabrication et machines :

5.2.1. Bureau d'Études

Le bureau d'études de notre start-up sera le cœur de notre activité, où la passion pour l'ingénierie et l'innovation rencontre une expertise approfondie en conception et simulation avancée. Notre mission est de fournir des solutions sur mesure qui optimisent la performance et la fiabilité des projets, en intégrant les technologies les plus récentes en ingénierie et en informatique.

Notre équipe de spécialistes utilisera des logiciels de pointe pour concevoir des systèmes mécaniques, électroniques et automatiques. Grâce à notre compétence en CAD (conception

assistée par ordinateur) avec des outils tels que CATIA et SOLIDWORKS, nous développons des modèles 3D précis et réalistes. Ces modèles nous permettent de réaliser des simulations qui prédisent le comportement des systèmes sous diverses conditions, garantissant ainsi la robustesse et l'efficacité de nos conceptions.

5.2.2. Atelier de Fabrication

L'atelier de fabrication représentera le prolongement naturel de notre bureau d'études. Ici, les concepts innovants prennent vie sous forme de prototypes réels. Équipé de technologies de pointe, notre atelier est capable de transformer les modèles numériques en objets tangibles avec une précision et une qualité supérieure.

Nous disposons d'équipements avancés tels que des imprimantes 3D industrielles, des machines CNC (contrôle numérique par ordinateur), et des outils de soudage de haute précision. Ces ressources nous permettent de produire des prototypes complexes, qu'il s'agisse de pièces mécaniques, de circuits électroniques ou de systèmes automatisés. Chaque prototype est soumis à des tests rigoureux pour s'assurer de sa conformité aux spécifications et de sa performance optimale.

L'atelier de fabrication n'est pas seulement un lieu de production, mais aussi un espace d'expérimentation. Nous y développerons et testerons de nouvelles techniques de fabrication, cherchant constamment à améliorer nos procédés. Cette approche nous permettra de passer efficacement du prototype à la production en série, tout en maintenant des standards de qualité élevés. Notre capacité à fabriquer en interne accélère le cycle de développement, réduisant ainsi les délais et les coûts pour nos clients.

5.2.3. Unités et Machines

Unité de Prototypage Rapide

Cette unité sera dédiée à la création de prototypes initiaux pour valider les concepts développés par le bureau d'études. Elle comprendra :

- Imprimantes 3D Industrielles : Équipées de différentes technologies de fabrication additive, ces imprimantes permettront de produire des prototypes en plastique métal.
- Machines de Découpe Laser : Utilisées pour découper et graver des matériaux tels que le bois, le plastique, le métal et le tissu avec une grande précision.

Unité d'Usinage CNC (Contrôle Numérique par Ordinateur)

Cette unité sera essentielle pour la fabrication de pièces complexes avec une précision élevée. Elle inclura :

- Fraiseuses CNC : Capables de réaliser des opérations de fraisage sur divers matériaux (métal, plastique, bois) avec une précision micrométrique.
- Tours CNC : Pour l'usinage de pièces cylindriques, permettant la création de composants de haute précision tels que des axes et des arbres.
- Machines de Découpe Laser : Utilisées pour découper des matériaux comme le métal, le plastique, et le bois avec une précision exceptionnelle, permettant des coupes complexes et détaillées.
- Pliieuses CNC : Pour le pliage précis de tôles métalliques, assurant des angles et des formes spécifiques nécessaires pour des applications variées.
- Cintreuses CNC : Destinées au cintrage de tubes et de barres métalliques, permettant la création de formes courbées précises pour des composants structurels et esthétiques.
- Machines de Découpe à Jet d'Eau : Utilisant un jet d'eau à haute pression mélangé à un abrasif, ces machines pourront découper des matériaux durs comme le métal, la pierre et le verre sans générer de chaleur excessive.
- Machines à Injection Plastique : Pour la fabrication de pièces en plastique en grande quantité, ces machines permettront de créer des composants en plastique de haute précision à partir de moules.
- Machines d'Électroérosion : Utilisées pour l'usinage de matériaux durs et conducteurs par électroérosion, permettant de réaliser des formes complexes avec une précision extrême.

Unité de Soudage et Assemblage

Cette unité sera dédiée à l'assemblage de prototypes et de petites séries, comprenant :

- Stations de Soudage MIG/TIG : Pour la soudure de pièces métalliques avec différentes techniques de soudage, assurant des soudures robustes et précises.
- Stations de Soudage par Points : Utilisées pour assembler des feuilles de métal avec des soudures par points rapides et efficaces.

- Stations d'Assemblage Électronique : Pour l'assemblage et la soudure de composants électroniques sur des cartes PCB (circuit imprimé), intégrant des équipements comme des stations de soudure à air chaud et des systèmes de brasage à refusions.

Unité de Traitement de Surface

Cette unité se concentrera sur le traitement et la finition des pièces fabriquées, incluant :

- Cabines de Sablage : Pour nettoyer et préparer les surfaces avant peinture ou revêtement.
- Stations de Revêtement par Poudre : Utilisées pour appliquer des revêtements en poudre qui sont ensuite polymérisés pour obtenir des finitions durables et esthétiques.
- Unités de Peinture : Comprenant des cabines de pulvérisation et des équipements de peinture, ces unités permettront l'application de couches de peinture liquide sur les pièces. Elles seront équipées de systèmes de ventilation et de filtration pour assurer un environnement de travail sûr et propre, ainsi que pour garantir une application uniforme et sans défauts.

Unité de Contrôle Qualité

Pour garantir que chaque prototype et pièce fabriquée répond aux standards de qualité les plus élevés, cette unité comprendra :

- Machines de Mesure Tridimensionnelle (CMM) : Pour la vérification dimensionnelle précise des pièces fabriquées, assurant leur conformité aux spécifications.
- Systèmes de vision industrielle : utilisés pour l'inspection automatique des pièces, détectant les défauts de fabrication et assurant une qualité constante.
- Instruments de métrologie : comprenant des micromètres, des calibres et des comparateurs pour les mesures manuelles de haute précision.

Unité des matériaux composites

Cette unité sera dédiée à la fabrication de pièces en matériaux composites, offrant des solutions légères et robustes pour diverses applications. Elle inclura :

- Tables de laminage : pour le processus de superposition des couches de matériaux composites, telles que la fibre de carbone ou la fibre de verre, imprégnées de résine.

- Autoclaves : utilisés pour la polymérisation des pièces en matériaux composites sous haute pression et température, garantissant des propriétés mécaniques optimales.
- Machines de drapage automatique : pour la pose automatique et précise des couches de matériaux composites sur des moules, augmentant l'efficacité et la répétabilité du processus.
- Coupe et de conformation : pour la découpe précise des matériaux composites et leur mise en forme avant le processus de laminage.

5.2.4. Unité spéciale R&D

L'unité spéciale de recherche et développement (R&D) est dédiée à l'exploration de nouvelles technologies et à l'innovation. Dès le lancement de la startup, cette unité se spécialisera dans le développement de modèles de drones, de planeurs et d'UAV pour divers types de missions et de secteurs industriels. Cette spécialisation stratégique renforcera notre capacité à rester à la pointe de l'industrie, en particulier dans les domaines de l'aéronautique et de la robotique.

L'unité R&D est principalement composée des cofondateurs, dont l'expertise technique et la vision stratégique guident nos efforts de recherche. Nous menons des études de marché approfondies pour identifier les besoins émergents et les opportunités de développement spécifiques à ces technologies aériennes. Chaque projet de R&D commence par une analyse de faisabilité détaillée, assurant que nos concepts sont non seulement innovants, mais aussi réalisables et viables sur le plan commercial.

Nous collaborons étroitement avec notre bureau d'études et notre atelier de fabrication pour transformer les idées en prototypes fonctionnels de drones, de planeurs et d'UAV. Cette synergie permet une intégration fluide entre la conception, le prototypage et le développement final. Notre engagement envers la recherche et le développement nous permet de proposer des solutions révolutionnaires qui répondent aux défis actuels et futurs de notre pays.

5.3. Business Model

Segments de clientèle

- Entreprises aéronautiques et aérospatiales : besoin de conception innovante, de prototypage rapide et de fabrication de haute précision.
- Industries manufacturières : besoin de pièces sur mesure, de solutions de fabrication additive et de services de traitement de surface.

5. Start-up et Business Model

- Entreprises de robotique : besoin de développement de concepts technologiques avancés et de solutions R&D.
- Institutions académiques et centres de recherche : besoin de collaborations pour des projets de recherche et de développement technologique.
- Start-ups et PME technologiques : besoin de services de prototypage, d'assemblage électronique et de fabrication en petites séries.

Proposition de valeur

- Solutions sur mesure : offrir des solutions de conception et de fabrication adaptées aux besoins spécifiques de chaque client.
- Technologies avancées : Utilisation de technologies de pointe telles que l'impression 3D, les machines CNC et les matériaux composites pour garantir la qualité et l'innovation.
- Prototypage rapide : capacité à transformer rapidement les idées en prototypes fonctionnels, réduisant les délais de mise sur le marché.
- Expertise technique : combinaison de compétences en ingénierie mécanique, électronique et robotique pour des solutions intégrées et innovantes.
- Qualité supérieure : contrôles de qualité rigoureux et traitements de surface avancés pour assurer des produits fiables et durables.

Canaux de distribution

- Ventes directes : relations directes avec les clients industriels et institutionnels pour des projets personnalisés.
- Partenariats stratégiques : collaboration avec d'autres entreprises technologiques et centres de recherche pour des projets conjoints.
- Présence en ligne : site web informatif et plateforme de commande en ligne pour les services standardisés.
- Événements et salons : participation à des salons professionnels et à des événements industriels pour la promotion et le réseautage.

Relations avec les clients

5. Start-up et Business Model

- Support personnalisé : accompagnement personnalisé pour chaque projet, de la conception à la fabrication.
- Service après-vente : support technique et maintenance pour les produits livrés.
- Communication proactive : feedback régulier et communication ouverte avec les clients pour améliorer continuellement les services.

Sources de revenus

- Frais de conception et de prototypage : revenus issus des services de conception, de simulation et de prototypage.
- Ventes de pièces et de composants : Revenus issus de la fabrication et de la vente de pièces en série.
- Services de R&D : Revenus provenant des collaborations en recherche et développement avec des entreprises et des institutions.
- Services de traitement de surface : Revenus issus des services de revêtement et de peinture.
- Formations et consultations : Revenus issus des programmes de formation et des services de consultation technique.
- Formations sur l'utilisation de nos produits : Revenus générés par les sessions de formation destinées aux clients pour l'utilisation efficace de nos produits, tels que les drones et autres équipements technologiques.

Ressources clés

- Équipements de fabrication : Machines CNC, imprimantes 3D, unités de soudage, autoclaves, etc.
- Équipe technique : ingénieurs, techniciens et experts en R&D.
- Infrastructure : ateliers de fabrication, laboratoires de R&D et bureaux de conception.
- Partenariats stratégiques : Collaborations avec des institutions académiques, des centres de recherche, et des entreprises technologiques.

Activités clés

5. Start-up et Business Model

- Conception et simulation : Développement de concepts innovants et réalisation de simulations avancées.
- Prototypage et fabrication : Création de prototypes et production de pièces en série.
- Recherche et développement : Exploration de nouvelles technologies et développement de solutions innovantes.
- Contrôle qualité : Tests rigoureux et inspection des produits pour assurer la conformité aux normes.
- Commercialisation et vente : Promotion des services et acquisition de nouveaux clients.

Partenaires clés

- Fournisseurs de matériaux : partenariats avec des fournisseurs de matériaux de haute qualité pour les composites, les métaux et les plastiques.
- Institutions académiques : Collaborations avec des universités et des centres de recherche pour des projets de R&D.
- Entreprises technologiques : partenariats avec des entreprises spécialisées en robotique, aéronautique et autres technologies.
- Organismes de certification : Collaboration avec des organismes pour la certification et la conformité des produits.

Structure des coûts

- Coûts d'équipement : investissements dans les machines CNC, imprimantes 3D, autoclaves et autres équipements de fabrication.
- Coûts de personnel : salaire des ingénieurs, techniciens et personnel de support.
- Coûts de recherche et développement : Dépenses liées aux projets de R&D et à l'innovation technologique.
- Coûts opérationnels : frais de maintenance des équipements, utilités et frais généraux de l'atelier et des bureaux.
- Coûts de marketing et vente : Dépenses liées aux campagnes de marketing, à la participation à des salons, et à la prospection commerciale.

5.4. Analyse PESTEL

L'analyse PESTEL, aussi connue sous le nom de méthode ou de modèle PESTEL, est un outil d'analyse stratégique qui permet de repérer les éléments externes (opportunités et menaces) susceptibles d'avoir un effet, de manière positive ou négative, sur une entreprise. Il donne une vision d'ensemble de l'environnement général d'une entreprise [28].

Politique

Les politiques en matière de sécurité, notamment en termes de drones et d'objets volants est strict : chaque expérimentation, test ou exploitation doit être spécifiquement autorisé par une commission wilayale et accordée dans un temps déterminée et dans un périmètre définie par 4 points géographiques, c'est pour ça que notre startup est plus orientée dans la recherche et développement, car les politiques en matière de sécurité ne sont pas encore favorables.

Les subventions gouvernementales de l'Algérie et les incitations fiscales pour les entreprises innovantes et les start-ups peuvent être avantageuses pour financer la R&D et l'expansion de l'entreprise [29].

Économique

La santé générale de l'économie influence la demande de produits technologiques et d'ingénierie. Une économie en croissance peut augmenter les investissements des entreprises en nouvelles technologies.

Les taux d'intérêt influencent le coût du financement pour les projets d'expansion et de R&D, de se coter les startups sont avantagées par un taux nul en Algérie [29].

Pour les exportations et les partenariats internationaux, les fluctuations des taux de change peuvent affecter les marges bénéficiaires, mais les startups sont avantagées par un taux de changes bancaire très bas en Algérie, ce qui avantage les entreprises locales au marché intérieur [29].

Socioculturel

L'évolution des préférences et des attentes des consommateurs en matière de technologie influence les tendances du marché. Avec l'importance croissante qu'à donner le gouvernement algérien dans le domaine de l'agriculture, afin d'assurer la sécurité alimentaire du pays, ce domaine devrait connaître un boom dans les années à venir.

La disponibilité de talents qualifiés en ingénierie et en technologies avancées est cruciale pour le développement et l'innovation, étant donné que les universités algériennes produisent un grand nombre de diplômés en ingénierie.

Technologique

Le rythme rapide des innovations technologiques exige une veille constante pour rester compétitif et adopter les dernières technologies. Cependant, l'investissement en R&D est essentiel pour développer de nouvelles solutions et améliorer les produits existants. L'essor de l'automatisation et des technologies numériques transforme les processus de fabrication et la gestion des projets.

Environnemental

La nécessité de développer des technologies durables et écoresponsables est de plus en plus pressante. Notre entreprise respectera les lois concernant la protection de l'environnement qui peuvent imposer des restrictions sur les matériaux utilisés et les processus de fabrication.

Légal

La protection des innovations et des technologies développées par l'entreprise est cruciale pour maintenir un avantage concurrentiel. Les produits, notamment dans le domaine de l'aéronautique et des drones, doivent respecter des normes de sécurité strictes de notre pays pour éviter les risques et garantir la conformité réglementaire.

La réglementation en matière de drones est rigoureuse. Chaque expérimentation, test ou exploitation de drones doit être autorisée spécifiquement par une commission wilayale. L'autorisation est accordée dans un délai défini et pour un périmètre précisément délimité par quatre points géographiques. C'est pourquoi notre startup se concentrera principalement sur la recherche et le développement, car les politiques en matière de sécurité ne sont pas encore favorables à une utilisation étendue des drones dans des missions opérationnelles.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but principal de ce projet est de répondre au besoin d'innovation dans le domaine de l'agriculture en implémentant des systèmes asservis de mini-hélicoptères capables de porter des réservoirs de pesticides et de produit chimique destinés à l'application sur le terrain. À cet effet, nous avons proposé une nouvelle conception en se basant sur le rétrofit d'un modèle existant. Les propriétés aérodynamiques de ce mini-hélicoptère ont été optimisées par une étude CFD sur ANSYS Fluent et des simulations numériques, validant théoriquement la possibilité de ce système d'être réalisé. Une maquette a été ensuite réalisée par impression 3D destinée à être utilisée dans les essais en soufflerie, mais dû à la contrainte de temps, cela fut impossible.

Ce projet a illustré les difficultés liées à la réalisation d'un système complexe comme un mini-hélicoptère en Algérie, notre plus gros obstacle était l'acquisition des pièces du mini-hélicoptère qui nécessitaient un usinage délicat et qui étaient trop coûteuses à fabriquer. Néanmoins, l'expertise que nous avons acquise en matière de conception à l'aide de logiciels de CAO comme SOLIDWORKS et CATIA, ainsi que la phase de simulation en utilisant ANSYS Fluent, nous a permis d'élargir la portée de ce projet à la création d'une start-up spécialisée dans les mini-hélicoptères, qui, espérons-le, améliorera ce domaine dans notre pays.

Perspective et travaux futurs

- Réaliser une start-up dédiée à l'étude, la conception et la réalisation des mini-hélicoptères destinés à diverses applications.
- Réaliser des simulations numériques plus approfondies sur les propriétés aérodynamiques du mini-hélicoptère, en utilisant différents modèles de turbulence, et les comparer avec les résultats du modèle k-epsilon.
- Tester la maquette et ensuite réaliser un modèle complet fonctionnel comme prototype et preuve de concept.
- Intégration d'ingénieurs électriciens et automaticiens qui prendront en charge la partie électrique et commande du système.

RÉFÉRENCES

- [1] Hannah RITCHIE, Lucas RODÉS-GUIRAO, Edouard MATHIEU, Marcel GERBER, Esteban ORTIZ-OSPINA, Joe HASELL and Max ROSER (2023) - “Population Growth” [en ligne]. Disponible à l’adresse : <https://ourworldindata.org/population-growth>
- [2] Richard Brain, Daniel Perkins, Lula Ghebremichael, Mark White, Greg Goodwin, and Mike Aerts. The Shrinking Land Challenge 26 Janvier 2023, *ACS Agricultural Science & Technology*. 152–157 Publication
- [3] Drone Industry Insight, Global Drone Market Report 2023-2030 [en ligne], May 2024. Disponible à l’adress : <https://droneii.com/product/drone-market-report>
- [4] DJI Agriculture, *About Us* [en ligne]. Disponible sur : <https://ag.dji.com/about-us>
- [5] Statista Research Departement, Agriculture in Algeria – statistics & facts [en ligne], Jul 8 2024. Disponible sur : <https://www.statista.com/topics/9343/agriculture-in-algeria/#topicOverview>
- [6] Tenn Hian-kun, 30 class RC helicopter [en ligne], 18 juin 2006, disponible sur : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RC_helicopter_30class.jpg?uselang=fr
- [7] TAYLOR, Michael John Haddrick, and TAYLOR, Michael Joseph. History of Helicopters. Royaume-Uni, *Hamlyn*, 1984.
- [8] TAYLOR, Michael John Haddrick. The Chronology of Flight: 1940 to the present. États-Unis, *Chelsea House*, 2000.
- [9] Klaus Schneider, Graupner Bell 212 (1973 model), 2016 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.vrhc.co.uk/index.php/en/graupner/bell-212>
- [10] Brushless Motor H3748 1700KV [en ligne] Disponible sur : <https://www.amazon.co.uk/VGEBY-Helicopter-Brushless-Waterproof-Torsion/dp/B09MTF7KCQ>
- [11] Viswas, S. K., Shanmugam, M., Prajapati, S. Venkatesan, C. *Development of Mechanical Components for Autonomous Mini Helicopter*, XIX National Seminar on Aerospace Structures, VIT, VELLORE, INDIA, February 23-25 2017.

- [12] Adrien Drouot. *Stratégies de commande pour la navigation autonome d'un drone projectile miniature*. Thèse de doctorat : Automatique/Robotique. Université de Lorraine, 2013. Français. NNT : 2013LORR0172. tel-01750350v2
- [13] Helixaero, Ecole de formation au pilotage d'hélicoptères. *Les Différents Rotors Hélicoptère* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.helixaero.com/ecole/theorie-de-l-helicoptere/les-differents-rotors.html>
- [14] Muresa, B., Folea, S., Nascu, I., Ionescu, C. M., De Keyser, R. *Identification and modeling of the three rotational movements of a miniature coaxial helicopter*, SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International :1490-1504, December 2013.
- [15] Shenzhen DJI Sciences and Technologies Ltd , *DJI Phantom 4 camera drone* [en ligne], disponible sur : <https://www.dji.com/phantom-4-pro-v2>
- [16] Pauleth Ip, *Quadcopter vs Drone: What's the Difference?*[en ligne] November 22, 2022. Disponible sur : <https://www.adorama.com/alc/quadcopter-vs-drone/>
- [17] NOVAE, *Retrofit et modification* [en ligne], 2024. Disponible sur : <https://www.novae-group.com/fr/mro/retrofit>
- [18] Patrickmodelisme, *ALIGN T-REX 550E PRO DFC*, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.patrickmodelisme.com/helico-align-t-rex-550e-pro-dfc-rh55e07x.html>
- [19] ALIGN, *ALIGN T-REX 550E PRO DFC Instruction Manual, RH55E06XT* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.align.com.tw/ManuaLib/Heli/Helicopter/RH55E06X.pdf>
- [20] ALIGN, *ALIGN E1 PLUS Agricultural Helicopter* [en ligne]. Disponible sur : https://shop.align.com.tw/product_info.php?products_id=6868&language=en
- [21] L. J. Smee, *T-REX 550E PRO DFC Model*, GrabCAD [en ligne] Disponible sur : <https://grabcad.com/library/t-rex-550e-pro-dfc-1>
- [22] PX4 Autopilot User Guide, *Mounting a compass (or GNSS/Compass)* [en ligne]. Disponible sur : https://docs.px4.io/main/en/assembly/mount_gps_compass.html
- [23] ZAPER, *Filament Data Sheet* [en ligne]. Disponible sur : <https://3d-drucker-filament.de/en/info/filament-print-area-printing-tips-print-settings.html>
- [24] CREALITY, *CR-10 Smart 3D printer parameters* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.creality.com/products/creality-cr-10-smart-3d-printer>

- [25] ELEGOO, *Neptune 4 Max 3D printer features* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.elegoo.com/products/neptune-4-max-fdm-3d-printer#specification>
- [26] Gareth D. Padfield. *Helicopter Flight Dynamics Including a Treatment of Tiltrotor Aircraft (Aerospace Series)*, Wiley, 2018
- [27] Venkatesan, C. *Fundamentals of Helicopter Dynamics*, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2015
- [28] Pierre Facon, Le Coin des Entrepreneurs, *Analyse PESTEL : définition, utilité et présentation des 6 composants* [en ligne], 17 mai 2021. Disponible sur : <https://www.lecoindesentrepreneurs.fr/analyse-pestel-definition-outil-et-composants/>
- [29] Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire, N°83, 31 décembre 2020.

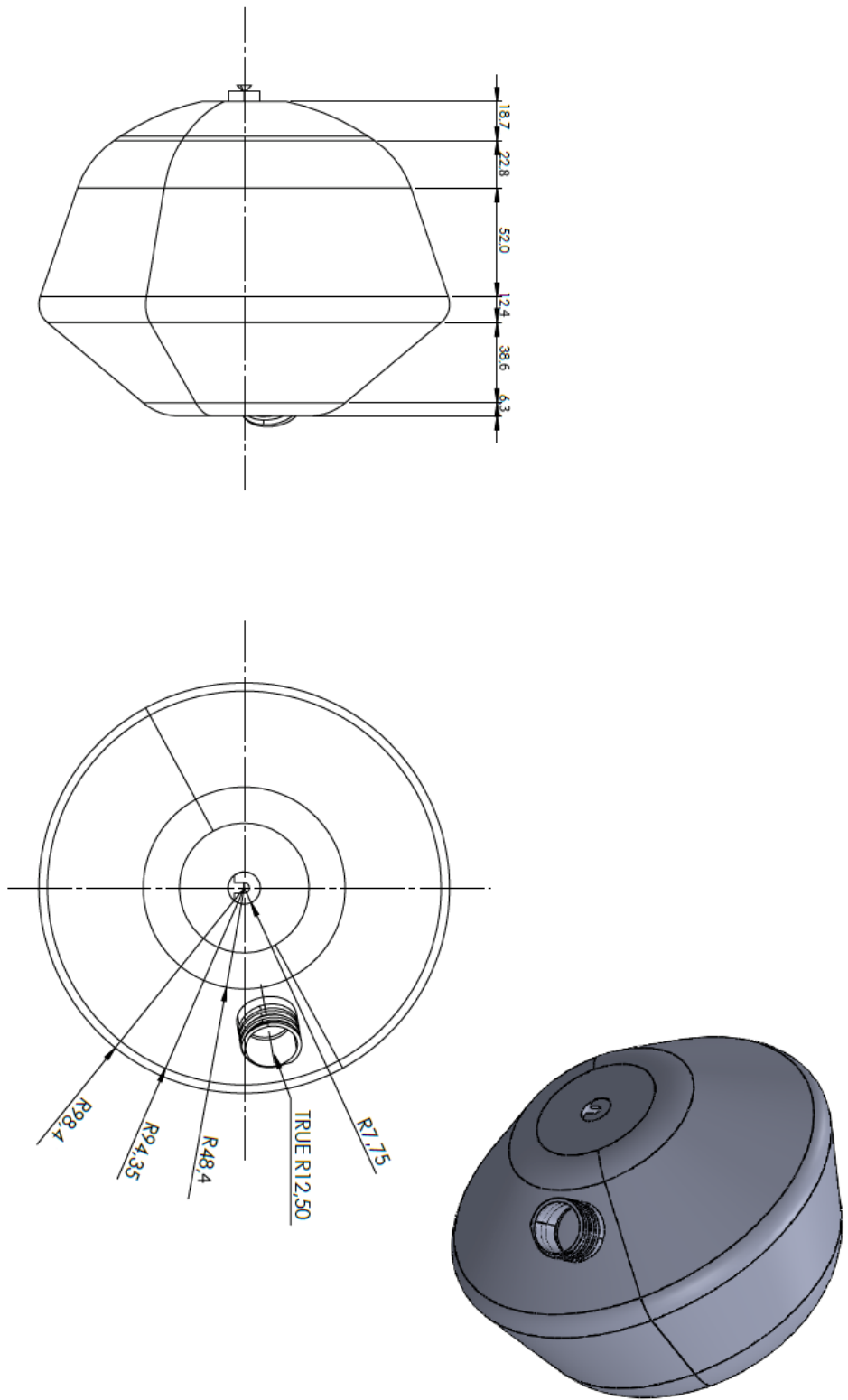
ANNEXE

Liste des besoins :

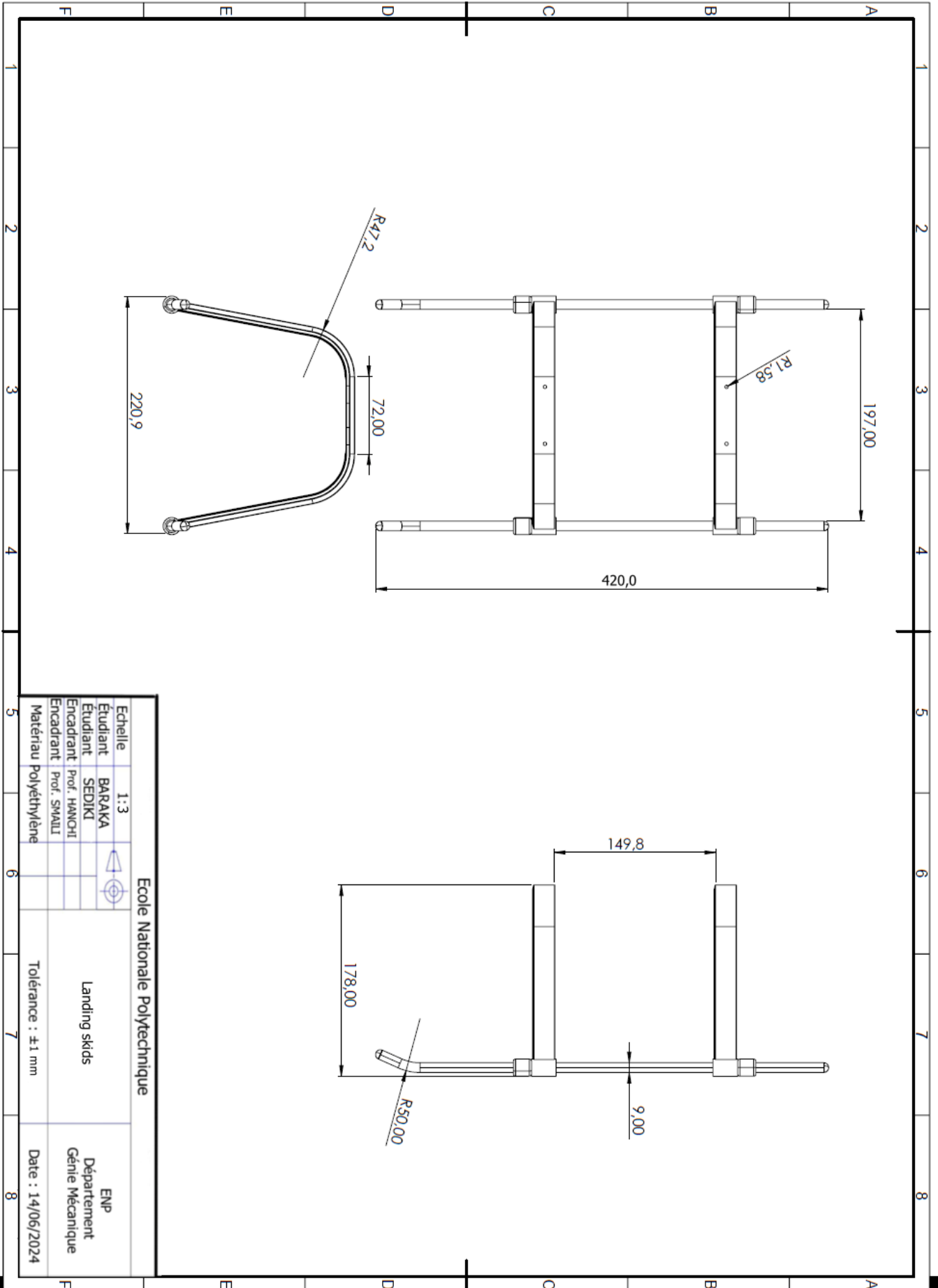
N ^o	Objet/Fonction	Spécifications	Site de l'originale	Obs.
01	Châssis	À trouver sur le site	https://a.aliexpress.com/Exam5fEV	
02	Pales principales	<ul style="list-style-type: none"> • Profil : symétrique • Longueur x profondeur : 550x50 mm • Épaisseur : 12 mm • Diamètre d'axe : 4 mm • Masse : environ 210 g 	https://www.helistore.fr/fr/pales-principales/676-pales-fibre-de-carbone-550-align-hd550b.html	
03	Pales anti-couple	<ul style="list-style-type: none"> • Profil : symétrique • Longueur : 85 mm • Largeur : 4.9 mm • Diamètre d'axe : 3 mm • Masse : environ 11 g par set. 	https://www.helistore.fr/fr/pales-anticouple/1573-pales-anticouple-85-mm-align-hq0850c.html	
04	Radiocommande FlySky i6x	https://www.flysky-cn.com/fsi6x	https://www.amazon.fr/Flysky-%C3%89metteur-r%C3%A9cepteur-FS-iA6B-Transmitter/dp/B0744DPPL8?th=1	
05	Batterie LI-PO	10,000-12,000 mAh 22.2 V 6S		
06	Moteur	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentation : 6S (22,2 volts) • Courant maxi continu : 115A/195A (5 sec) • Puissance maxi : 2550W/4330W (5 sec) • Valeur KV: 960KV • Enroulements de stator : 12 • Nombre de pôles : 8 • Dimensions : 6x52x89.1mm • Masse : 380g 	https://www.helistore.fr/fr/moteurs-electriques/712-moteur-brushless-align-730mx-960kv-hml73m02.html	
07	Servomoteur	Stall torque : <ul style="list-style-type: none"> • 4.8 V : (4.5 kg.cm) <ul style="list-style-type: none"> • 6.0 V : (5.5 kg.cm) Speed : • 4.8 V : 0.06 sec/60° • 6.0 V : 0.05 sec/60° 	https://www.ercmarket.com/ds655-digital-servo/	Quantité : 3
08	Servomoteur	<ul style="list-style-type: none"> • Couple : 8,5 kg.cm (4,8 V) / 10 kg.cm (6,0 V) • Vitesse : 0.09 sec/60° (4.8 V) / 0.07 sec/60° (6,0 V) • Voltage : DC 4.8-6 volts 	https://www.helistore.fr/fr/servos-align/334-servo-digital-ds615s-align-hsd61502.html	
09	Autopilote : PixHawk Px4	Pixhawk 2.4.8 prend en charge le dernier firmware officiel ardupilot et le micrologiciel PX4.	https://fr.aliexpress.com/item/1005005167479286.html	
10	ESC	À trouver sur le site	https://www.helistore.fr/fr/esc-bee-castle/231-	

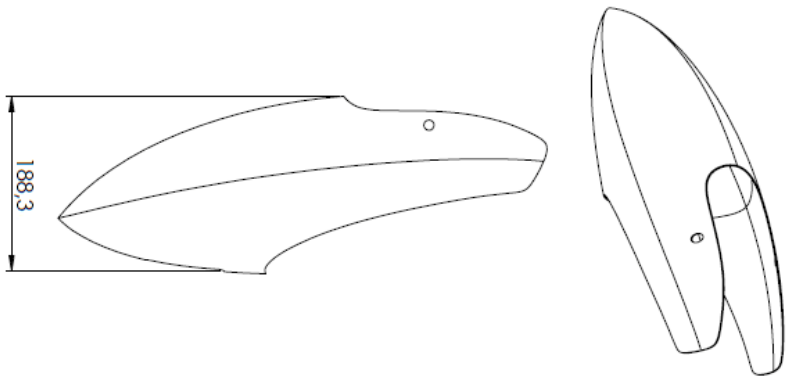
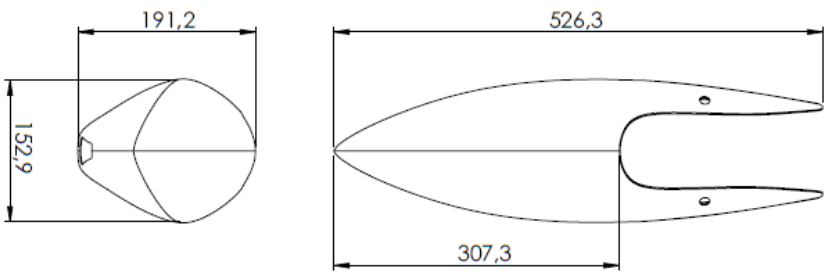
			talon-90- castle-creations.html	
11	Fibre de verre	120 g/m ²		5 m ²
12	Résine époxy	Résine époxy si disponible Sinon résine polyester.		
13	Diluent			2 bouteilles
14	Polystyrène			1 bloc

Dessins techniques :

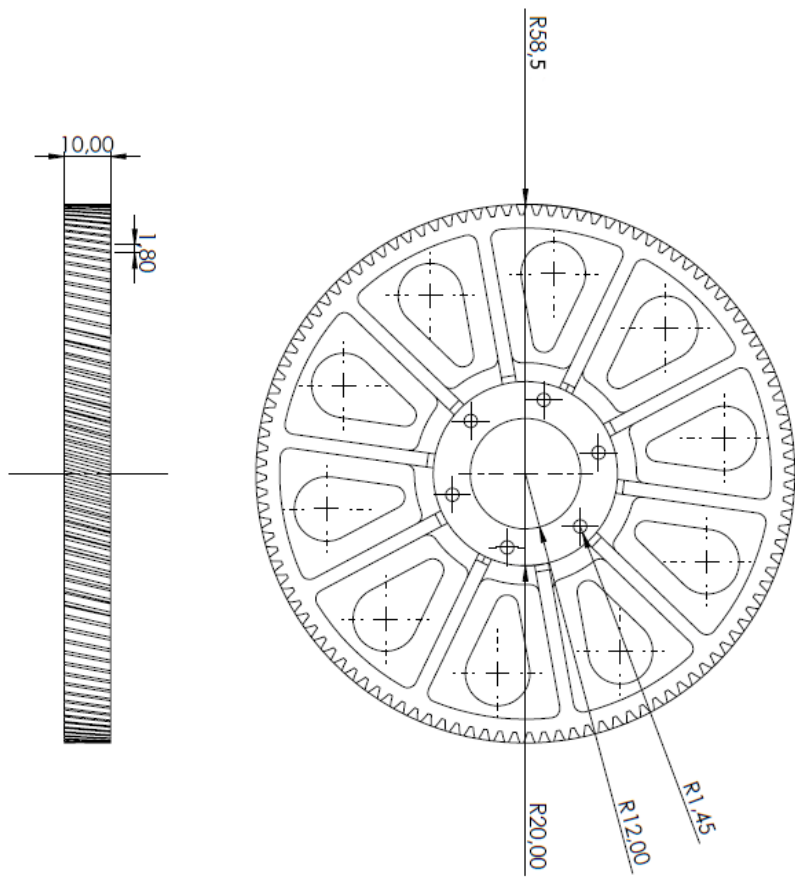


Echelle		1:2	Ecole Nationale Polytechnique	
Étudiant	BARAKA		Reservoir	
Étudiant	SEDKI			
Encadrant	Prof. HANCHI			
Encadrant	Prof. SMAILI			
Matériau	polyéthylène		Tolérance : ±0.1 mm	ENP Département Génie Mécanique
				Date : 14/06/2024





Ecole Nationale Polytechnique	
Echelle	1:5
Étudiant	BARAKA
Encadrant	SEDIKI
Encadrant	Prof. HANCHI
Encadrant	Prof. SMAILI
Matériau	Polyéthylène
Canopy	
Tolérance : ± 1 mm	
Date : 14/06/2024	
ENP Département Génie Mécanique	



Echelle		1:1	Ecole Nationale Polytechnique	
Etudiant	BARAKA		Main Gear	ENP
Etudiant	SEDIKI			
Encadrant	Prof. HMCHI			
Encadrant	Prof. SMAÏLI		Tolérance : ± 0.5 mm	Date : 14/06/2024
Matériau	Aluminium			

