

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté de Génie de la Construction
Département d'Electromécanique

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

Domaine : **Science Et Technologie**

Filière : **Electromécanique**

Spécialité : **Maintenance Industrielle**

Thème

Conception et réalisation d'un drone à voilure fixe

Présenté par :

M. Chikhi Ramzi

M. At yamena Azouaou

Dirigé par :

M. Belgaid Hocine

Mémoire soutenu publiquement le jeudi 26 septembre 2024, devant le jury composé de :

| | | | |
|---------------------|-----|-----------|-------|
| M. Zouaoui Salah | MCA | Président | UMMTO |
| M. Ouelmokhtar Hand | MCB | Examineur | UMMTO |
| M. Si Ahmed Hamid | MAA | Examineur | UMMTO |
| M. Belgaid Hocine | MCB | Encadreur | UMMTO |

Remerciement

Avant tout, Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage, la persistance et nous avoir permis d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé, de près comme de loin, dans l'élaboration de ce mémoire de fin d'études et tout au long de notre cycle de formation.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et reconnaissance, en particulier, envers notre encadreur Monsieur BELGAID Hocine, qui s'est toujours montrés très disponible, à l'écoute et très patient durant toute la période de préparation de notre projet de fin d'études.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury Dr OUELMOUKHTAT, Dr SI AHMED et particulièrement le doyen de la faculté Monsieur ZOUAOUI Salah.

Il convient également de remercier La Ligue de Wilaya des Activités Scientifiques et Techniques de jeunes de TIZI-OUZOU et notre Club Scientifique GeekTronic.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches, amis et à l'ensemble des étudiants d'électromécanique de la promotion 2023-2024.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents, qui m'ont toujours soutenu dans mes études grâce à leur amour et à leurs sacrifices,

C'est vous qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici. Aucun honneur ne pourra vous exprimer ma gratitude,

À mes trois frères KOUSSILA, YOUBA et Med AREZKI, qui m'ont donné le courage et la volonté tout au long de mon parcours académique,

A toute la famille AT YAMENA et ZENIA,

À mon cher binôme et à sa famille, pour sa patience et son respect envers moi, ainsi que pour sa collaboration, et son soutien tout au long de mes études,

À T. SOUAD qui a été avec moi dans les bons et les mauvais moments et m'a donné le courage,

À mes amis les plus proches SALEM, WAHID, SADEK, RAMZI et Med SALAH, avec qui j'ai de beaux souvenirs qui resteront à jamais gravés dans mon cœur,

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à faire de moi ce que je suis aujourd'hui.

AZOUAOU

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

La mémoire de mon père CHIKHI Noureddine, Que dieu t'accueille dans son vaste paradis. Aucune dédicace ne saurait exprimer, ma fierté, mon amour, mon estime, et ma gratitude pour tous tes sacrifices quand tu étais vivant. Tu resteras à jamais gravé dans mon cœur.

Ma très chère mère AKILA RAHMANI, Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager, de sacrifier et de prier pour moi. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

Mes deux frères Walid et Samy, synonyme de fraternité merci d'avoir partagé avec moi tous les moments d'émotions le long de mon parcours.

À ma famille MATERNELLE, pour leurs soutiens et leur présence.

À tous Mes Cousins SALIM, ZINEDDINE, YACINE, AISSA, AMINE, HASSANE, RAYANE et ADAM.

À tous mes amis qui ont contribué à la réalisation de ce travail, en particulier Wahid, Med SALAH, AZOUAOU.

CHIKHI RAMZI

Résumé

Ce présent projet de fin d'études est dédié à la conception et à la réalisation d'un drone à voilure fixe en utilisant des méthodes et des technologies basées sur la nouveauté et la durabilité.

La conception mécanique d'un drone à voilure fixe s'est révélée être un exercice délicat, requérant un équilibre subtil entre légèreté, rigidité et aérodynamisme. Les principaux défis relevés lors de cette étape ont été la sélection des matériaux, l'optimisation de la structure, l'intégration des composants, etc. En dépit de ces obstacles, les objectifs fixés ont été atteints, tels que l'acquisition des caractéristiques de vol désirées, le respect des contraintes de poids, et bien d'autres.

Le cerveau et les sens d'un drone à voilure fixe sont composés d'électronique et d'instrumentation. Il est essentiel de les avoir afin de garantir un vol stable, autonome et sécurisé. Les différents éléments électroniques, comme les microcontrôleurs, les capteurs (accéléromètres, gyroscopes, etc.) et les actionneurs (moteurs, drivers), collaborent étroitement afin de recueillir des informations sur l'environnement, traiter l'information et contrôler les éléments mécaniques du drone.

Pour leur part, les logiciels embarqués ont un rôle essentiel dans la mise en place des algorithmes de contrôle de vol, de navigation et de mission. Ils offrent au drone la possibilité de prendre des décisions en temps réel, de s'ajuster aux conditions évolutives et de réaliser les tâches qui lui sont confiées.

Abstract

This project is dedicated to the design and development of a fixed-wing drone using innovative and sustainable methods and technologies, this project aims to design and develop.

The mechanical design of a fixed-wing drone has proven to be a complex endeavor, requiring balance of both lightweight construction, rigidity, and aerodynamics parameters. The principal challenges encountered in this work are material selection, structural optimization, and component integration. Despite these obstacles, the established objectives were successfully achieved, including attaining of desired flight characteristics, adherence to weight constraints, among others parameters, despite inherent technical challenges

The fixed-wing drones are equipped with sensors, electronic control units (ECU's), and actuators, all operating in closed loop system to ensure stability, autonomous functionality, and safe fly, the ECU's which are microcontrollers integrated with advanced software and navigation algorithms, same as the system brain. They enable autonomous and real-time decision-making by processing interoceptive and exteroceptive data collected from the sensors, which is then used to control the actuators, allowing the drone to execute assigned tasks in response to changing environment conditions.

Furthermore, embedded software plays a crucial role in implementing flight control, navigation, and mission algorithms. This software enables the drone to make real-time decisions, adapt to changing conditions, and perform assigned tasks.

ملخص

يتناول هذا المشروع النهائي لنيل شهادة ماستر تصميم وتطوير طائرة مسيرة ذات جناح ثابت باستخدام طرق وتقنيات مبتكرة ومستدامة.

لقد ثبت أن التصميم الميكانيكي لهذا النوع من الطائرات هو مسعى معقد، يتطلب توازنًا دقيقًا بين خفة الوزن والصلابة والديناميكية الهوائية. كانت التحديات الرئيسية التي واجهت هذه المرحلة تشمل اختيار المواد، وتحسين الهيكل، ودمج المكونات. على الرغم من هذه العقبات، تم تحقيق الأهداف المحددة بنجاح، بما في ذلك تحقيق خصائص الطيران المطلوبة، والامتثال لقيود الوزن، وغيرها.

يتكون دماغ وحواس الطائرة مسيرة ذات جناح ثابت من مكونات إلكترونية وأدوات قياس (حساسات)، وهي ضرورية لضمان الطيران المستقر، الذاتي والأمن. تعمل العناصر الإلكترونية المختلفة، مثل الميكروكنترولر، والحساسات (مثل مقياس التسارع، والجيروسكوب، وما إلى ذلك)، والمحركات بتنسيق وثيق لجمع المعلومات عن البيئة، ومعالجة هذه المعلومات، والتحكم في المكونات الميكانيكية للطائرة.

علاوة على ذلك، يلعب البرنامج المدمج دورًا حاسمًا في تنفيذ خوارزميات التحكم في الطيران، والملاحة، والمهمة. يُمكن هذا البرنامج الطائرة من اتخاذ قرارات في الوقت الحقيقي، والتكيف مع الظروف المتغيرة، وأداء المهام الموكلة إليها

Table des matières

| | |
|--|------------|
| <i>Remerciement</i> | I |
| <i>Dédicaces</i> | II |
| <i>Dédicaces</i> | II |
| <i>Résumé</i> | III |
| <i>Liste des Figures</i> | IV |
| <i>Liste des tableaux</i> | V |
| <i>Liste des abréviations</i> | VI |
| <i>Liste des Acronymes</i> | VII |
| Introduction générale | 1 |
| 1. Généralités sur les drones | 3 |
| 1.1. Introduction | 3 |
| 1.2. Histoire du drone | 3 |
| 1.2.1. Le drone : histoire d'une invention militaire | 3 |
| 1.2.2. Le drone : histoire des applications civiles | 4 |
| 1.3. Classification des UAV | 5 |
| 1.3.1. Les différents types de drones | 5 |
| 1.3.2. Les différents types de UAV à voilure fixe | 10 |
| 1.4. Classification des modes de vol | 13 |
| 1.4.1. Vol libre | 13 |
| 1.4.2. Vol circulaire | 14 |
| 1.4.3. Vol Radiocommandé | 14 |
| 1.5. Application non-militaire de drone a voilure fixe | 15 |
| 1.6. Systèmes de contrôle des drones à voilure fixe | 16 |
| 1.7. Principe aérodynamique | 16 |
| 1.7.1. L'importance du principe aérodynamique | 16 |
| 1.7.2. Atmosphère | 17 |
| 1.7.3. Pression atmosphérique | 18 |
| 1.7.4. Atmosphère standard | 18 |
| 1.7.5. Température de l'air | 19 |
| 1.7.6. Densité de l'aire | 19 |
| 1.8. Aile d'avion | 20 |
| 1.9. Théorème de BERNOULLI | 21 |
| 1.10. Conclusion | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 2. Bases scientifiques et technologiques des avions à voilure fixe ... | 24 |
| 2.1. Introduction | 24 |
| 2.2. Body Frame | 24 |
| 2.3. Surface de contrôle de l'avion..... | 25 |
| 2.4. Structure d'un avion | 30 |
| 2.5. Forces agissant en vol | 33 |
| 2.6. Opposition en vol | 34 |
| 2.7. La portance..... | 34 |
| 2.8. La traînée..... | 35 |
| 2.8.1. Caractéristiques..... | 36 |
| 2.8.2. Détermination | 37 |
| 2.8.3. Différentes sortes de trainée : | 37 |
| 2.8.4. La résultante R | 39 |
| 2.9. La voilure | 40 |
| 2.9.1. Surface de référence..... | 40 |
| 2.9.2. Caractéristiques géométriques d'une voilure..... | 41 |
| 2.10. Hélice..... | 43 |
| 2.10.1. Profil d'une pale..... | 43 |
| 2.10.2. Pas d'une hélice | 44 |
| 2.10.3. Le glissement | 46 |
| 2.10.4. Vitesse en bout de pale..... | 46 |
| 2.11. Conclusion..... | 47 |
| 3. Bases physiques et mécanique des drones à voilure fixe | 49 |
| 3.1. Introduction | 49 |
| 3.2. Cahier des charges..... | 49 |
| 3.3. Profil d'aile..... | 49 |
| 3.4. La Corde..... | 50 |
| 3.5. Épaisseur | 50 |
| 3.6. Épaisseur relative | 50 |
| 3.7. Ligne moyenne | 51 |
| 3.8. Angle d'incidence nulle | 51 |
| 3.9. Angle de calage | 51 |
| 3.10. Envergure et surface | 52 |
| 3.11. Surface | 52 |
| 3.12. Allongement | 52 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 3.13. | Différents types de profils | 52 |
| 3.13.1. | Biconvexe symétrique..... | 52 |
| 3.13.2. | Biconvexe dissymétrique..... | 53 |
| 3.13.3. | Plan convexe | 53 |
| 3.13.4. | Plan creux..... | 53 |
| 3.13.5. | Double courbure..... | 53 |
| 3.13.6. | Supercritique | 54 |
| 3.13.7. | Laminaire | 54 |
| 3.14. | Aile NACA 4415 | 55 |
| 3.14.1. | Air-foil Tools..... | 55 |
| 3.14.2. | Le profil NACA 4415-il..... | 56 |
| 3.14.3. | Applications | 57 |
| 3.15. | Nombre de Reynolds | 57 |
| 3.15.1. | Calcul du Nombre de Reynolds | 58 |
| 3.15.2. | Applications du Nombre de Reynolds | 58 |
| 3.16. | La portée & La trainée..... | 59 |
| 3.16.1. | Comprendre les Coefficients Aérodynamiques | 59 |
| 3.16.2. | Analyse des Graphes..... | 59 |
| 3.16.3. | Applications des Graphes | 62 |
| 3.16.4. | Calculer la portance (L) | 62 |
| 3.16.5. | Calculer la traînée (D)..... | 63 |
| 3.16.6. | Analyser les résultats | 63 |
| 3.17. | Moteur | 63 |
| 3.17.1. | Facteurs Déterminants de la Puissance et de la Vitesse..... | 64 |
| 3.17.2. | Formules de Calcul | 64 |
| 3.18. | Conclusion..... | 65 |
| | 4. Conception et Réalisation mécanique | 67 |
| 4.1. | Introduction | 67 |
| 4.2. | SolidWorks | 67 |
| 4.2.1. | Les bases de SolidWorks..... | 67 |
| 4.2.2. | Domaines d'utilisations | 67 |
| 4.3. | Matériaux utilisés | 68 |
| 4.3.1. | Polystyrène..... | 68 |
| 4.3.2. | Papier Kraft..... | 69 |
| 4.4 | matériels utilisés..... | 70 |

| | |
|--|----|
| 4.4.1. Colle..... | 70 |
| 4.4.2. Matériel de mesure..... | 72 |
| 4.4.3. Matériel de découpage | 72 |
| 4.5. Techniques utilisées..... | 75 |
| 4.5.1. Habillage..... | 77 |
| 4.6. Aile..... | 78 |
| 4.6.1. Conception | 78 |
| 4.6.2. Réalisation..... | 81 |
| 4.7. Fuselage..... | 82 |
| 4.7.1. Conception | 83 |
| 4.7.2. Réalisation..... | 84 |
| 4.8. Élévateur et Gouverne de direction..... | 84 |
| 4.9. Manette..... | 86 |
| 4.9.1. Conception | 86 |
| 4.9.2. Réalisation..... | 87 |
| 4.10. Assemblage finale..... | 88 |
| 4.11. Conclusion..... | 90 |

5. Instrumentation - Conception et réalisation de la partie électronique..... 92

| | |
|--|-----|
| 5.1. Introduction..... | 92 |
| 5.2. Arduino..... | 92 |
| 5.2.1. L'Arduino Nano..... | 92 |
| 5.2.2. Arduino NANO Pin Out | 94 |
| 5.2.3. Arduino IDE..... | 96 |
| 5.3. La Batterie..... | 97 |
| 5.3.1. Ampère-heure (Ah)..... | 98 |
| 5.3.2. Voltage de la batterie..... | 98 |
| 5.3.3. Différents types de batteries pour outils sans fil..... | 98 |
| 5.4. Chargeur de batterie | 99 |
| 5.5. Joystick..... | 100 |
| 5.5.1. Branchement | 101 |
| 5.5.2. Code | 101 |
| 5.6. Servo moteur | 102 |
| 5.6.1. Branchement | 103 |
| 5.6.2. Code | 104 |

| | |
|---|-------------|
| 5.7. Moteurs Coreless (Sans Noyau)..... | 104 |
| 5.7.1. Moteur à micro-vibrations (Moteur de drone de 3,7 volts) | 105 |
| 5.8. Driver L298N mini :..... | 107 |
| 5.8.1. Les « Ponts en H » | 108 |
| 5.8.2. Branchement | 110 |
| 5.8.3. Code Arduino | 110 |
| 5.9. Gyroscope & Accéléromètre MPU6050 | 110 |
| 5.9.1. Branchement | 111 |
| 5.9.2. Code Arduino | 112 |
| 5.10. Radio NRF24L01 | 113 |
| 5.10.1. Branchement | 114 |
| 5.10.2. Code | 114 |
| 5.11. La Radiocommande | 116 |
| 5.11.1. L'émetteur | 116 |
| 5.11.2. Le récepteur | 117 |
| 5.11.3. Présentation de la commande RC | 118 |
| 5.11.4. Circuit de la commande RC Émetteur. | 118 |
| 5.11.5. Circuit du drone a voileure Fixe | 120 |
| 5.12. Régulation et asservissement PID | 123 |
| 5.12.1. L'action Proportionnelle..... | 124 |
| 5.12.2. L'action Intégrale | 125 |
| 5.12.3. L'action Dérivée | 125 |
| 5.12.4. L'action (PID) Proportionnelle, Intégrale, Dérivée..... | 126 |
| 5.12.5. Méthode de réglage des paramètres PID | 127 |
| 5.12.6. Code Arduino | 127 |
| 5.13 Conclusion..... | 128 |
| Conclusion Générale | 129 |
| Annexe | VIII |
| Bibliographie | IX |
| Webographie | X |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| FIGURE 1 LE 2 JUILLET 1917, MAX BOUCHER, FAISAIT VOLER SON AVION SANS PILOTE | 4 |
| FIGURE 2 DRONE MONOROTOR | 7 |
| FIGURE 3 DRONE MULTIROTOR | 8 |
| FIGURE 4 DRONE A VOILURE FIXE | 9 |
| FIGURE 5 DRONE HYBRIDE VTOL A VOILURE FIXE..... | 9 |
| FIGURE 6 _ FIGURE MONTRANT LA GRANDEUR DES AILES D’UN PLANNEUR | 10 |
| FIGURE 7 _ FIGURE MONTRANT UN MOTOPLANEUR | 11 |
| FIGURE 8 _ FIGURE MONTRANT UN MODELE A MOTEUR THERMIQUE | 12 |
| FIGURE 9 _ MAQUETTE VERTOL H-21 « BANANE VOLANTE » EPOQUE MODERNE | 13 |
| FIGURE 10 _ MODELE DE VOL LIBRE DU CLUB FRANÇAIS F1D..... | 13 |
| FIGURE 11 _ EQUIPE DE LA FFAM DANS UN CONCOURS DE VOL CIRCULAIRE | 14 |
| FIGURE 12 GROUPE DE LA FFAM DANS LE VOL COMMANDE | 15 |
| FIGURE 13 SCHEMA D'UNE SECTION DE PROFIL AERODYNAMIQUE | 20 |
| FIGURE 14 FLUX D'AIR AUTOUR DE L'AILE | 20 |
| FIGURE 15 _ AXE DE TANGAGE, DE ROULIS ET LACET | 25 |
| FIGURE 16 _ LES AXES D’AVION | 25 |
| FIGURE 17 _ LE ROLE DES AILERONS | 26 |
| FIGURE 18 _ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L’ELEVATEUR | 27 |
| FIGURE 19 _ DEMONSTRATION DES ELEVATEURS | 28 |
| FIGURE 20 _ FONCTIONNEMENT DE LA GOVERNE DE DIRECTION | 29 |
| FIGURE 21 FONCTIONNEMENT DES SPOILERS | 30 |
| FIGURE 22 _ COMPOSITION D’UN ATR72 | 31 |
| FIGURE 23 _ FUSELAGE D’UN AVION | 31 |
| FIGURE 24 _ EMPENNAGE CLASSIQUE | 32 |
| FIGURE 25 _ EMPENNAGE A MULTIPLES DERIVES | 32 |
| FIGURE 26 _ TRAIN D’ATTERRISSAGE CLASSIQUE | 33 |
| FIGURE 27 _ LES FORCES AGISSANTES EN VOLE | 34 |
| FIGURE 28 _ CREATION DE LA PORTANCE | 35 |
| FIGURE 29 _ CREATION DE LA TRAINEE | 36 |
| FIGURE 30 _ LA RESULTANTE | 39 |
| FIGURE 31 _ LA SURFACE DE L’AVION | 40 |
| FIGURE 32 _ ENVERGURE D’UN AVION | 41 |
| FIGURE 33 LA CORDE MOYENNE D’UN PROFILE D’AILE | 42 |
| FIGURE 34 _ ALLONGEMENT D’UNE AILE RECTANGULAIRE | 42 |
| FIGURE 35 _ ALLONGEMENT D’UNE AILE | 42 |
| FIGURE 36 _ FLECHE D’UNE AILE D’AVION | 43 |
| FIGURE 37 PROFIL D’UNE PALE | 43 |
| FIGURE 38 PAS GEOMETRIQUE | 44 |
| FIGURE 39 PAS OUVERT | 45 |
| FIGURE 40 PAS DEVELOPPER | 45 |
| FIGURE 41 PAS DE GLISSEMENT | 46 |
| FIGURE 42 VITESSE EN BOUT DE PALE | 46 |

| | |
|---|----|
| FIGURE 43 LE PROFIL D'AILE | 50 |
| FIGURE 44 _ L'ÉPAISSEUR DE L'AILE | 50 |
| FIGURE 45 L'ÉPAISSEUR RELATIVE D'UNE AILE D'AVION | 51 |
| FIGURE 46 _ LIGNE MOYENNE DE L'AILE | 51 |
| FIGURE 47 _ L'ANGLE D'INCIDENCE D'UNE AILE | 51 |
| FIGURE 48 _ ANGLE DE CALAGE | 52 |
| FIGURE 49 _ PROFIL BICONVEXE SYMÉTRIQUE | 52 |
| FIGURE 50 _ PROFIL BICONVEXE DISSYMMÉTRIQUE | 53 |
| FIGURE 51 _ PROFIL PLAN CONVEXE | 53 |
| FIGURE 52 _ PROFIL PLAN CREUX | 53 |
| FIGURE 53 _ PROFIL DOUBLE COURBURE | 54 |
| FIGURE 54 _ PROFIL SUPERCRITIQUE | 54 |
| FIGURE 55 _ PROFIL LAMINAIRE | 55 |
| FIGURE 56 _ PROFIL D'AILE NACA 4415 SUR AIRFOIL TOOLS | 57 |
| FIGURE 57 _ CALCUL DE NOMBRE DE REYNOLDS SUR AIRFOIL TOOLS | 58 |
| FIGURE 58 GRAPHE DE Cl / α [..... | 60 |
| FIGURE 59 GRAPHE Cl / Cd [..... | 60 |
| FIGURE 60 GRAPHE $Cl / Cd / \alpha$ | 61 |
| FIGURE 61 GRAPHE Cd / α | 61 |
| FIGURE 62 GRAPHE Cm / α | 62 |
| FIGURE 63 _ PAPIER KRAFT | 70 |
| FIGURE 64 MATÉRIEL UTILISÉ | 71 |
| FIGURE 65 NOTRE PROPRE APPAREIL AU FIL RESISTIF CHAUD | 74 |
| FIGURE 66 SCHEMA DE MONTAGE DU FIL RESISTIVE [12] | 75 |
| FIGURE 67 CALCULE DE RESISTANCE ET DE COURANT NECESSAIRE POUR LE DECOUPAGE [12] | 76 |
| FIGURE 68 LES GABARITS UTILISES | 76 |
| FIGURE 69 CONCEPTION D'AILE VUE DE PROFILE | 80 |
| FIGURE 70 CONCEPTION D'AILE | 80 |
| FIGURE 71 LE PROFIL D'AILE LORS DE LA REALISATION | 81 |
| FIGURE 72 DELIMITATION DES AILERONS LORS DE LA REALISATION | 81 |
| FIGURE 73 LE RENFORCEMENT DE L'AILE | 82 |
| FIGURE 74 L'ETAT FINAL DE L'AILE | 82 |
| FIGURE 75 DIMENSIONS DU FUSELAGE | 83 |
| FIGURE 76 CONCEPTION DU FUSELAGE (VU DE DERRIERE) | 83 |
| FIGURE 77 FUSELAGE | 84 |
| FIGURE 78 ELEVATEUR | 85 |
| FIGURE 79 GOUVERNE DE DIRECTION | 85 |
| FIGURE 80 MODELE 3D DE LA MANETTE VUE DE FACE | 86 |
| FIGURE 81 MODELE 3D DE LA MANETTE | 86 |
| FIGURE 82 RADIO COMMANDE VU DE FACE | 87 |
| FIGURE 83 RADIO COMMANDE | 87 |
| FIGURE 84 ASSEMBLAGE FINALE DU DRONE | 88 |
| FIGURE 85 MECANISME D'AILERON GAUCHE | 89 |
| FIGURE 86 DRONE VUE DE FACE | 89 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE 87 ETAT FINALE DU DRONE | 90 |
| FIGURE 88 DIMENSION D'UNE CARTE ARDUINO NANO [13] | 93 |
| FIGURE 89 SCHEMA ELECTRIQUE D'UNE ARDUINO NANO [13]..... | 94 |
| FIGURE 90 ARDUINO NANO PIN OUT [13]..... | 95 |
| FIGURE 91 INTERFACE ARDUINO IDE [13]..... | 97 |
| FIGURE 92 BATTERIE EN LITHIUM POLYMERE | 98 |
| FIGURE 93 STRUCTURE D'UNE PILE NiCd | 99 |
| FIGURE 94 FC-75 CHARGEUR DE BATTERIES LI-IION..... | 100 |
| FIGURE 95 AXES DE JOYSTICK [13]..... | 100 |
| FIGURE 96 BRANCHEMENT D'UN JOYSTICK ET SON EQUIVALENT EN POTENTIOMETRE | 101 |
| FIGURE 97 COMPOSITION D'UN SERVOMOTEUR 9G [17]..... | 102 |
| FIGURE 98 SERVO 9G | 103 |
| FIGURE 99 DIFFERENT BRANCHEMENT D'UN SERVO MOTEUR | 103 |
| FIGURE 100 COMPOSITION D'UN MOTEUR SANS NOYAU [16]..... | 105 |
| FIGURE 101 DESSIN AU TRAIT D'UN MOTEUR IND-YQ0610-001[16] | 106 |
| FIGURE 102 COMPOSITION D'UN MOTEUR CORELESS [16] | 106 |
| FIGURE 103 COURBE DE PERFORMANCE DU MOTEUR CORELESS [16] | 107 |
| FIGURE 104 DRIVER L298N MINI [15] | 108 |
| FIGURE 105 SCHEMA ELECTRONIQUE D'UN EN "H" | 109 |
| FIGURE 106 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN PONT "H" | 109 |
| FIGURE 107 BRANCHEMENT DES MOTEURS SUR UN DRIVER L298 MINI | 110 |
| FIGURE 108 MODULE GYROSCOPE & ACCELEROMETRE MPU 6050..... | 111 |
| FIGURE 109 BRANCHEMENT D'UN MPU6050 AVEC UNE CARTE ARDUINO NANO..... | 112 |
| FIGURE 110 LE MODULE NRF 24L01 + ANTENNE..... | 114 |
| FIGURE 111 BRANCHEMENT DU MODULE NRF 24L01 + ANTENNE AVEC UNE ARDUINO NANO..... | 114 |
| FIGURE 112 EMETTEUR COMMANDE RC | 117 |
| FIGURE 113 RECEPTEUR D'UNE COMMANDE RC..... | 117 |
| FIGURE 114 PRESENTATION DE LA RADIO COMMANDE..... | 118 |
| FIGURE 115 SCHEMA ELECTRONIQUE DE L'EMETTEUR RC..... | 119 |
| FIGURE 116SCHEMA ELECTRONIQUE DU RECEPTEUR..... | 121 |
| FIGURE 117 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE PID [14]..... | 124 |
| FIGURE 118 ACTION PROPORTIONNELLE DE PID [14] | 125 |
| FIGURE 119 ACTION INTEGRALE DE PID [14] | 125 |
| FIGURE 120 ACTION DERIVEE DE PID[14] | 126 |
| FIGURE 121 ACTION PID TOTALE [14]..... | 126 |
| FIGURE 122 PARAMETRAGE DE PID [14] | 127 |
| FIGURE 123 IMAGE DU DRONE PRISE AVEC SW VIEW 360..... | 130 |
| FIGURE 124 PRISE D'EN HAUT DU DRONE AVEC SW VIEW 360..... | 130 |
| FIGURE 125 PHOTO DU DRONE VUE DE DROITE..... | 131 |
| FIGURE 126 PHOTO DU DRONE VUE DE DERRIERE | 131 |
| FIGURE 127 STRUCTURE DU FUSELAGE | 132 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| TABLEAU 1 AVANTAGES, INCONVENIENT ET UTILISATION DE CHAQUE TYPE DE DRONE [4]..... | 6 |
| TABLEAU 2 CORDONNEES X,Y,Z DU PROFILE D'AILE NACA 4515 | 80 |
| TABLEAU 3 TABLEAU 1 LES PERFORMANCES TECHNIQUES DU MOTEUR D'ENTRAINEMENT 0610 [16]. | 106 |

Liste des abréviations

UAV : Unnamed Aerial Vehicule (véhicule aérien sans nom)

MAV : micro air vehicule

VTOL : Vertical Take-Off and Landing

ISA : International Standard Atmosphere

RPM : Rotation Par Minute

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

SW : SolidWorks

3D : 3 dimensions

2D : 2 dimensions

PS : Le polystyrène

PSE : Polystyrène expansé

XPS : Polystyrène extrudé

HIPS : Polystyrène haute densité

UV : Ultra-Violets

IDE : Integrated Development Environment (environnement de développement intégrée)

CC : Courant Continu

Li-Ion : Lithium-ion

NiCd : Nickel-Cadmium

NiMH : Nickel-Hydrure Métalliques

Ah : La capacité

GND : Ground (Terre)

TSD : Circuit de protection thermique interne à effet d'hystérésis

MEMS : Microélectromécanique

DMP : Processeur de mouvement numérique

ULP : Ultra-basse consommation

PID : Proportionnel, Intégral, Dérivé

Liste des Acronymes

°C : [Température] degré Celsius

°F : [Température] degré Fahrenheit

m : [Distance] mètre

mm : [Distance] millimètre

Km : [Distance] Kilomètre

m² : [Surface] mètre carré

m³ : [Volume] mètre cube

kg : [Masse] kilogrammes

s : [Temps] seconde

h : [Temps] Heure

mn : [Temps] Minute

d : densité

v : volume

P : pression

v : vitesse

\bar{q} : Pression de BERNOULLI

F_x : La trainée

C_z : le coefficient de portance

ρ : masse volumique de l'air en kg/m³

S : surface de l'aile en m²

V_p : vitesse en m /s

F_z : La portance

C_x : Coefficient aérodynamique

π : pi=3.14

λ : Allongement

C_{x_f} : La trainée du fuselage

Liste des acronymes

$C_{x_{pmin}}$: Le Cx minimal du profil d'aile du modèle

C_{xp} : Le Cx du profil d'aile à l'incidence considérée

S_f : surface mouillée du fuselage

S_d : surface portante des ailes

S_s : dérive

S_a : stabilisateur

h : La hauteur

l : La largeur

L : La longueur

k_p : Coefficient de profilage

k_s : Le coefficient de section

R : Résultante aérodynamique

B : Envergure

l_m : Corde moyenne

H : la valeur de la translation

Re : Nombre de REYNOLDS

V : Voltes nominale

I : Courant [A] : Ampère

U : Tension

P_m : Puissance Mécanique

A : Ampère

N : Vitesse de rotation

A : Ampère

Introduction générale

Un drone ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) est un aéronef sans pilote à bord. Il peut être contrôlé à distance ou de manière autonome et équipé de divers capteurs et instruments pour effectuer différentes tâches. Vous connaissez probablement les drones quadricoptères. C'est un petit avion doté de quatre hélices qui lui permettent de manœuvrer avec une grande agilité. Aussi il existe une autre catégorie de drones qui se rapproche plus des petits avions, qu'on appelle drone à voilure fixe.

Un drone à voilure fixe est un véhicule aérien sans pilote (UAV) à ailes fixes, semblable à un avion. Contrairement aux drones multi rotors, qui utilisent des hélices pour décoller et se déplacer verticalement, les drones à voilure fixe nécessitent une piste ou un espace dégagé pour le décollage et l'atterrissage.

Un drone est un dispositif mécatronique dont sa conception nécessite une approche multidisciplinaire. En combinant créativité, ingénierie et technologie, la partie électronique et logiciel joue un rôle clé dans le fonctionnement des drones, notamment à travers les systèmes de contrôle et de communication. La conception mécanique est essentielle pour concevoir des structures légères et robustes, tandis que l'énergétique permet d'optimiser l'autonomie, les performances et l'efficacité énergétique des appareils.

De plus, l'informatique est incontournable, surtout avec l'intégration de logiciels de pilotage, de navigation et d'intelligence artificielle. Autant de disciplines, que nous avons exploré durant notre parcours universitaire et qui se rejoignent pour donner vie à notre projet de fin d'étude.

Dans ce mémoire de fin d'études, nous allons essayer d'implémenter une conception et une réalisation dans le but d'intégrer notre propre méthode et technique en utilisant des matériaux écologiques, durables et accessible. Et optimiser les couts.

Pour atteindre l'objectif ciblé, ce manuscrit sera organisé en trois parties comme suit :

- **Première partie :** Cette partie est constituée des chapitres 1, 2 et 3, elle sera dédiée à la présentation des drones, leurs classes, leurs principes de vol ainsi qu'à la description des bases scientifiques et technologiques des drones.
- **Deuxième partie :** Cette partie est constituée du chapitre 4 et sera dédiée à la partie mécanique du drone, le volet conception et réalisation.
- **Troisième partie :** Cette partie est constituée du chapitre 5 et sera dédiée à la partie instrumentation et commande électronique et au volet programmation du drone.

CHAPITRE 1
Généralités sur les
drones

1. Généralités sur les drones

1.1. Introduction

Les modèles réduits d'avions et les drones représentent un monde fascinant de vol et d'innovation. Ils offrent aux passionnés de technologie et d'aventure la possibilité d'apprendre, de découvrir et de réussir. Les avions sans pilote UAV qui conquièrent nos cieux fascinent par leurs capacités de vol. Comment peut-on les classer, les définir ? Quels principes physiques leur permettent de voler ? Découvrons-les. Et découvrons les forces, les grandeurs physiques qui jouent un rôle dans leur mouvement.

1.2. Histoire du drone

Drone vient d'un mot anglais signifiant « faux bourdon ». Les drones sont des aéronefs sans équipage dont le pilotage est automatique ou télécommandé. Le terme désigne d'abord des avions cibles, et le nom de faux bourdon a été donné par dérision dans les années 30 au Royaume-Uni aux DH.82 Queen Bee, version automatisée des avions cibles, dont le vol lent et bruant ressemblait plus à celui du bourdon que celui de la reine (Queen Bee) [1].

Le drone est d'abord une invention militaire. Les forces armées ont rapidement compris l'intérêt que cette technologie pouvait apporter en termes de prise de vues aériennes, par exemple. Les applications civiles sont venues plus tard, avec la surveillance des troupeaux ou des cultures agricoles, ou la recherche de personne [1].

1.2.1. Le drone : histoire d'une invention militaire

Le premier aéronef sans pilote (UAV : Unnamed Aerial Vehicle) a vu le jour sur la base militaire d'Avord le 02 juillet 1917. C'est un Français, Max Boucher (voir la figure 1), qui a réussi le décollage d'un avion de type Voisin 150 HP sans pilote. Il survolera une distance de 500 mètres au-dessus du sol. L'idée, en pleine Première Guerre Mondiale, était de créer un engin capable d'effectuer des missions de reconnaissance sans engager la vie des pilotes [1].

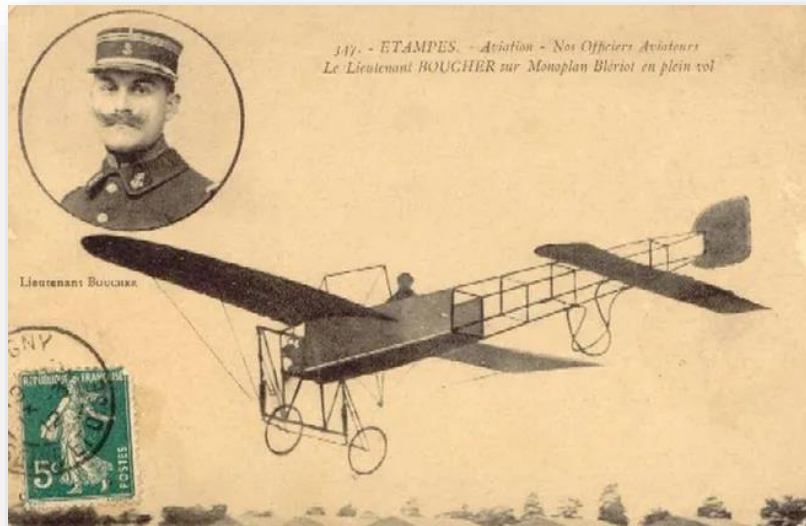


Figure 1 Le 2 juillet 1917, Max Boucher, faisait voler son avion sans pilote [2]

Pendant la seconde guerre mondiale, l'armée allemande développe à partir de 1938 des vecteurs guidés à distance, et notamment les tristement célèbres V1 et V2, bien qu'ils s'agissent plus de bombes volantes. Depuis avec le perfectionnement des technologies, les drones aériens sont capables d'effectuer des missions de surveillance et même d'éliminer des cibles stratégiques [1].

Le grand essor des drones date des guerres de Corée et du Viêt Nam, puis pendant la guerre froide. Dans les années 1980, la doctrine de la guerre « zéro mort » a conduit à développer des drones armés à travers le monde. Leur première utilisation, a lieu pendant la guerre Iran-Irak. Dans les années 2000, le drone est utilisé dans de nombreux conflits et opérations de maintien de la paix. Le marché du drone de combat représente 38,7 milliards de dollars sur la période 2020 – 2029 [1].

1.2.2. Le drone : histoire des applications civiles

Les applications civiles sont nombreuses dans le transport, pour la recherche scientifique, la surveillance, le renseignement ou la sécurité intérieure, la recherche de personne et le sauvetage, le monitoring de la radioactivité post-accident nucléaire, la communication, ...etc. [1].

C'est la miniaturisation et la possibilité d'embarquer des caméras classiques ou infrarouges, des capteurs, ainsi que la pose de gyroscopes permettant la stabilisation des mouvements du drone qui ont permis le développement du drone civil [1].

Deux entreprises majeures ont également l'essor commercial des drones civils et de loisirs : l'entreprise chinoise DJI (2006) et l'entreprise californienne de caméra embarquée GoPro (2002) [1].

- En 2014, les Etats-Unis autorisent le premier vol à usage commercial en Alaska.
- En 2017, un drone hexacoptère ultraléger cartographie les glaciers tropicaux afin de mesurer le changement climatique.
- En 2018, le Japon commence le développement des drones taxis-volants.

À partir de 2008 en France, la police française utilise les drones ELSA pour surveiller les manifestations ou les violences urbaines, avant d'être considérés comme illégaux en 2020 lors de la pandémie de la Covid-19 par la Ligue des Droits de l'homme et la Quadrature du Net [1].

1.3. Classification des UAV

Les drones peuvent être classés en avions à voilure fixe et avions multirotors. Les deux types de **MAV** (Micros Air véhicule) ont des caractéristiques uniques qui mettent en question leurs performances en tant que systèmes autonomes.

Le terme « petit drone » fait se référer à un type de drone à voilure fixe avec une envergure de 1,5 à 3 mètres. Les petits drones sont généralement ravitaillés et nécessitent une piste pour le décollage et l'atterrissage ; dans certains cas, des catapultes sont utilisées pour le décollage.

Le terme « mini drone » (MAV) fait référence à un type de drone avec une envergure inférieure à 1.5 mètre. Les petits mini-drones sont généralement conçus pour voler de 10 à 12 heures et peuvent charger environ 4 à 20 kilos. En règle générale, ces véhicules fonctionnent sur batterie, sont démarrés et peuvent ne pas avoir de train d'atterrissage, donc ils n'ont pas eu une piste pour le décollage ou l'atterrissage. MAV est conçu pour voler de 20 minutes à plusieurs heures ; les charges varient de quelques grammes à quelques kilos. Par conséquent, des charges considérablement faibles limitent la charge des capteurs et des microcontrôleurs qui peuvent être placés sur les MAV. Ces limitations posent des défis intéressants pour la conception de systèmes autonomes [3].

1.3.1. Les différents types de drones

La technologie des drones se développe rapidement et ces appareils trouvent de nouvelles utilisations à chaque avancée. Pour cette raison, il existe désormais de nombreux types de drones utilisés à des fins différentes (Voir tableau 1). Les drones existent en différentes tailles et capacités, allant des petits modèles récréatifs aux drones sophistiqués de contrôle et de surveillance. Pour comprendre la diversité de la technologie UAV, il faut comprendre leurs différentes catégories. Voici les quatre principales catégories de véhicules aériens sans pilote [4] :

- UAV monorotor.

CHAPITRE I Généralités sur les drones

- UAV multirotor.
- UAV à voilure fixe.
- UAV hybrides VTOL à voilure fixe.

Il existe d'autres conceptions de drones moins fréquentes, comme les ballons télépilotés, les drones de course.

| Type de drones | Avantages | Inconvénients | Utilisations |
|------------------------|--|---|---|
| Drones monorotor | Peut stationner en vol, peut décoller et atterrir dans de petits espaces, transporte plus de poids, longue endurance | Opération plus complexe, risque plus élevé | Balayage aérien avec LIDAR |
| Drones multirotor | Facile à utiliser, bon pour les espaces restreints et les mouvements de caméra contrôlés | Temps de vol court, charge utile limitée | Photographie aérienne, inspections, livraison par drone |
| Drones à voilure fixe | Couvre de grandes zones, rapide, longue endurance | Ne peut pas décoller et atterrir dans de petits espaces, nécessite généralement de l'espace et une piste, pas de vol stationnaire | Cartographie, inspections de pipelines, livraison par drone |
| Hybride à voilure fixe | Combine le VTOL avec une longue endurance | Pas spécialisé dans le vol stationnaire ou rapide, encore en développement | Livraison par drone |

Tableau 1 Avantages, Inconvénient et utilisation de chaque type de drone [4]

a. Drones monorotor

Les drones monorotor (voir la figure 2) sont robustes et ressemblent aux hélicoptères traditionnels. Ils disposent d'un grand rotor unique pour la portance et d'un rotor de queue qui contrôle

la direction et la stabilité. Ces drones sont particulièrement efficaces et surpassent les modèles multirotors en termes de consommation d'énergie. Leur conception permet d'avoir de très longues pales, qui fonctionnent davantage comme des ailes que comme des hélices, ce qui leur confère une plus grande efficacité aérodynamique. L'un des principaux avantages des drones monorotor est leur capacité à transporter des charges lourdes. Cela les rend idéaux pour des tâches spécialisées telles que le balayage laser aérien LIDAR. Leur capacité à planer et leur longue durée de vol sont cruciales pour ces types de tâches. Cependant, les drones monorotor présentent des défis. Ils sont complexes et coûteux, ce qui entraîne des exigences de maintenance plus élevées. Ces UAVs sont également moins stables et moins tolérants en cas d'atterrissage difficile [4].



Figure 2 drone monorotor

b. Drones multirotor

Les UAV multirotor (voir figure 3) sont accessibles et économiques, ce qui en fait un choix populaire pour les tâches nécessitant précision et les opérations à courte distance. Ces drones incluent les tricoptères, quadricoptères, hexacoptères et octocoptères, et sont nommés en fonction de leurs multiples rotors. Les quadricoptères, avec leurs quatre rotors, sont le choix le plus populaire en raison de leur équilibre entre contrôle et maniabilité. Ils peuvent se déplacer dans plusieurs directions, y compris les ascensions et descentes verticales, les mouvements latéraux et les rotations autour de leur axe. Cette maniabilité les rend idéaux pour des tâches telles que la photographie aérienne et les inspections de proximité de structures et de bâtiments. Cependant, les drones multirotor ont des inconvénients. Leur endurance et leur vitesse sont relativement limitées, ce qui restreint leur utilisation

pour la cartographie aérienne à grande échelle ou les tâches de surveillance de longue durée telles que l'inspection de pipelines ou de routes [4].



Figure 3 drone multirotor

c. Drones à voilure fixe

Les drones à voilure fixe (voir figure 4) ressemblent à des avions par leur conception, et ils disposent d'une seule aile rigide qui fournit la portance. Contrairement aux véhicules multirotors, ils n'ont pas besoin d'énergie pour rester en vol stationnaire. Leur énergie est utilisée pour les propulser vers l'avant, ce qui les rend économes en énergie. Leur capacité à couvrir efficacement de grandes zones les rend inestimables pour les tâches de surveillance étendues et les projets de monitoring à grande échelle. Les drones à voilure fixe sont particulièrement adaptés pour les longues distances, la cartographie de vastes zones et les vols prolongés au-dessus des points d'intérêt. Ils peuvent rester en vol pendant plusieurs heures d'affilée, tandis que certains modèles, alimentés par du carburant, peuvent rester en vol pendant 16 heures ou plus. Cependant, ces types de drones présentent des défis. Tout d'abord, ils ont tendance à être plus coûteux et nécessitent plus de compétences pour être opérés, une formation pour ces UAVs est donc essentielle. Ils ont également besoin de beaucoup d'espace pour décoller et atterrir – une zone longue et large comme une piste d'atterrissage. En plus de l'espace, ils

doivent aussi être assez rapides pour ne pas décrocher. Cela signifie qu'ils ne conviennent pas aux utilisations à basse vitesse [4].



Figure 4 drone a voilure Fixe

d. Hybride VTOL à voilure fixe

Les drones hybrides VTOL (voir figure 5) combinent les meilleures caractéristiques des conceptions à voilure fixe et à rotors. Ils sont équipés de rotors sur leurs ailes fixes, ce qui leur permet de planer et d'effectuer des décollages et atterrissages verticaux. Leur meilleure application est la livraison, car leurs avantages hybrides les rendent idéaux pour la livraison de colis dans différents environnements. L'un des principaux avantages de la conception hybride VTOL est le système de pilotage automatique, qui permet à l'opérateur humain de se concentrer davantage sur la navigation. Cependant, ce drone VTOL n'est généralement pas adapté aux débutants, et sa technologie avancée la place parmi les options les plus coûteuses du marché des drones à voilure fixe [4].



Figure 5 drone hybride VTOL a voilure fixe

1.3.2. Les différents types de UAV à voilure fixe

Avant d'aborder le sujet qui nous concerne directement, il convient de revenir sur le développement des différents types d'aéromodélisme. Ils sont répartis en différents types, chaque type de modèle fait l'objet d'une conception particulière adaptée au vol libre, au vol circulaire ou au vol radiocommandé.

Chaque catégorie est divisée en sous-catégories selon la perspective dans laquelle le modèle est conçu : entraînement ou essai de conduite, acrobatie, vitesse, reproduction à l'échelle exacte (maquette), etc. Nous examinerons donc ces différents types de modèles en précisant les possibilités offertes.

a. Les planeurs

Le planeur se caractérise par une grande aile (voir figure 6) qui apporte un grand raffinement, avec une forme très favorable et une grande surface. Ses caractéristiques aérodynamiques sont conçues pour que son vol se poursuive uniquement sous l'influence d'un courant électrique (chaleur) progressivement croissant. Sans hélices, le planeur doit être lancé par un véhicule auxiliaire pour lui permettre d'atteindre l'altitude nécessaire pour commencer le vol. Le planeur peut être lancé, comme un cerf-volant, à l'aide d'un treuil manuel ou d'un élastique, un dispositif qui le lance en l'air. Il peut être entraîné à l'altitude jusqu'à ce qu'il soit hors de vue. Il a donc fallu développer un système pour limiter la durée des vols et éviter que les schémas ne disparaissent.



Figure 6 _figure montrant la grandeur des ailes d'un planeur [5]

b. *Les motoplaneurs*

Planeur motorisé : Ce modèle de planeur dit est une adaptation d'un moteur auxiliaire destiné à remplacer les lanceurs conventionnels et à réaliser le vol à haute altitude.

Le moteur peut être installé à l'avant du fuselage (voir figure 7), comme sur un avion classique, mais il est généralement placé sur un pylône fixe au-dessus de l'aile, qui, grâce à sa démontabilité, permet une adaptation instantanée avec un planeur ou avec un moteur- planeur. Les propulseurs utilisés sont de petits micromoteurs à implosion de faible cylindrée, dont la puissance n'est nécessaire que pour que le modèle monte puis commence son vol d'avion [5].



Figure 7 _figure montrant un motoplaneur [5]

c. *Les motos modèles de vol libre*

On appelle « motomodèles » un modèle d'avion propulsé par un moteur thermique. Dès la commercialisation des premiers moteurs à explosion pour modèles réduits (voir figure 8), cette catégorie connaît un grand succès et permet la réalisation d'avions de tous les types : maquettes volantes, semi-maquettes, moto modèles de compétition..., etc. Toutes ces catégories de moto modèles de vol libre ne sont maintenant plus pratiquées, elles sont bien entendu remplacées par les modèles radiocommandés qu'il est plus facile de faire évoluer à volonté.



Figure 8 _figure montrant un modèle à moteur thermique [6]

d. Les maquettes volantes

La « maquette volante » est la reproduction fidèle, à une échelle donnée, d'un avion ou d'un planeur réel. Mais le fait de « réduire » en bloc toutes les dimensions à la même échelle pose des problèmes difficiles à résoudre. C'est la raison pour laquelle a été créée une sous-catégorie dénommée « semi-maquettes ».

Ces semi-maquettes sont actuellement très populaires, car leur réalisation est à la portée d'un plus grand nombre de modélistes ayant une expérience moyenne en radiocommande et qui désirent faire voler un avion « qui ressemble à quelque chose » ... Cette catégorie a été lancée aux Etats-Unis sous le nom de « Stand of squal » ce qui veut dire approximative, « qui se rapproche de la réduction à l'échelle ». Les modèles ne sont donc plus d'une rigoureuse exactitude, ils sont en principe jugés à une distance de 3 mètres. Leurs lignes générales et leurs proportions doivent représenter avec le plus de vraisemblance possible à l'avion réel sur lequel ils ont été copiés.



Figure 9 _maquette Vertol H-21 « BANANE VOLANTE » Epoque moderne

1.4. Classification des modes de vol

L'ensemble de l'Aéromodélisme se décompose en trois grandes familles :

1.4.1. Vol libre

C'est d'abord sous cette forme que furent réalisées les premiers modèles réduits d'avions (voir figure 10). Bien avant la guerre de 1914-1918, quelques pionniers du modélisme construisirent des répliques volantes des avions de l'époque. Ces modèles étaient fragiles et lourds, en raison du manque de matériaux légers, aussi leurs performances n'étaient guère spectaculaires... [7]

Avant 1945, les aéromodélistes ne pratiquent que cette forme de modèles volants : le vol libre, c'est-à-dire le vol normal sans « lien » avec le sol, le modèle est libre de se déplacer à son gré dans les trois dimensions [7].

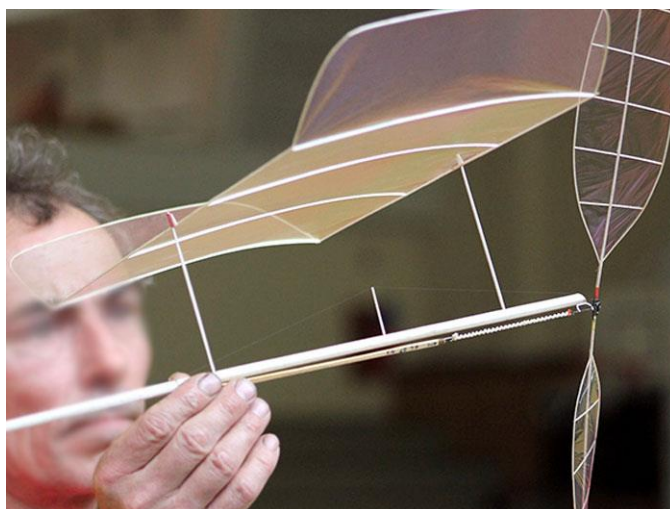


Figure 10 _ modèle de vol libre du club français FID

1.4.2. Vol circulaire

Né aux Etats-Unis aussitôt après la seconde guerre mondiale, le vol circulaire semble être dû au manque d'espace dont ont souffert les modélistes à cette époque. Afin de contrôler le modèle et de le stabiliser à la hauteur souhaitée, plusieurs systèmes de contrôle plus ou moins hétérogènes ont été inventés, ce qui a conduit à un grand nombre de crashes du modèle. Le contrôle du gouvernail s'est avéré le plus rationnel et le plus sûr. Ce système de contrôle, connu sous le nom de « U-Control », a été développé et breveté par le modéliste américain Jim Walker. Depuis, il est couramment utilisé dans tous les avions destinés au tourisme [7].



Figure 11 _ équipe de la FFAM dans un concours de vol circulaire [7]

1.4.3. Vol Radiocommandé

Depuis le début de l'aviation et de la radio, on a cherché à piloter à distance des avions de grandeur et des modèles. Ce n'est devenu possible pour le grand public que depuis les années 70, par la mise sur le marché de matériels de radiocommande fiables et d'un prix abordable. Le vol télécommande (voir figure 12), c'est-à-dire le contrôle à distance d'un modèle par des impulsions radio, a connu un essor vraiment très grand au cours de ces dernières années grâce, en particulier, à la considérable réduction des ensembles radio. Sans entrer dans les détails, c'est pratiquement un système radio qui est composé d'un émetteur et d'un récepteur, l'émetteur est un bloc que l'on tient dans la main, ainsi que d'une antenne et des servomécanismes « SERVOS » pour manœuvrer la gouverne correspondante [7].



Figure 12 groupe de la FFAM dans le vol commandé [7]

1.5. Application non-militaire de drone a voilure fixe

De nos jours, il existe de nombreuses applications des drones. Par exemple, les applications des drones à voilure fixe en agriculture comprennent la détection d'insectes, de mauvaises herbes, de maladies, de caractéristiques de cultures, de biomasse et de propriétés de base du sol.

Les applications marines incluent le suivi d'espèces comme les baleines et les dauphins afin d'analyser leurs mouvements et déplacements à travers l'océan. D'autres applications des drones incluent la recherche sur la qualité de l'air. Ceci est réalisé en équipant le drone de capteurs pour mesurer la pollution de l'air. Certains capteurs utilisés dans l'analyse de la pollution détectent le dioxyde de carbone, l'ozone et les particules de fumée noire.

Les drones à voilure fixe ont déjà été appliqués à la cartographie, où il est nécessaire d'interpréter, d'analyser et de représenter graphiquement tout ou partie d'une zone spécifique, ce qui est appliqué à des tâches de cartographie.

D'autres applications intéressantes de ce type de drones sont le génie civil et l'architecture, où ils sont utilisés pour obtenir la topographie de certains terrains et structures. Lignes de tournée, pour l'analyse du trafic, pour la construction, dans l'exploitation minière et pour l'analyse des bâtiments conditionnés.

Il existe de nombreuses autres applications des drones à voilure fixe. Dans cette section, seulement quelques-unes des applications non militaires sont mentionnées afin d'avoir une idée générale de cette recherche champ.

1.6. Systèmes de contrôle des drones à voilure fixe

En plus de disposer de systèmes électroniques et mécaniques, les drones ont besoin d'un algorithme mathématique traitant les variables et les constantes nécessaires pour accomplir une tâche spécifique (modélisation dynamique). C'est là qu'intervient la technique ou la méthodologie du contrôle.

Un système de contrôle de vol de drone utilise des capteurs et d'autres logiciels pour surveiller et maintenir la vitesse, l'accélération et l'orientation afin de garantir que tous les ajustements sont nécessaires pendant le vol. Il gère également le fonctionnement des drones selon les ordres des pilotes régulateurs. Les systèmes de contrôle de vol de drone comprennent également des fonctions de navigation qui donnent l'emplacement naturel et exact du drone.

Les interfaces utilisateur qui permettent aux pilotes ou aux opérateurs d'ajuster les paramètres de vol, de suivre les données de télémétrie et de modifier les trajectoires de vol des avions sont fréquemment utilisées dans les systèmes de contrôle de vol des drones. Les systèmes de contrôle de vol des drones sont donc nécessaires pour répondre aux nombreux besoins opérationnels des véhicules aériens sans pilote tout en préservant la stabilité, en garantissant une navigation précise, en permettant la mobilité et en améliorant la sécurité. Ils permettent aux drones de fonctionner de manière efficace et efficiente dans divers secteurs et applications.

1.7. Principe aérodynamique

Les principes aérodynamiques sont essentiels pour comprendre la physique impliquée dans les drones à voilure fixe. Ce chapitre définit quelques définitions de base de l'aérodynamique. Cette section présente l'importance de la connaissance des principes aérodynamiques, de la définition de l'atmosphère, de la pression atmosphérique, de l'atmosphère standard, de la température de l'air, de la densité de l'air, des ailes d'avion, du théorème de Bernoulli et du centre de pression [3].

1.7.1. L'importance du principe aérodynamique

Le modèle dynamique d'un avion a généralement une définition mathématique complexe, qui implique des aspects aérodynamiques existants du vol tels que l'humidité de l'air, la vitesse de l'air, la pression exercée sur l'avion, etc. Ces paramètres du modèle changent à mesure que le véhicule aérien se déplace dans le ciel. L'atmosphère terrestre [3].

L'obtention du modèle dynamique d'un avion réel est un processus fondamental. Un concepteur d'avion génère le modèle d'avion requis à partir de modèles physiques et de modèles mathématiques intégrant des données expérimentales. Le processus de modélisation dynamique est souvent itératif. Ainsi, un modèle mathématique basé sur les lois de la physique doit être ajusté en fonction des données obtenues lors de l'expérimentation [3].

En raison du coût élevé de la construction et des essais en vol, il est de la plus haute importance d'obtenir un modèle mathématique approprié d'un avion réel, car il est utilisé pour évaluer les performances de l'avion en combinaison avec des simulations informatiques. Ces modèles peuvent également être utilisés pour la formation des pilotes sur simulateurs de vol, la reconstitution des conditions de vol en cas d'accident et l'étude des effets des modifications apportées à la conception [3].

De plus, d'autres modèles mathématiques sont utilisés dans tous les aspects de la conception des aéronefs (par exemple, des modèles structurels pour l'étude de la répartition des contraintes et la prévision de la fatigue). Ce livre est une référence qui peut être utilisée pour concevoir des lois de contrôle linéaires et non linéaires et des observateurs d'état. La définition et l'étude de ces contrôleurs et observateurs seront présentées dans les chapitres correspondant à ces thématiques [3].

Pour obtenir un modèle mathématique approprié, il est nécessaire de considérer quelques principes de base concepts d'aérodynamique, dont certains seront présentés ci-dessous [3].

Les concepts de base de l'aérodynamique sont présentés pour expliquer, de manière simple et avec une terminologie de base, pourquoi un avion vole, c'est-à-dire pourquoi un objet plus lourd que l'air se déplace dans ce milieu. Les notions de forces aérodynamiques (portance, opposition et poussée) données dans ce chapitre sont suffisantes et élémentaires. Nous ne fournissons pas une explication exhaustive ou détaillée des complexités de l'aérodynamique [3].

1.7.2. Atmosphère

L'atmosphère est la couche gazeuse entourant la terre, composée principalement de gaz (78 % d'azote, 21 % d'oxygène et 1 % d'autres gaz) que l'on appelle air. Dans les couches inférieures, il faut ajouter à ces composants la concentration de vapeur d'eau, qui dépend des conditions météorologiques et de la situation géographique et peut varier entre 0 % et 5 %. À mesure que la concentration de vapeur d'eau augmente, les concentrations des autres gaz diminuent proportionnellement [3].

Cet élément gazeux que l'on appelle air possède de nombreuses propriétés essentielles, mais pour expliquer pourquoi un avion vole, il faut étudier les caractéristiques essentielles qui définissent

son comportement en tant que gaz : la pression, la température et la densité. Ces trois concepts sont étroitement liés et ont un effet très significatif sur le comportement de vol d'un avion [3].

1.7.3. Pression atmosphérique

La pression est définie comme la quantité de force appliquée par unité de surface. Selon cette définition, la pression atmosphérique est la force exercée par l'atmosphère sur une unité de surface, force due au poids de l'air contenu dans une colonne imaginaire [3].

La pression atmosphérique en un point représente le poids d'une colonne d'air de section transversale unitaire s'étendant de ce point jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère [3].

Puisque la densité de l'air diminue avec l'altitude, ce poids ne peut être calculé que si l'on peut exprimer la variation de la densité de l'air en fonction de l'altitude ou de la pression. Il n'est donc pas facile de calculer la pression atmosphérique à la surface de la Terre [3].

Cette circonstance indique une première qualité de l'air, qui est une diminution de la pression à des altitudes plus élevées. L'ampleur de cette diminution est d'un millibar pour neuf mètres de hauteur, soit environ un pouce pour mille pieds. En raison de cette propriété, les avions volant au-dessus d'une certaine altitude doivent être équipés de systèmes de pressurisation de la cabine passagers [3].

Parmi les instruments de mesure de la pression atmosphérique figurent le baromètre à mercure et le baromètre anéroïde. Certains appareils qui composent l'instrumentation de l'avion fondent leur fonctionnement sur cette lecture de pression. Les unités généralement utilisées dans l'aviation sont les millibars ou pouces de mercure [3].

1.7.4. Atmosphère standard

L'atmosphère standard, également appelée atmosphère de type ou International Standard Atmosphere (ISA), est une atmosphère hypothétique basée sur des mesures climatologiques moyennes. Les constantes les plus importantes sont basées sur l'atmosphère au niveau de la mer [3].

Constantes importantes :

- Température : 15°C (59°F)
- Pression : 760 mm ou 29,92 pouces de mercure, équivalent à 1013,25 mb/cm²
- Densité : 1,225 kg/m³
- Accélération due à la gravité : 9,8 m/s²
- Vitesse du son : 340,29 m/s
- Un gradient thermique de 1,98°C pour chaque 1000 pieds ou 6,5°C pour chaque 1000 mètre

- Une chute de pression de 1 pouce pour chaque 1000 pied, ou 1 mb pour chaque 9 mètres, pour chaque 1000 mètre

Cette atmosphère standard, définie par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), est un modèle de référence. Cependant, un pilote aura rarement l'occasion de voler dans cette ambiance standard [3].

1.7.5. Température de l'air

La chaleur du Soleil traverse l'atmosphère sans augmenter significativement sa température. Pourtant, la terre absorbe cette chaleur, élevant sa température, et la restitue progressivement aux couches d'air en contact avec elle. Plus les couches d'air sont éloignées de la terre, moins elles en reçoivent de chaleur. Pour cette raison, la deuxième qualité de l'air est que la température diminue avec l'altitude ; c'est-à-dire que plus l'altitude est élevée, plus la température est basse [3].

L'ampleur de cette diminution est d'environ 6,5°C par 1 000 mètres ou 1,98°C par 1 000 pieds. Ces magnitudes sont valables jusqu'à une hauteur de 1 100 mètres ou 3 608,9 pieds au-dessus du niveau de la mer, après quoi la température est considérée comme constante à -56,5°C. Bien que les grandeurs données ne soient pas respectées avec précision, puisque l'air n'est pas un gaz parfait, ces valeurs mesurées sont acceptées comme indicatives du comportement de l'air [3].

Si une masse de gaz contenue dans un récipient est chauffée, la pression exercée par cette masse sur le récipient augmente, montrant une relation directe entre température et pression. Ainsi, la pression de l'air chaud est supérieure à celle de l'air froid [3].

1.7.6. Densité de l'air

La densité de tout objet, solide, liquide ou gazeux, est exprimée par sa masse volumique par unité de volume : $d = m/v$. La densité de l'air est faible par rapport à celle de l'eau, mais c'est précisément cette différence qui rend le vol possible [3].

S'il est comprimé, la même masse de gaz occupera moins de volume, ou le même volume contiendra plus de gaz ; c'est-à-dire que la densité augmente ou diminue en relation directe avec la pression.

Puisque la pression diminue avec la hauteur, cette relation indique également que la densité diminuera ; plus l'altitude est élevée, plus la densité est faible. De plus, si de la chaleur est appliquée à un corps, celui-ci se dilate et occupe plus de volume, de sorte que dans le même volume, il y aura moins de masse ou ce qui est équivalent ; sa densité sera plus faible. Ainsi, à mesure que la température augmente, la densité de l'air diminue [3].

Un dilemme se pose alors, car lorsqu'on augmente la hauteur, d'une part, la pression diminue (la densité diminue), et d'autre part, la température diminue (la densité augmente). Ensuite, le changement de pression a une influence plus significative que le changement de température, ce qui entraîne une altitude plus élevée avec une densité plus faible [3].

1.8. Aile d'avion

Le modèle mathématique utilisé par les ingénieurs de contrôle contient généralement des données sur l'aérodynamique de l'avion dans son ensemble. L'étude des forces aérodynamiques de l'aile d'un avion est présentée ci-dessous. La figure 13 montre la coupe transversale d'une aile et définit ses parties. Le champ d'écoulement autour de l'aile est représenté par les lignes de coupe illustrées sur la figure 14 [3].

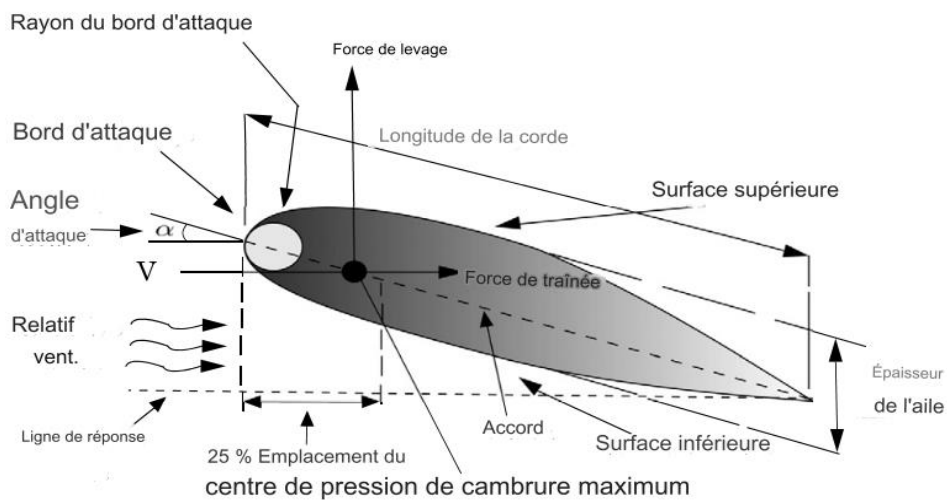


Figure 13 Schéma d'une section de profil aérodynamique [3]

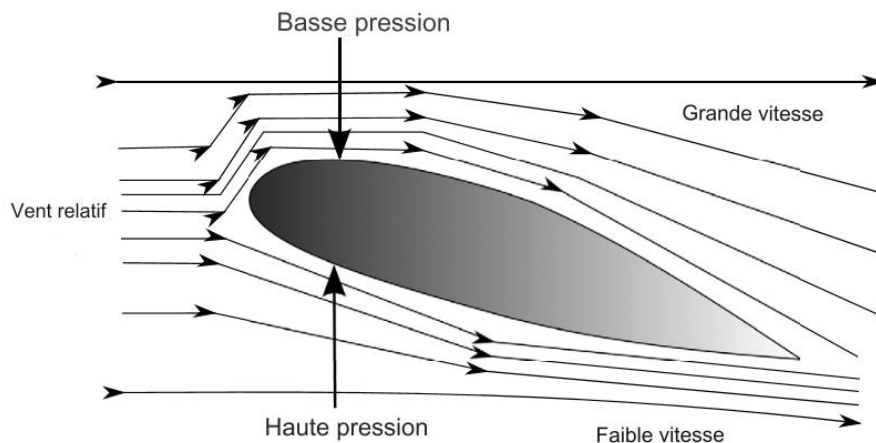


Figure 14 Flux d'air autour de l'aile [3]

La figure montre le flux adjacent : les lignes de coupe passent sur la surface de l'aile et ne changent de direction nulle part sur la surface de l'aile. Puisque la section transversale est uniforme et que l'envergure de cette aile est supposée infinie, le champ d'écoulement ne change pas dans la direction perpendiculaire au plan de diagramme. Le vecteur vitesse d'écoulement libre définit la direction initiale du champ d'écoulement. C'est la vitesse mesurée en avant de l'aile, suffisamment loin pour que l'écoulement ne soit pas affecté par la présence de la voilure [3].

La forme de l'aile détermine les propriétés aérodynamiques et certains paramètres géométriques essentiels. La ligne connue sous le nom de longueur de corde est une ligne droite tracée du bord d'attaque au bord de fuite et constitue la ligne de référence utilisée pour décrire la forme. Une aile peut être symétrique ou, comme d'habitude, asymétrique en ce qui concerne la corde [3].

La différence entre la ligne de réponse et la ligne de corde montre l'ampleur du combat. La forme des surfaces supérieure et inférieure, le degré de cambrure, l'épaisseur et le rayon du bord se combinent pour déterminer les propriétés aérodynamiques et la plage de vitesse utile [3].

Deux composantes perpendiculaires décrivent classiquement les forces aérodynamiques : la force de portance et la force de traînée. La force de portance F est définie perpendiculairement à l'écoulement libre du vecteur vitesse V , tandis que la force de traînée lui est parallèle.

Les expressions des forces et des moments générés par le profil aérodynamique dépendent du coefficient de portance, du coefficient de traînée et des coefficients de moment [3].

1.9. Théorème de BERNOULLI

Daniel Bernoulli a vérifié expérimentalement que la pression interne d'un fluide (liquide ou gaz) diminue à mesure que la vitesse du fluide augmente ; en d'autres termes, dans un fluide en mouvement, la somme de la pression p et de la vitesse v en tout point reste constante, c'est-à-dire :

$$P + v = k \dots\dots|1|$$

Pour que cette constante k soit maintenu, si une particule augmente sa vitesse v , cela se fera au prix d'une diminution de sa pression p .

Le théorème de Bernoulli est généralement exprimé sous la forme :

$$P + \bar{q} = k \dots\dots|2|$$

Où :

$$\bar{q} = \frac{1}{2} d v^2 \dots\dots|3|$$

L'air doté d'une pression p et d'une densité d circulant à une vitesse v contient de l'énergie cinétique, comme tout autre objet en mouvement. Selon la loi de conservation de l'énergie, la somme des deux est une constante. Étant donné cette équation, en supposant que les particules d'air autour de l'avion ont la même densité, alors si la vitesse v augmente, la pression p diminuera, et vice versa [3].

1.10. Conclusion

Les drones, dans leur diversité de formes et de fonctions, représentent une révolution technologique en marche. Après avoir exploré les généralités de ces engins volants autonomes, nous allons à présent nous pencher plus spécifiquement sur les **bases scientifiques et technologiques** qui sous-tendent leur conception, en nous concentrant sur les **avions à voilure fixe**. Cette transition nous permettra de mieux comprendre les principes physiques qui régissent le vol de ces appareils et d'approfondir les connaissances nécessaires à leur conception et à leur pilotage.

CHAPITRE 2

Bases scientifiques et technologiques des avions à voilure fixe

2. Bases scientifiques et technologiques des avions à voilure fixe

2.1. Introduction

Le vol en avion est une prouesse technique complexe, basée sur l'interaction de principes physiques fondamentaux. Quatre forces principales sont impliquées. La portance, générée par la courbure de l'aile et la différence de vitesse supérieure et inférieure, neutralise la gravité et maintient l'avion en vol. La poussée produite par le moteur propulse l'avion vers l'avant. La traînée, la force qui résiste au mouvement dans l'air, est minimisée grâce à une conception aérodynamique sophistiquée. Après tout, pour voler, le poids, ou la gravité, doit être inférieur à la force de poussée. Les pilotes utilisent des gouvernes et des commandes de vol pour coordonner ces forces et contrôler l'avion en trois dimensions. La loi de Bernoulli, principe de la mécanique des fluides, explique la génération de portance sur une aile. Comprendre ces principes physiques est essentiel pour concevoir, construire et piloter des avions.

2.2. Body Frame

Les axes d'un avion sont considérés comme des lignes imaginaires et idéales tracées sur l'avion. Leur dénomination, ainsi que les mouvements qui s'effectuent autour d'eux, sont les suivants : Axe longitudinal. Cet axe imaginaire s'étend du nez à la queue de l'avion (Voir figure 15 & 16) [8].

Le mouvement autour de cet axe se fait en relevant une aile et en abaissant l'autre ; ce mouvement est appelé roulis.

Axe transversal ou latéral : Cet axe imaginaire est celui qui s'étend du bout d'une aile au bout d'une autre aile. Le mouvement se fait en contrôlant les gouvernes de profondeur pour déplacer le nez de l'avion et le faire monter ou descendre. Ce mouvement s'appelle le tangage.

Axe vertical : Cet axe imaginaire est celui qui traverse verticalement le centre de l'avion, et c'est sur lequel le nez (pointe de l'avion) tourne vers la gauche ou la droite. Ce mouvement s'appelle le lacet.

Sur un axe de coordonnées cartésiennes, l'axe longitudinal ou de roulis correspondrait à l'axe des x ; l'axe transversal ou axe de tangage serait l'axe y ; et l'axe vertical ou axe de lacet serait l'axe z.

L'origine des coordonnées de ce système d'axes est considérée comme située au centre de gravité de l'avion [8].



Figure 15 _ axe de tangage, de roulis et lacet [8]

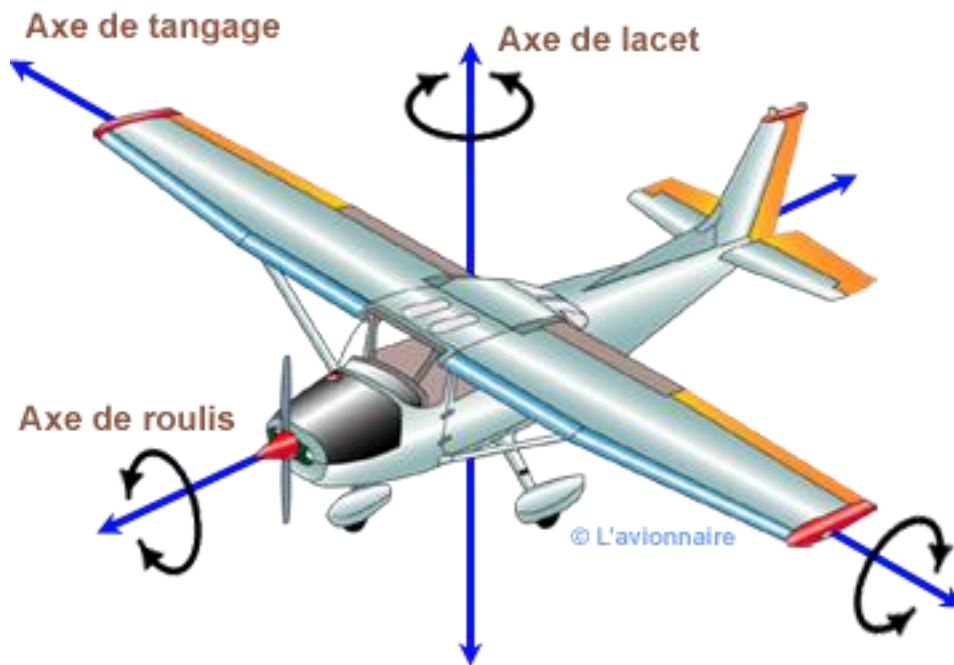


Figure 16 _ les Axes d'Avion [8]

2.3. Surface de contrôle de l'avion

Le contrôle de l'avion s'effectue en agissant sur des surfaces aérodynamiques qui, activées par le pilote via les commandes, modifiant l'aérodynamique de l'avion, le faisant se déplacer sur ses axes (voir figure 16). De cette façon, l'avion suit la trajectoire désiré. Ensuite, les gouvernes primaires sont mentionnées, qui sont formées par les ailerons, les gouvernes de profondeur et les stabilisateurs. Les volets, les becs et les spoilers sont des surfaces de contrôle secondaires, car ce sont des surfaces différentes sur lesquelles certains avions s'appuient pour améliorer la stabilité. Le type d'avion ou de drone à voilure fixe étudié dans cet ouvrage ne possède pas de gouvernes secondaires [8].

- **Ailerons** : Il s'agit de surfaces mobiles situées à l'arrière de l'extrémité de chaque aile, dont le fonctionnement fait rouler l'avion autour de son axe longitudinal. Son emplacement se situe à l'extrémité de l'aile, car dans cette partie le couple de la force exercée est plus important. Le pilote actionne les ailerons en tournant le volant de commande vers la gauche ou la droite.

Les ailerons ont un mouvement asymétrique (voir figure 17). Lorsque vous tournez le volant d'un côté, l'aileron d'une aile monte et celui de l'aile opposée descend, tous deux avec un angle de déviation proportionnel au tour donné au volant. L'aileron qui monte sur l'aile, situé vers l'endroit où se déplace le volant, implique moins de courbure dans cette partie de l'aile et donc moins de portance, ce qui fait descendre cette aile, et l'aileron en dessous de l'aile opposée suppose une plus grande courbure et portance, ce qui fait monter cette aile. Cette combinaison d'effets opposés produit le mouvement de roulis vers l'aile descendante [8].

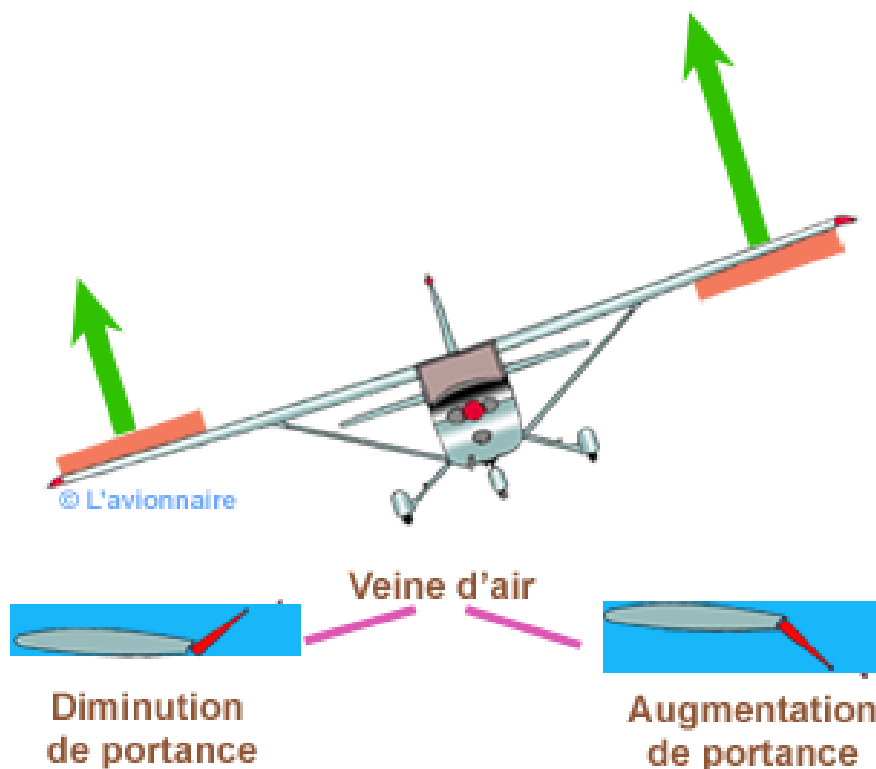


Figure 17 _ le Rôle des ailerons [8]

- **Élevateur** : Il s'agit de la surface mobile située à l'arrière de l'empennage horizontal de la queue de l'avion. Son activation provoque le mouvement de tangage de l'avion sur son axe transversal. Le mouvement de tangage de l'avion provoque un changement de l'angle d'attaque, c'est-

à-dire que le bouton de commande de profondeur contrôle l'angle d'attaque. La gouverne de profondeur est actionnée par le pilote qui pousse ou tire le volant ou le manche de commande et présente généralement une déviation maximale de 40 degrés vers le haut et de 20 degrés vers le bas [8].

Tirer sur l'entraînement de commande soulève cette surface tandis que le pousser l'abaisse. Le gouvernail vers le haut produit moins de portance sur la queue, ce qui réduit la queue, et par conséquent, le nez monte, ce qui entraîne un plus grand angle d'attaque. Le gouvernail vers le bas augmente la portance de la queue ; il monte, par conséquent, le nez descend, ce qui entraîne un angle d'attaque plus faible. De cette manière, le mouvement de tangage de l'avion est produit (voir figure 18), par extension, l'angle d'attaque est modifié [8].

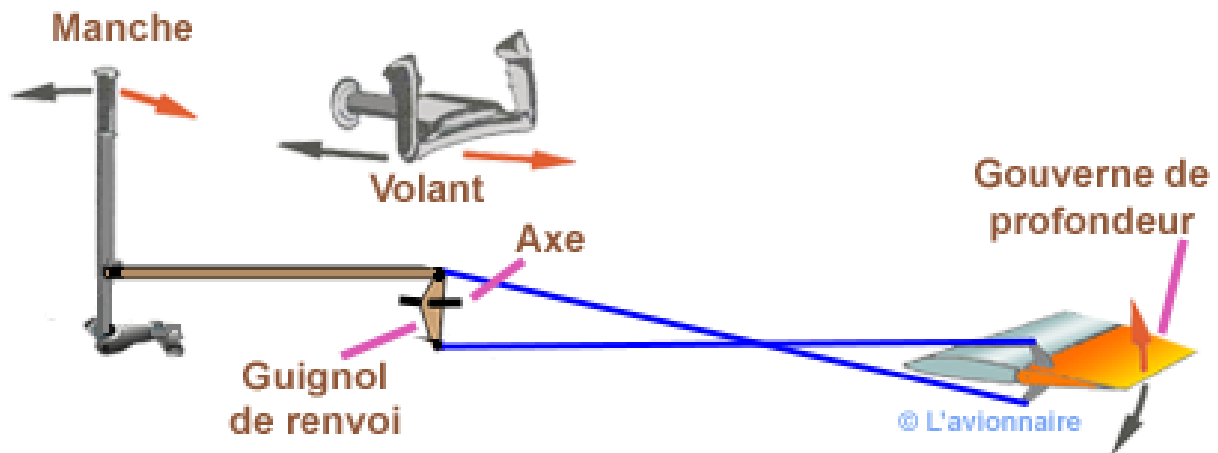


Figure 18 _principe de fonctionnement de l'élévateur [8]

- **Gouvernail de direction** : La surface mobile est montée à l'arrière de l'empennage vertical de l'empennage de l'avion (voir figure 19). Son mouvement provoque le mouvement de lacet de l'avion sur son axe vertical. Cependant, cela ne fait pas tourner l'avion ; ce qui fait tourner l'avion, c'est le mouvement des ailerons ; le gouvernail est généralement utilisé pour équilibrer les forces dans les virages ou pour centrer l'avion sur la trajectoire souhaitée. Il présente généralement une déflexion maximale de 30 degrés de chaque côté. Cette surface est actionnée à l'aide de pédales situées au sol de la cabine. En appuyant sur la pédale droite, le gouvernail tourne vers la droite, provoquant une réaction aérodynamique dans la queue qui le fait tourner vers la gauche ; par conséquent, le nez de l'avion s'incline vers la droite. L'inverse se produit lorsque vous appuyez sur la pédale gauche, le gouvernail à gauche, la queue à droite et le nez à gauche [8].

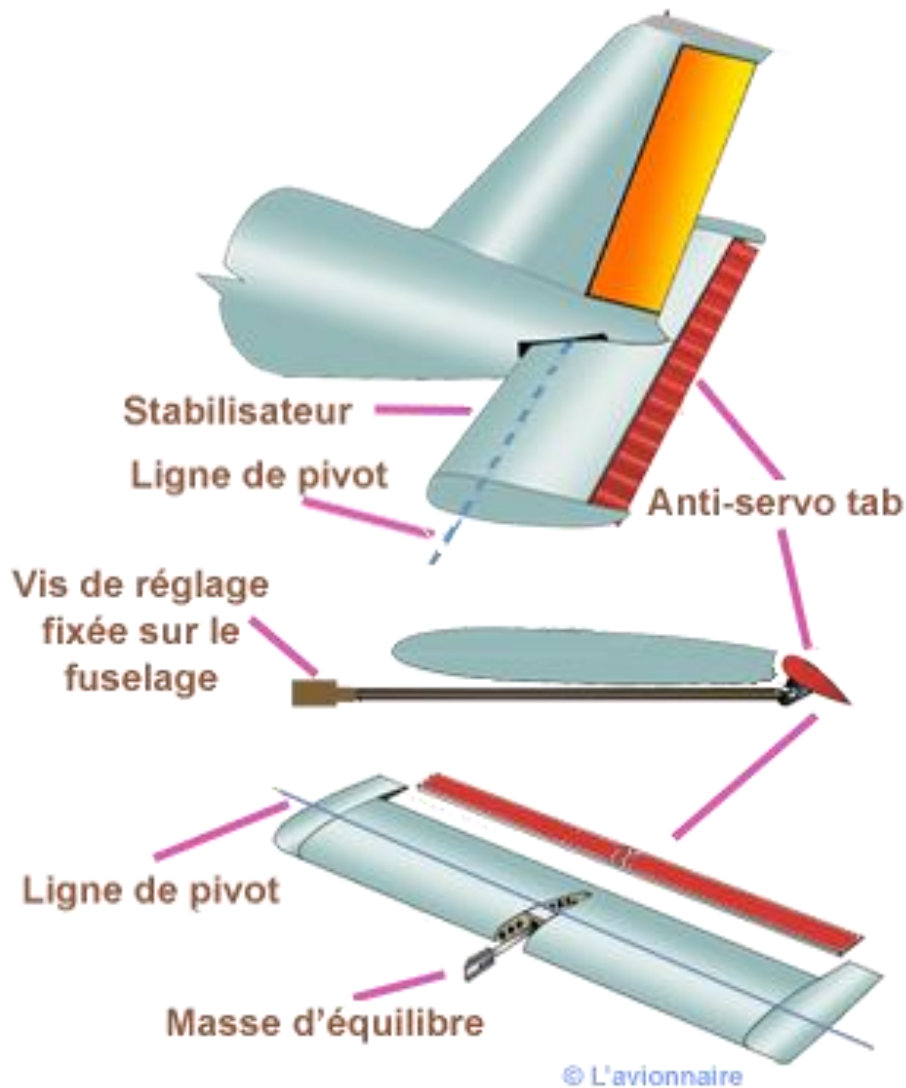


Figure 19 _ démonstration des élévateurs [8]

Les gouvernes secondaires sont mentionnées ci-dessous : volets, becs et spoilers. Ceux-ci fonctionnent toujours par paires et symétriquement ; c'est-à-dire que l'activation de la commande correspondante provoque le même mouvement vers le bas ou vers le haut des surfaces des deux ailes, sauf dans les mouvements des spoilers, qui complètent les ailerons affectant la portance, la forme du profil aérodynamique et la surface de l'aile. Le fait qu'une surface fonctionne et non sa forme symétrique peut constituer un grave inconvénient. De plus, il y a une limite de vitesse ; il ne peut fonctionner correctement qu'à différentes vitesses. Des accidents d'avions commerciaux se sont produits en raison de l'utilisation négligente de certaines de ces surfaces en vol, ce qui a conduit à des conceptions améliorées, incorporant des éléments qui empêchent leur activation à des vitesses inappropriées [8].

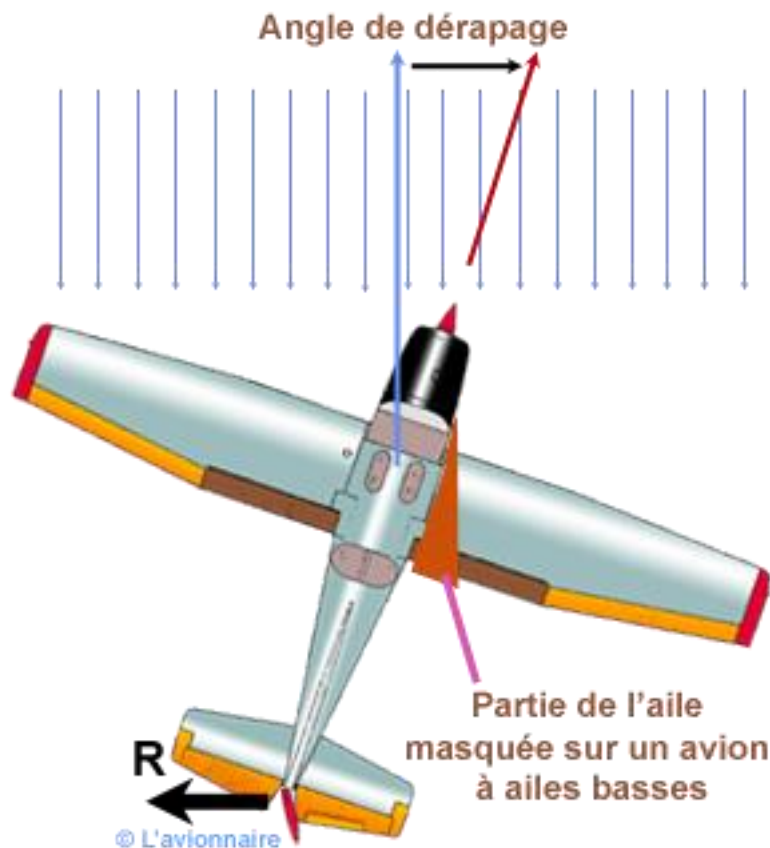


Figure 20 _fonctionnement de la gouverne de direction [8]

- **Rabat** : Les volets sont des surfaces hypersustentatrices dont la fonction est d'augmenter la portance de l'avion lorsqu'il vole à des vitesses inférieures à celles pour lesquelles l'aile a été conçue. Situés à l'intérieur de l'arrière des ailes, ils fléchissent symétriquement vers le bas, les deux en même temps selon un ou plusieurs angles, avec lesquels ils modifient la courbure du profil de l'aile, qui est plus prononcée sur l'extrados et moins prononcée sur la surface supérieure. La surface inférieure de l'aile, la surface de l'aile et l'angle d'incidence augmentent la portance et la traînée [8].

Les volets sont actionnés depuis le cockpit, à l'aide d'un levier, d'un système électrique, ou de tout autre système avec différents degrés d'assiette (10 degrés, 15 degrés), correspondant à différentes positions de levier ou d'interrupteurs électriques, et ils ne sont ni abaissés ni relevés. Tout leur projet d'un seul coup, mais progressivement. En général, des déflexions plus importantes augmentent davantage la traînée que la portance [8].

- **Lattes** : Ce sont des surfaces à grande portance qui agissent de la même manière que les volets. Ils sont situés au bas de l'aile. Lors du détournement, la canalisation d'un courant d'air à grande vitesse vers la surface supérieure augmente la portance, permettant d'obtenir de plus grands

angles d'attaque sans décrochage. Il est généralement utilisé dans les gros avions pour augmenter la portance lors des opérations à basse vitesse telles que les atterrissages et les décollages, bien que certains modèles d'avions légers en soient également équipés.

Dans de nombreux cas, leur utilisation et leur rétractation se font de manière automatisée ; tant que la pression exercée sur elles est suffisante, les lattes resteront rétractées, mais lorsque cette pression suffisante diminue jusqu'à un certain niveau proche de la vitesse de décrochage, les lattes se déploient automatiquement. En raison de l'augmentation ou de la diminution soudaine de la portance à des taux proches du décrochage, il convient d'être plus prudent lorsque l'on vole à basse vitesse à bord d'avions équipés de ces dispositifs [8].

- **Spoilers** : Le but de ces surfaces est de diminuer la portance de l'avion. Il fonctionne principalement sur les avions à réaction qui atteignent des vitesses élevées (voir figure 21), perdent la vitesse de l'avion en vol et facilitent l'atterrissage, contribuant ainsi à ralentir au sol. Dans certains avions, il est utilisé pour compléter les ailerons pour le contrôle latéral et les virages en vol [8].

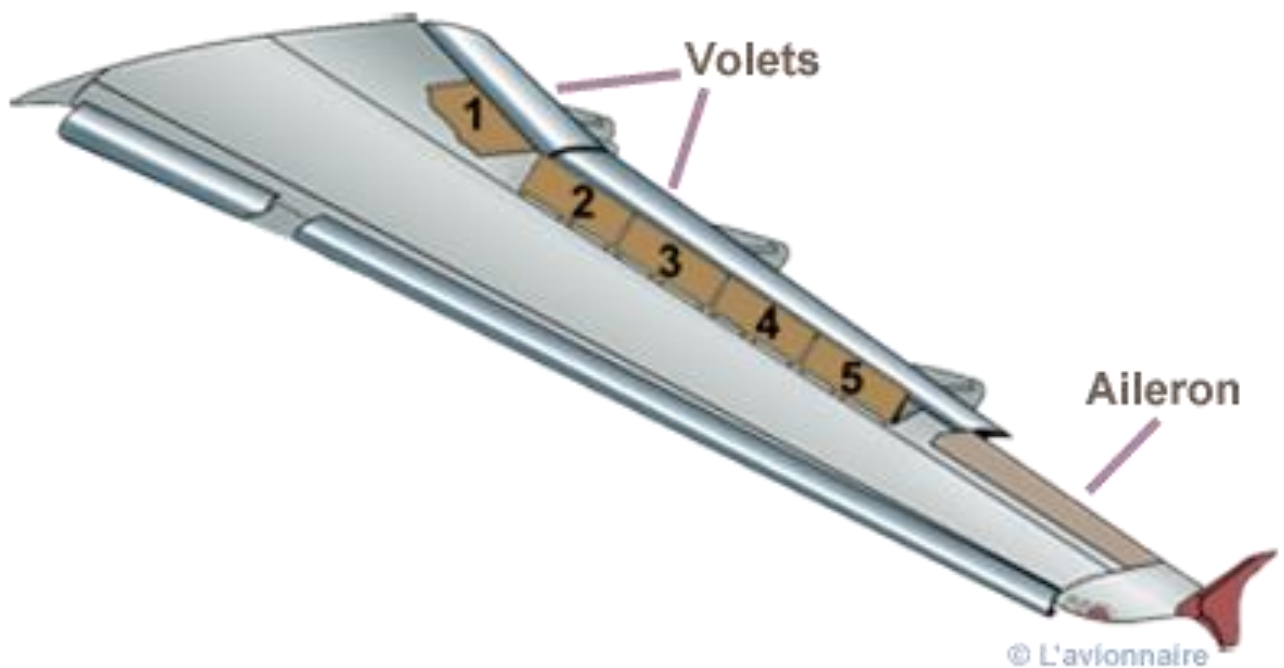


Figure 21 fonctionnement des spoilers [8]

2.4. Structure d'un avion

Les pièces d'avion mentionnées dans les figures suivantes sont nécessaires pour effectuer le contrôle de l'avion.

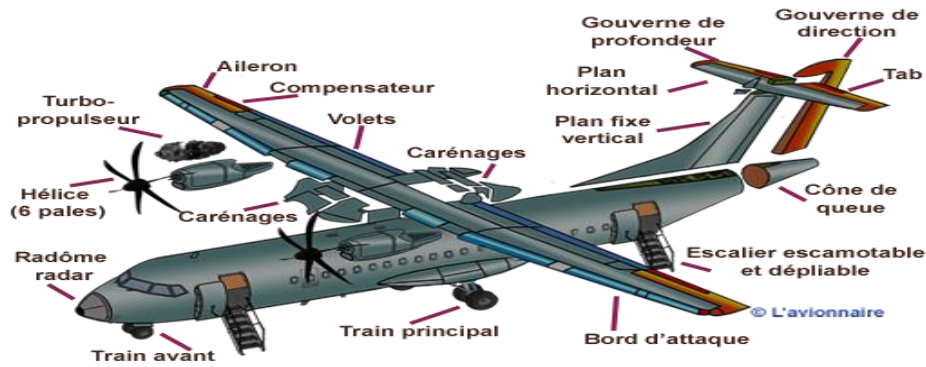


Figure 22 _ composition d'un ATR72 [8]

- **Fuselage** : Le fuselage est le nom donné au corps principal de la structure de l'avion, dont la fonction principale est d'héberger l'équipage, les passagers et le fret et de servir de support principal pour le reste des composants. La conception de la cellule doit également offrir des performances acceptables pour l'usage prévu de l'avion. Les fuselages offrant moins de résistance aérodynamique sont ceux à section circulaire, elliptique ou ovale, également caractérisés par leur forme allongée et conique [8].

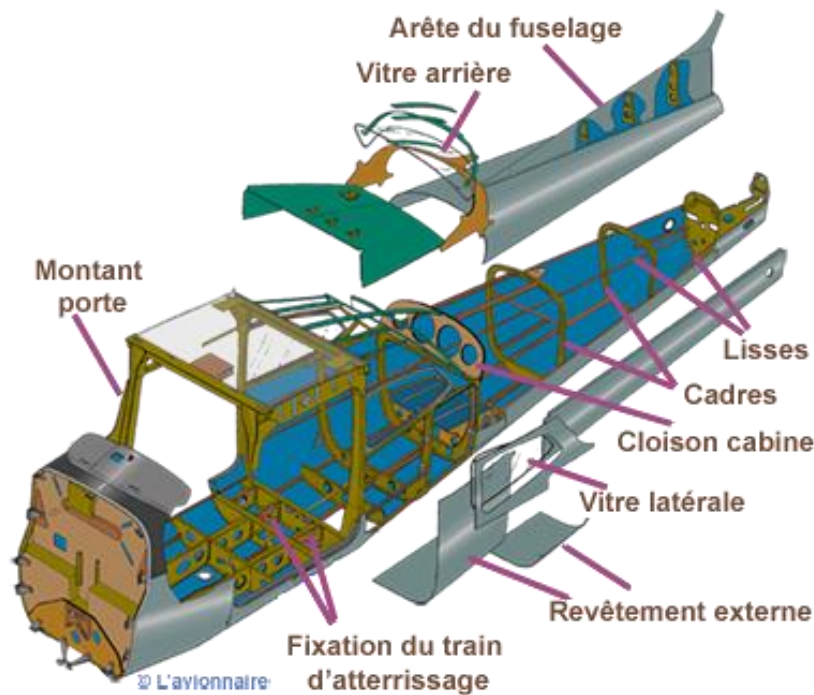


Figure 23 _ fuselage d'un avion [8]

- **Ailes** : Ce sont des éléments essentiels d'un avion. C'est d'eux que naissent les forces qui rendent le vol possible. De nombreux aspects doivent être pris en compte dans leur conception, comme le poids maximum à supporter, la résistance générée, le comportement lorsque l'aile décroche suite à un changement de point de pression, etc. A travers ces aspects, l'avion vise à fournir les

performances optimales pour combiner les meilleures vitesses avec la plus grande autonomie et la plus faible consommation de carburant possible [8].

- **Système de stabilisation** : aussi appelé empennage Celui-ci est généralement composé d'un stabilisateur vertical et d'un stabilisateur horizontal (la gouverne de profondeur) (voir figure 25). Comme leurs noms l'indiquent, leur mission est de contribuer à la stabilité de l'avion sur ses axes vertical et horizontal [8].

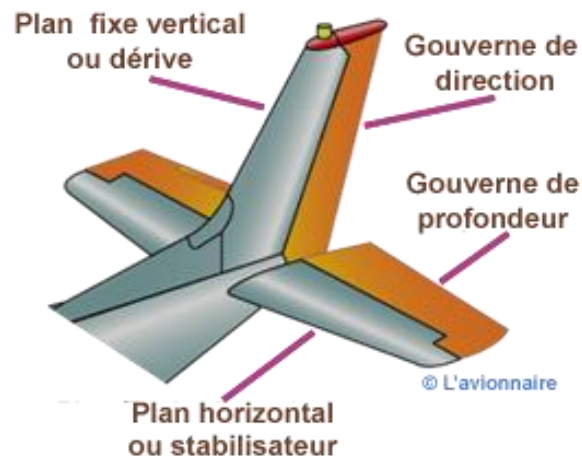


Figure 24 _ empennage Classique [8]

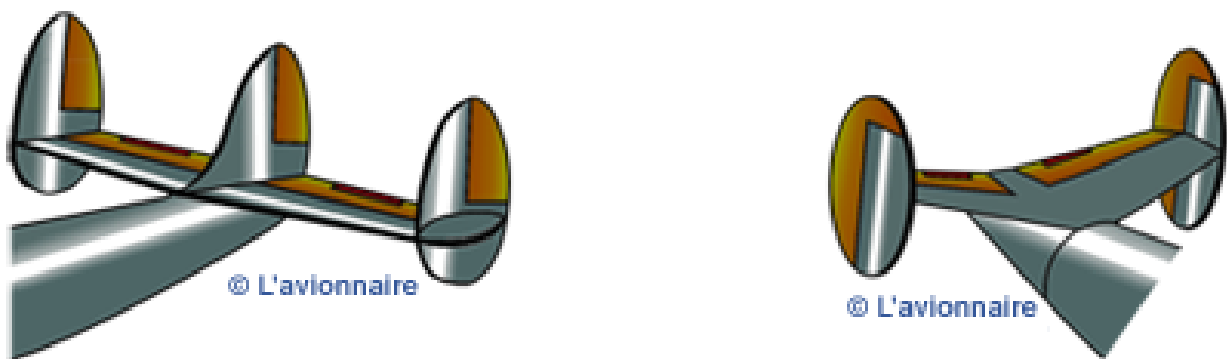


Figure 25 _ empennage a multiples dérives [8]

- **Train d'atterrissage** : Sa mission est d'amortir l'impact de l'avion à l'atterrissage et de permettre à l'avion de rouler et de se déplacer sur terre (voir figure 26). Il peut être fixe ou rétractable, et il existe des modèles de tricycles, c'est-à-dire deux roues principales et une roue placée dans la partie inférieure avant de l'avion. D'autres types, comme ce qu'on appelle le patin de queue, ont deux roues principales et un patin ou une roue de queue. Il existe des trains adaptés à la neige avec patins et des trains adaptés avec des flotteurs pour atterrir sur l'eau [8].



Figure 26 _ Train d'atterrissage classique [8]

- **Groupe moteur propulsion** : Celui-ci est chargé de fournir la puissance nécessaire pour contrecarrer la résistance de l'appareil, tant au sol qu'en vol, pour entraîner les ailes, produire de la portance et donner l'accélération requise. Ce groupe peut être constitué d'un ou plusieurs moteurs qui peuvent être à piston, à réaction, à turbopropulseur, etc. Ce groupe peut également comprendre des hélices, qui peuvent avoir différentes tailles, formes et nombres de pales [8].
- **Systèmes auxiliaires** : Le reste des systèmes sert de support au fonctionnement des éléments précédents ou pour apporter plus de confort ou un meilleur contrôle de l'avion. On peut citer par exemple le système hydraulique, le système électrique, celui en charge de la pressurisation, de l'alimentation en carburant, etc... [8]

2.5. Forces agissant en vol

Une série de forces agissent sur un avion en vol qui peuvent être favorables ou défavorables au vol de l'avion. Bien que les experts continuent de débattre et d'étudier l'aérodynamique, dans cette partie, nous nous intéressons uniquement à certains concepts fondamentaux tels que ceux présentés dans la figue_27 pour définir les forces impliquées dans un vol et leurs effets.

Parmi toutes les forces qui agissent sur un avion en vol, les principales sont la portance, le poids, la poussée et la résistance. Ces forces sont les principales car toutes les manœuvres avec un avion sont possibles avec ces forces agissant en vol. Ces quatre forces fonctionnent par paires : la portance s'oppose au poids et la poussée s'oppose à la traînée.

Un avion, comme tout objet, reste immobile au sol sous l'action de deux forces : son poids dû à la gravité qui le maintien au sol et la résistance au mouvement qui soutient son immobilité.

Pour que cet avion puisse voler, il faudra contrecarrer les effets de ces deux forces, la masse et l'opposition, en utilisant respectivement deux autres forces de sens opposé, la portance et la poussée.

Ainsi, la poussée doit vaincre la résistance qui s'oppose à la progression de l'avion, et la portance doit vaincre le poids de l'avion pour le maintenir en l'air.

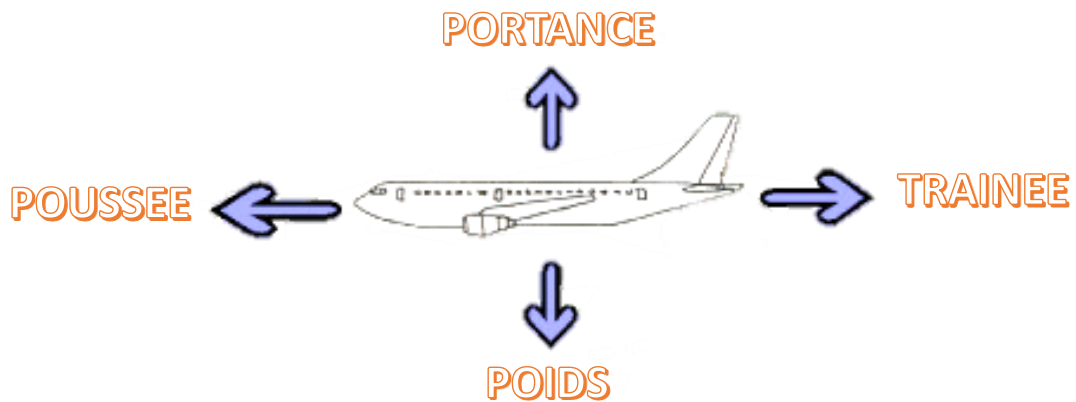


Figure 27 _ les forces agissantes en vole [9]

2.6. Opposition en vol

La traînée est la force qui empêche ou s'oppose au mouvement d'un avion. La résistance agit parallèlement et dans la même direction que le vent relatif. Cependant, on pourrait aussi dire que la résistance est parallèle et de sens opposé à l'avancée vers l'avant de l'avion. D'un point de vue aérodynamique, lorsqu'une aile se déplace dans l'air, il existe deux forces de résistance : (a) la résistance due au frottement de l'air sur l'aile et (b) la résistance due à la pression de l'air. Lui-même l'opposant au mouvement d'un objet.

La résistance de frottement est proportionnelle à la viscosité (opposition du fluide aux déformations tangentielles), qui dans l'air est très faible. La résistance au frottement est négligeable, tandis que la résistance à la pression dépend de la masse volumique de l'air.

Les deux résistances créent une force proportionnelle à la zone sur laquelle elles agissent et au carré de la vitesse. Une partie de la résistance à la pression produite par une aile dépend de la quantité de portance produite. Cette partie est appelée résistance induite, et la somme du reste des résistances est appelée résistance parasite.

2.7. La portance

La portance dépend des pressions exercées sur l'aile comme le montre la figure 28. L'envergure de l'aile crée une portance, cette dernière sera proportionnelle à la surface de l'aile. La qualité de la portance est déterminée par la forme du profil. Un coefficient nommé C_z caractérise cette forme.

L'air dans lequel se déplace l'aile a des caractéristiques dépendantes d'autres facteurs comme la température, la pression, etc. La masse volumique en kg/m³ est retenue comme paramètre global. Il en résulte l'expression suivante :

Portance = Pression dynamique x Surface x Caractéristiques du profil

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_p^2 \cdot S \cdot C_z \quad \dots\dots|4|$$

ρ : masse volumique de l'air en kg/m³.

S : surface de l'aile en m².

V_p^2 : vitesse en m /s.

C_z : coefficient de portance du profil. En effet, F_z est proportionnelle à :

- La pression dynamique ($\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_p$).
- La surface de référence (S).
- Un coefficient aérodynamique C_z qui tient compte de : la forme, l'état de surface et de l'incidence du profil.

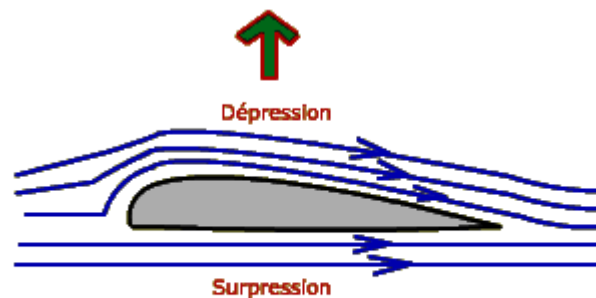


Figure 28 _ création de la portance [9]

2.8. La traînée

Pour vaincre la position de l'avion lorsqu'il est à l'arrêt, il faut l'accélérer sur la piste de décollage, maintenir un taux de montée adéquat, vaincre les résistances pour avancer, etc. ; pour cela, une force de poussée ou de traction est nécessaire. Cette force est obtenue en accélérant une masse d'air à une vitesse supérieure à celle de l'avion. La réaction, est égale à l'intensité mais de sens opposé,

fait avancer l'avion. Dans les avions à hélices, la force propulsive est générée par la rotation de l'hélice, entraînée par le moteur conventionnel ou turbopropulseur.

Cette force s'exerce dans la même direction que l'axe des points du système propulsif, qui est généralement parallèle à l'axe longitudinal de l'avion. Le principal facteur qui influence cette force est la puissance du moteur, mais d'autres éléments l'influencent également, comme la forme et la taille de l'hélice, la densité de l'air, etc...

Puisque la puissance est équivalente à l'énergie par unité de temps, plus la puissance est élevée, plus la capacité d'accélération est grande. La puissance de l'avion est le facteur le plus critique pour déterminer le taux de montée d'un avion. La vitesse de montée maximale d'un avion n'est pas liée à la portance mais à la puissance disponible.

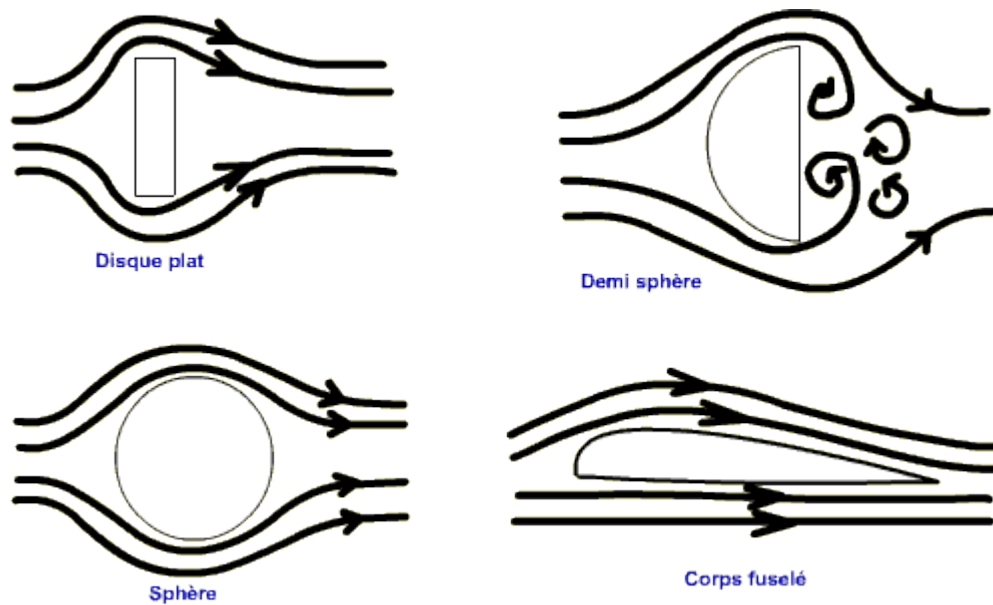


Figure 29 _ création de la trainée [9]

2.8.1. Caractéristiques

- **Point d'application** : Centre de poussée.
- **Direction** : Parallèle à l'écoulement de l'air.
- **Sens** : Du bord d'attaque vers le bord de fuite.
- **Intensité** :

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_P^2 \cdot S \cdot C_x \quad \dots\dots|5|$$

- En effet, F_x est proportionnelle à :

- La pression dynamique ($1/2 \cdot \rho \cdot V_p^2$).
- La surface de référence (S). Un coefficient aérodynamique C_x qui tient compte de la forme, l'état de surface et l'incidence du profil.

2.8.2. Détermination

Comme pour la portance ; en soufflerie, on peut déterminer la valeur de C_x , qui est très inférieure à la valeur de C_z pour une même aile et une même incidence. On peut ainsi déterminer la valeur de C_x pour chaque valeur de α , ce qui nous permet de construire la courbe $C_x = f(\alpha)$.

2.8.3. Différentes sortes de trainée :

La trainée totale est la somme de diverses trainées élémentaires :

a. *Trainée de forme*

Lorsqu'un objet se déplace, il crée une trainée qui résiste à son avancement. Chaque profil est étudié pour que sa trainée soit le plus faible possible mais aucun profil ne peut avoir une trainée nulle. Le C_x caractérise les performances du profil.

b. *La trainée de frottement*

Elle est la conséquence de la couche limite (la couche de contact avec l'air) qui existe car l'air n'est pas un fluide parfait. Il possède un certain coefficient de viscosité qui dépend de l'état de surface du profil.

La trainée induite : C'est la rançon obligatoire du mode de sustentation de l'avion : s'il y'a portance il y'a trainée induite. En effet, la sustentation est assurée par la diminution de pression a l'extrados et par l'augmentation de pression a l'intrados. Il s'ensuit que :

- **Aux extrémités d'ailes :**

L'air se dirige de l'intrados vers l'extrados donnant naissance à des tourbillons appelés tourbillons marginaux. Afin de diminuer la trainée induite par ces tourbillons :

- Il est nécessaire de réduire progressivement les champs de pression lorsqu'on s'approche de l'extrémité de l'aile.
- On augmente l'allongement.

Remarque :

- L'augmentation d'envergure crée des problèmes de résistance mécanique : La portance en bout d'aile a tendance à la faire plier et à la casser.
- Des dispositifs ont été développés, pour limiter les effets mécaniques due

à l'allongement (winglet).

$$C_{x_{induit}} = C_z / \pi \cdot \lambda \quad \dots\dots|6|$$

• **Aux bords de fuites :**

Lorsque les filets d'air déviés au bord d'attaque se rejoignent au bord de fuite, ils créent des tourbillons qui génèrent de la trainée induite. Ces tourbillons absorbent de l'énergie et créent une force résistante (la trainée induite).

- Si la portance est nulle => la trainée induite est nulle.
- La valeur du **Cx induit** est donnée par la formule décrite auparavant. La trainée induite sera d'autant plus importante que :
 - ❖ Le **Cz** sera élevé (pression différentielle importante entre intrados et extrados).
 - ❖ L'allongement sera faible (pour une aile très longue, les déviations d'intrados et d'extrados seront moins importantes et par suite les tourbillons libres moins intenses).

c. *La trainée de fuselage*

La trainée du fuselage C_{x_f} est aussi une trainée de friction si aucun décollement ne se manifeste. Malheureusement, Une méthode empirique qui donne des résultats satisfaisants consiste à utiliser l'équation suivante :

$$C_{x_f} = \frac{2 \cdot C_{x_{pmin}} + C_{x_p}}{3} \cdot \frac{S_f + 2 \cdot (S_d + S_s)}{2 \cdot S_a} \quad \dots\dots|7|$$

$C_{x_{pmin}}$: est le Cx minimal du profil d'aile du modèle.

C_{x_p} : est le Cx du profil d'aile à l'incidence considérée.

Sf, Sd, Ss et Sa Sont respectivement : surface mouillée du fuselage, surface portante des ailes, dérive et stabilisateur.

L'équation () nous permet de calculer la surface mouillée du fuselage :

$$S_f = 2 \cdot k_s \cdot (h + l) \cdot k_p \cdot L \quad \dots\dots|8|$$

(**h , l**) et **L** sont respectivement : la hauteur du maitre couple, la largeur du maitre couple et la longueur du fuselage. **k_s** est le coefficient de section qui permet d'obtenir le périmètre d'une section du fuselage en fonction de sa hauteur et de sa largeur. Il est égal à **1** pour un fuselage caisse, **0,78** pour un fuselage parfaitement elliptique et entre ces deux valeurs dans les autres cas. **k_p** Correspond au

coefficient de profilage. La figure ci-dessous indique les coefficients k_p de quelques profils de fuselages classiques.

2.8.4. La résultante R

Origine de la résultante : La viscosité de l'air provoque une grande quantité de forces telles que la surpression intrados, la dépression extrados et le frottement sur le profil. La force résultante est appelée "résultante aérodynamique R".

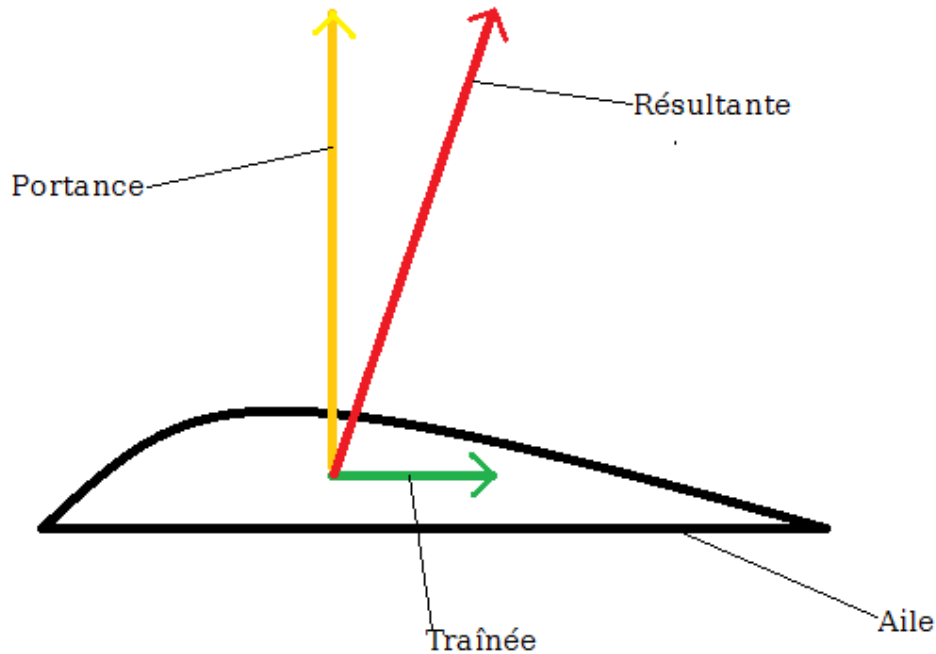


Figure 30 _ la résultante

Caractéristiques de R :

- **Point d'application :** c'est le centre de poussée « intersection entre la corde et R ».
- **Direction :** oblique par rapport à l'écoulement de l'air.
- **Sens :** vers l'arrière de l'intrados vers l'extrados.
- **Intensité :**

$$R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_P^2 \cdot S \cdot C_R \quad \dots\dots|9|$$

La résultante R est proportionnelle a :

- La pression dynamique ($\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_P$).

- La surface de référence (S).
- Un coefficient aérodynamique C_R qui tient compte de :
 - ❖ La forme de profil.
 - ❖ L'état de surface de profil.
 - ❖ L'incidence de profil.

Composantes de R :

Cette force est généralement décomposée en deux forces :

- L'une parallèle à l'écoulement de l'air : la trainée F_x .
- L'autre perpendiculaire à reculement de l'air : la portance F_z .

$$R = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} \dots\dots|10|$$

2.9. La voilure

2.9.1. Surface de référence

Par convention la surface de référence d'un avion est la surface projetée sur un plan horizontal des deux ailes plus la partie du fuselage comprise entre eux (voir figure 31).

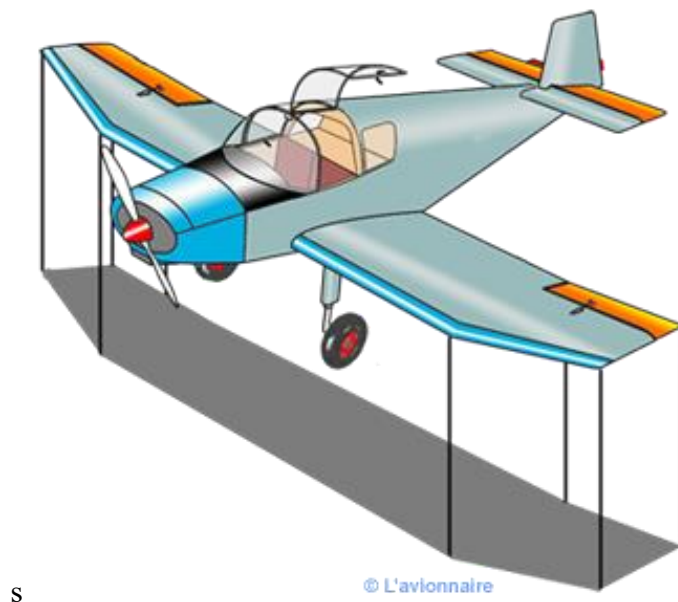


Figure 31 _ la surface de l'avion [8]

2.9.2. Caractéristiques géométriques d'une voilure

a. *Profil de référence*

Sur les avions modernes le profil diffère au fur et à mesure que l'on s'éloigne du fuselage. On dit que l'aile est vrillée. Il faut distinguer le vrillage géométrique et le vrillage aérodynamique.

• **Vrillage géométrique** : quand le profil reste semblable à lui-même le long de l'aile, seul l'angle de calage varie.

• **Vrillage aérodynamique** : quand la courbure du profil varie le long de l'aile. Généralement les profils de références sont choisis au niveau de l'encastrement de l'aile dans le fuselage.

➤ **Envergure d'une aile "B"** : C'est la longueur B d'une extrémité de la voilure à l'autre perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'avion (voir figure 32).

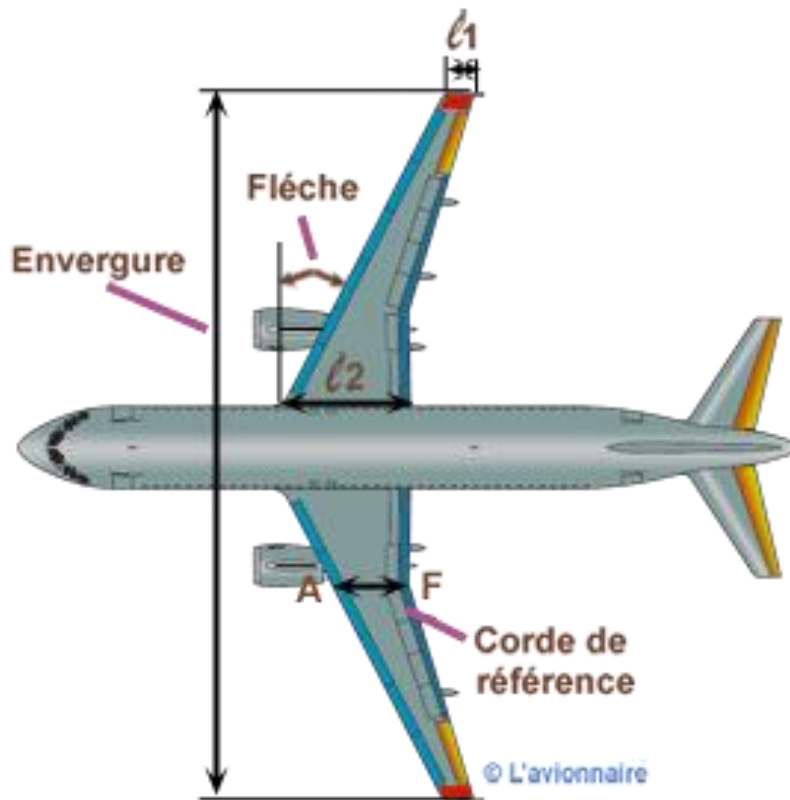


Figure 32 _ envergure d'un avion [8]

➤ **Corde moyenne ou profondeur moyenne " l_m "** :

La corde moyenne l est la distance entre le bord d'attaque A et le bord de fuite F comme le montre la figure 33.

$$l_m = S / B = \text{Surface de référence} / \text{envergure}$$

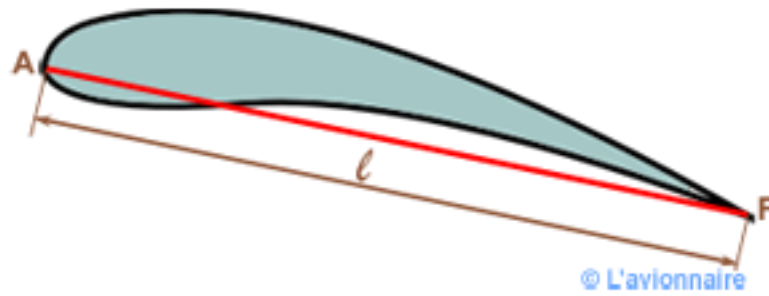


Figure 33 la corde moyenne d'un profile d'aile [8]

b. Allongement

Cette grandeur, sans dimension, joue un rôle très important dans l'étude de la trainée induite. Il est calculé par le rapport :

$$\lambda = B/l_m = B^2/S \dots\dots|11|$$

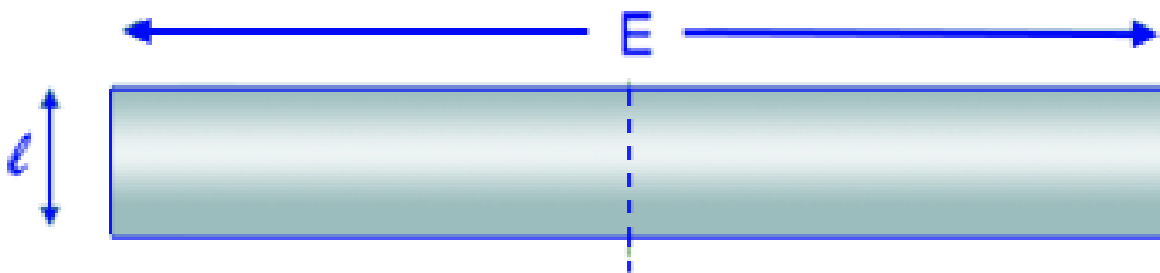


Figure 34 _ allongement d'une aile rectangulaire [8]

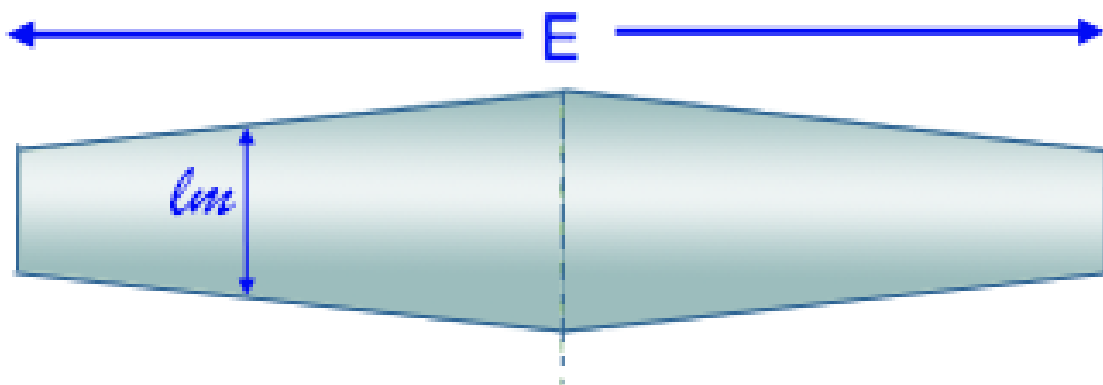


Figure 35 _ allongement d'une aile [8]

c. Dièdre d'une voilure

C'est l'angle que fait le plan des cordes de chaque aile « plan de l'aile » avec le plan horizontal. Et peut être positif (lorsque l'aile est située plus haut que l'emplanture) ou négatif.

d. *Fleche d'une voilure*

C'est l'angle forme entre une ligne de référence longitudinale de la voilure (exemple Bord d'attaque) et perpendiculaire au plan de symétrie de l'avion.

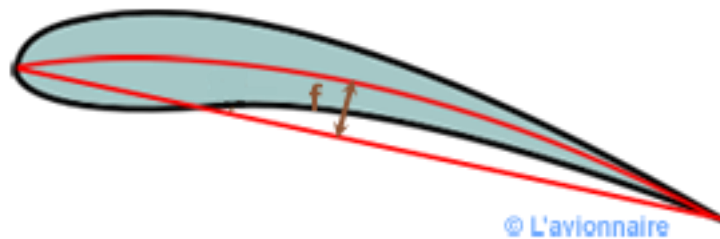


Figure 36 _flèche d'une aile d'avion [8]

2.10. Hélice

2.10.1. Profil d'une pale

Le profil d'une pale d'hélice ressemble au profil d'une aile, c'est-à-dire doté d'un bord d'attaque, d'un bord de fuite, d'une corde de référence, d'une épaisseur moyenne, d'une cambrure, etc. Il détermine les performances d'une hélice, mais aussi sa résistance. L'optimisation de la géométrie d'une pale est donc un compromis entre performance et résistance mécanique.

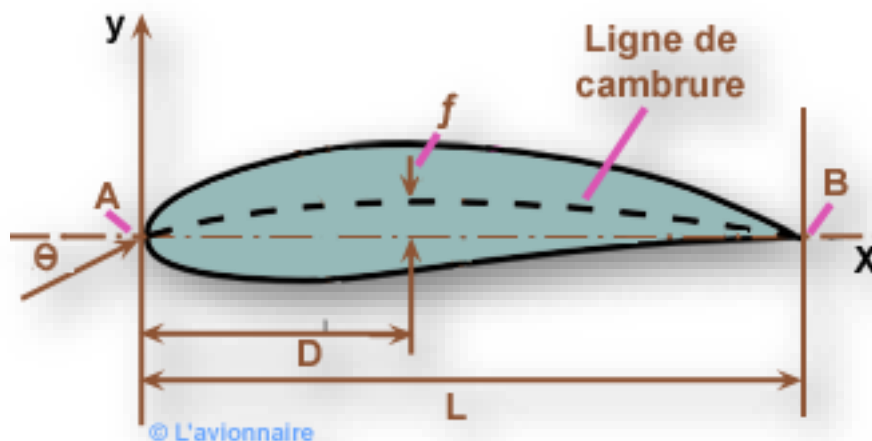


Figure 37 Profil d'une pale [8]

A = Bord d'attaque

B = Bord de fuite

L = Corde de référence

D = Position de la cambrure maximale du profil

f = Cambrure maximale

θ = Angle de calage

2.10.2. Pas d'une hélice

a. *Le pas géométrique*

Le pas géométrique est la distance parcourue par l'hélice en un tour suivant l'axe de rotation de l'hélice. C'est-à-dire la distance séparant deux points sur une génératrice du cylindre.

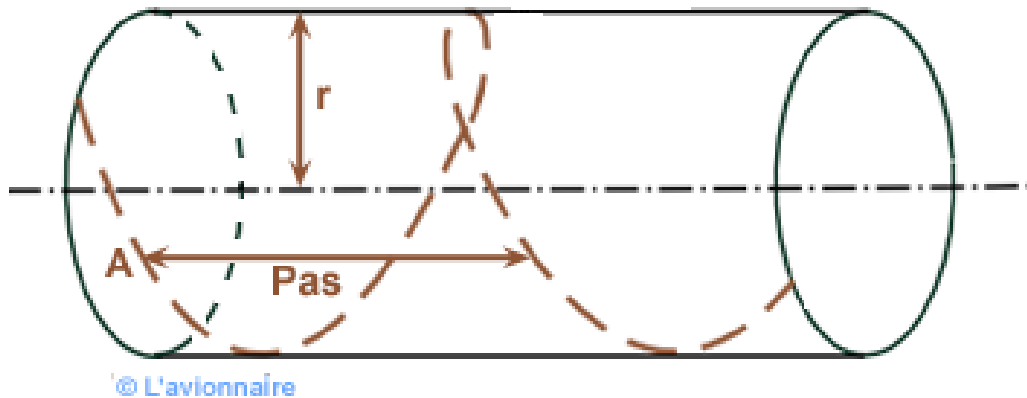


Figure 38 Pas géométrique [8]

En développant une section d'hélice, on constate que le point A a subi une translation H pour une rotation d'un tour.

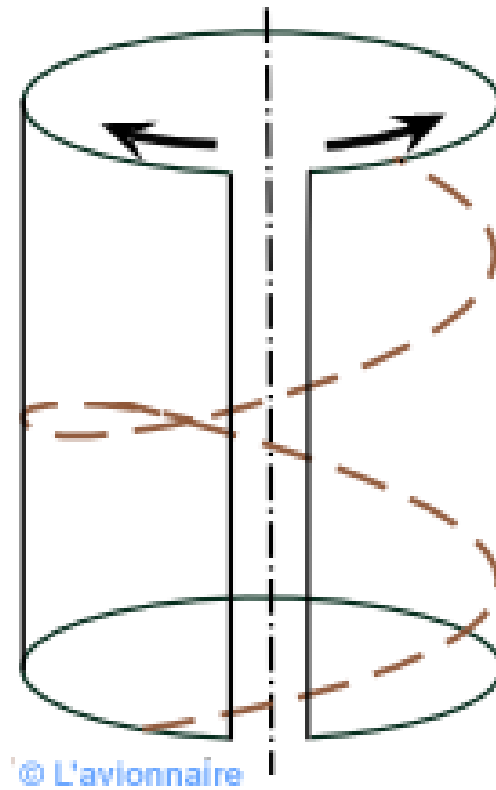


Figure 39 Pas ouvert [8]

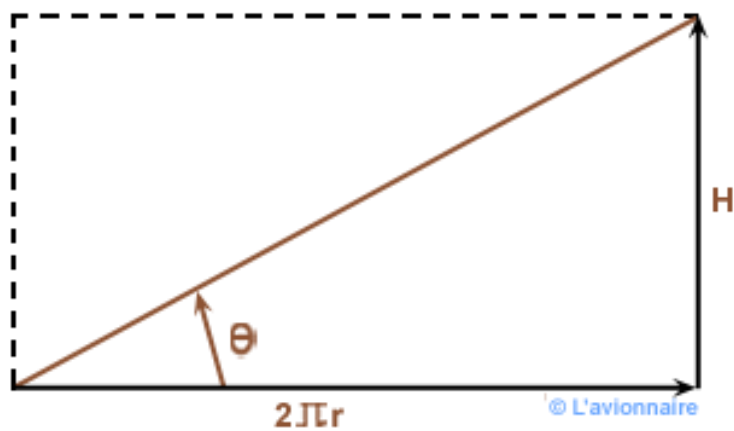


Figure 40 Pas développer [8]

Cette translation H appelée pas théorique est la valeur de la translation de l'hélice pour une rotation complète dans un milieu incompressible et inerte et s'écrit $H = 2\pi.r.tan\theta$ Le pas géométrique de l'hélice est défini généralement comme étant le pas de la section située à une distance de $r = 0,7R$ de l'hélice, elle est appelée section de base.

b. Le pas relatif

$$h = H/D = \text{pas géométrique} / \text{diamètre de l'hélice} \dots\dots|12|$$

$$h = \frac{2\pi \times 0,7 \times R \times \tan\theta}{2R} = 2,2 \times \tan\theta \times h = \text{pour } \theta \text{ à } 0,7R$$

c. *Le pas effectif*

Le pas effectif est la distance effectivement parcourue par l'avion pendant un tour d'hélice. En effet, l'hélice peut tourner sans que l'avion avance (Cas d'un point fixe).

2.10.3. Le glissement

Le glissement de l'hélice est la différence entre le pas géométrique de l'hélice et son pas effectif. Ainsi, le pas géométrique ou théorique est basé sur l'absence de glissement, mais le pas réel ou effectif inclut le glissement de l'hélice dans l'air.

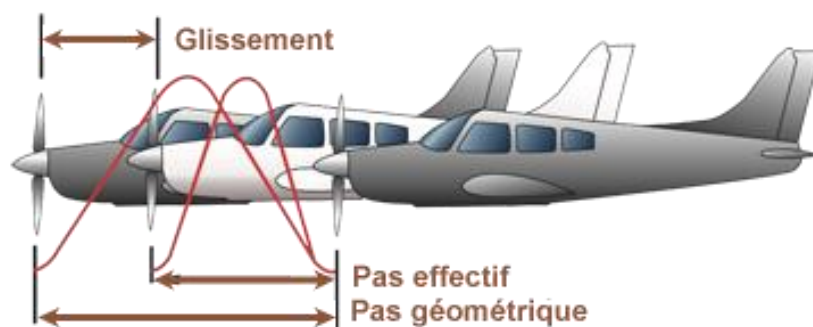


Figure 41 Pas de glissement [8]

2.10.4. Vitesse en bout de pale

Pour une hélice de 1,80 m soit un rayon de 0,90 m et une vitesse de 2400 *tours/minute* ou 40 *tours/seconde*, la vitesse en bout de pale sera égale au demi diamètre de l'hélice multiplié par 2π et multiplié par les *tours/seconde* :

Soit : $0,90 \times 2\pi \times 40 = 226,10 \text{ m/s}$ ou $813,88 \text{ Km/h}$|13|

À cela, il faut maintenant combiner cette vitesse avec celle de l'avion. Si X est la vitesse de l'avion et Y la vitesse de rotation en bout de pale, nous aurons en Z la vitesse réelle du bout de pale.

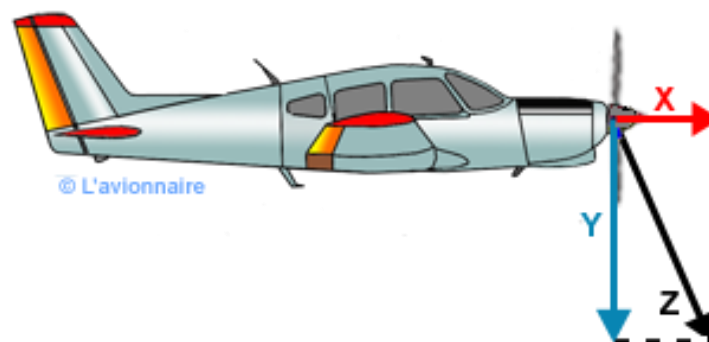


Figure 42 Vitesse en bout de pale [8]

Soit :

$$Z^2 = X^2 + Y^2 \quad \dots\dots|14|$$

Si la vitesse de l'avion est de 360 *km/h* soit 100 *m/s* nous aurons :

$$V^2 = 100^2 + 266,1^2 = 10000 + 51121,21 = 6112,21$$

Et :

$$V = \sqrt{6112,21} = 247,22 \text{ m/s} = 890 \text{ km/h}$$

La vitesse du bout de pale est de 890 *km/h* pour une vitesse avion de 360 *km/h*.

Pour éviter le bruit et une baisse de rendement, la vitesse maximale en bout d'une pale est limitée à environ 85 % de la vitesse du son (Mach 1 = 340 *m/s* dans l'air à 15 °C) soit 290 *m/s*. C'est pour ces raisons que le diamètre d'une hélice et sa vitesse de rotation sont limités.

Une hélice de 1,80 m à 3600 *tours/min* atteindra cette limite. D'où la nécessité d'un réducteur entre le moteur et l'hélice, si la vitesse de rotation du moteur est importante. Les avions turbopropulseurs sont tous équipés d'un réducteur.

2.11. Conclusion

Les avions à voilure fixe, fruit de siècles de recherches et d'innovations, reposent sur des principes physiques solides. En étudiant les forces agissant sur un profil aérodynamique, les notions de portance et de traînée, ainsi que les différents modes de vol, nous avons pu appréhender les mécanismes complexes qui régissent le vol. Ces fondamentaux sont indispensables pour concevoir et piloter en toute sécurité des avions, qu'ils soient habités ou autonomes. Les drones à voilure fixe, en s'appuyant sur ces connaissances, ouvrent de nouvelles perspectives pour l'aviation civile et militaire.

CHAPITRE 3

Bases physiques et mécanique des drones à voilure fixe

3. Bases physiques et mécanique des drones à voilure fixe

3.1. Introduction

Les ailes d'avion sont de véritables chefs-d'œuvre d'ingénierie et un élément clé du vol. La forme profilée inspirée des oiseaux permet à l'avion de défier la gravité. Le secret réside dans sa courbure. Au sommet, l'air circule plus vite et crée une zone de basse pression. En bas, la circulation de l'air ralentit et une zone de haute pression se forme. Cette différence de pression, décrite par la loi de Bernoulli, crée une portance, une force ascendante qui soulève l'avion. L'angle d'attaque défini par le pilote via les ailerons modifie la force de la force de portance, lui permettant de monter, de descendre et de maintenir l'altitude. Les surfaces de contrôle telles que le gouvernail de direction et la gouverne de profondeur contrôlent chacune la direction et l'attitude de l'avion. Sa conception ingénieuse et sa coordination avec d'autres composants de l'avion permettent aux humains de prendre leur envol et de conquérir les cieux.

3.2. Cahier des charges

UN DRONE A VOILURE FIXE

- **Mise en œuvre facile, ne nécessitant pas de matériel spécifique ou difficile d'accès.**
- **Réduire et optimiser le cout.**
- **Disponibilité des matériaux : MATERIAUX DE RECYCLAGE, DISPONIBLE SUR LE MARCHÉ ALGÉRIEN.**
- **Type de drone : UN DRONE A VOILURE FIXE.**
- **Type de vol : VOL COMMANDÉ.**
- **Pilotage : FACILE POUR AMATEUR.**
- **Envergure : 1 – 1,5 mètre.**
- **Taille : 0,70 – 1 mètre.**
- **Poids : 400 – 600 grammes.**
- **Utilisation : Polyvalente.**

3.3. Profil d'aile

Le profil est la section de l'aile par un plan parallèle au plan de symétrie de l'avion. Le profil d'aile d'un avion de tourisme est différencié de celui d'un avion de marchandise ou de chasse. Donc forcément à ceux des drones. Il se caractérise par :

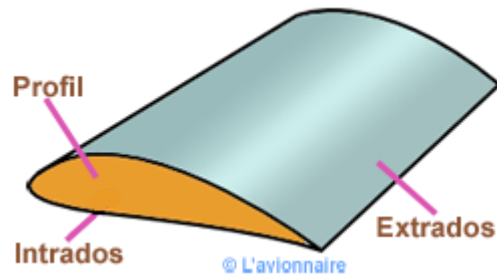


Figure 43 le profil d'aile [8]

3.4. La Corde

La corde d'un profil est la droite A - F joignant le bord d'attaque au bord de fuite. Sa longueur est notée ℓ .

Dans notre cas la corde est de 20 cm autrement dit 0,20 m

$$\ell = 0,20 \text{ m}$$

3.5. Épaisseur

L'épaisseur maximale de l'aile est la distance maximale existante entre l'extrados et l'intrados (voir figure 43). L'épaisseur est notée h comme le montre la figure 44.

Dans notre cas l'épaisseur est de 3 cm autrement dit 0,03 m

$$h = 0,03 \text{ m}$$



Figure 44 _ l'épaisseur de l'aile [8]

3.6. Épaisseur relative

L'épaisseur relative d'un profil est le rapport de l'épaisseur maximale (t en anglais) sur la longueur de la corde $e = h/\ell$

Dans notre cas

$$e = \frac{h}{\ell} = \frac{0,03}{0,20} = 0,15. \quad \dots\dots|15|$$

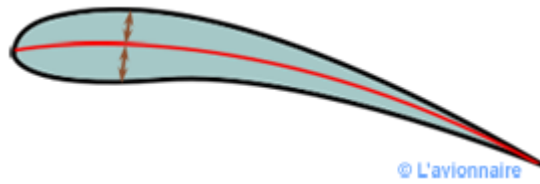


Figure 45 l'épaisseur relative d'une aile d'avion [8]

3.7. Ligne moyenne

La ligne moyenne est le lieu des points équidistants de l'extrados et de l'intrados. Cette ligne est généralement courbée ou "cambrée".

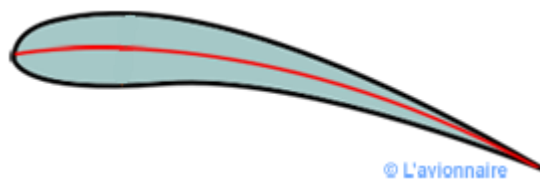


Figure 46 _ ligne moyenne de l'aile [8]

3.8. Angle d'incidence nulle

C'est l'angle d'incidence pour lequel la portance est nulle. Ci-dessous la portance est nulle pour une certaine incidence négative. Mais pour un profil symétrique la portance sera nulle pour une incidence nulle.

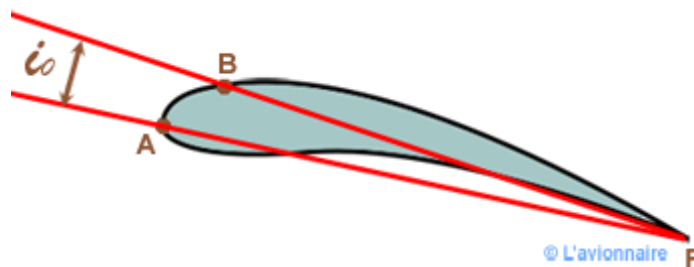


Figure 47 _ l'angle d'incidence d'une aile [8]

3.9. Angle de calage

C'est l'angle α entre la corde du profil de l'aile et l'axe longitudinal de l'aéronef. Ceci permet de diminuer la traînée en vol de croisière.

Dans notre cas

$$\alpha = 0^\circ$$



Figure 48 _ angle de calage [8]

3.10. Envergure et surface

L'envergure est la distance entre les extrémités des ailes $E = 2b$ ou B

Dans notre cas

$$E = 1,20 \text{ m}$$

3.11. Surface

Elle comprend le prolongement fictif de l'aile dans le fuselage.

Dans notre cas

$$S = E \times \ell = 1,20 \times 0,20 \text{} |16|$$

$$S = 0,24 \text{ m}^2$$

3.12. Allongement

Dans notre cas ont choisi une aile rectangulaire cela veut dire que :

$$\lambda = \frac{E}{\ell} = \frac{1,20}{0,20} = 6 \text{} |17|$$

3.13. Différents types de profils

Il existe de très nombreux profils qui sont classés suivants leurs formes par familles.

3.13.1. Biconvexe symétrique

L'intrados et l'extrados convexes sont symétriques par rapport à la corde (voir figure 49). La ligne moyenne est rectiligne et est confondue avec la corde. Ces profils sont utilisés pour les empennages verticaux et horizontaux.

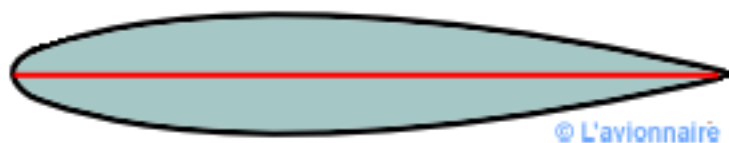


Figure 49 _ profil biconvexe symétrique [8]

3.13.2. Biconvexe dissymétrique

La courbure de l'extrados est plus accentuée que celle de l'intrados (voir figure 50). La ligne moyenne est à simple courbure (intrados et extrados convexes) Ces profils sont les plus employés pour les ailes d'avion de loisir.

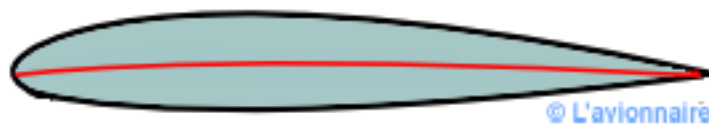


Figure 50 _profil biconvexe dissymétrique [8]

3.13.3. Plan convexe

Il s'agit d'un profil ayant un intrados relativement plat et un extrados cambé (convexe) (voir figure 51). La ligne moyenne est à simple courbure. Et c'est ce qu'on a choisi dans notre Drone a voilure fixe.

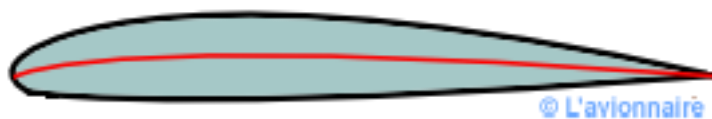


Figure 51 _profil plan convexe [8]

3.13.4. Plan creux

L'extrados est convexe et l'intrados concave (voir figure 52). Ces profils sont très porteurs mais génèrent une traînée importante. Ce type de profil était très utilisé autrefois pour les planeurs. La ligne moyenne est à simple courbure.

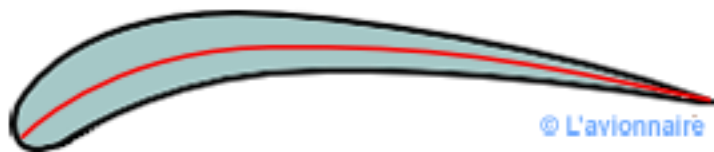


Figure 52 _profil plan creux [8]

3.13.5. Double courbure

La ligne moyenne est à double courbure (voir figure 53). La seconde courbure de la ligne moyenne confère des qualités de stabilité d'où le qualificatif d'AUTOSTABLE. Ce profil peu répandu est surtout utilisé pour les ailes volantes.

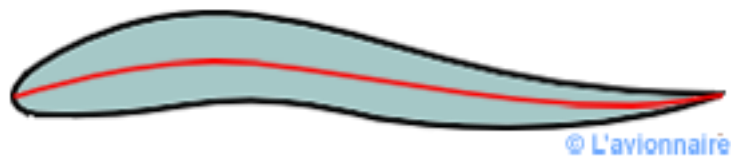


Figure 53 _profil double courbure [8]

3.13.6. Supercritique

Double courbure inversée (voir figure 54). Extrados très tendu (grand rayon de courbure). Dans la zone du bord d'attaque de l'extrados rayon de courbure mini. Forte épaisseur relative de l'ordre de 17 %.

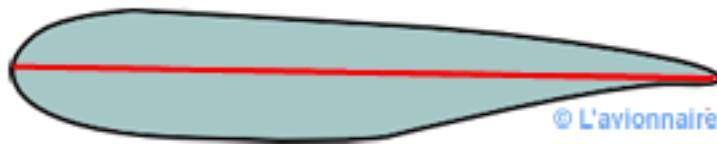


Figure 54 _profil supercritique [8]

3.13.7. Laminaire

D'abord il faut savoir qu'il n'existe pas plus de profils laminaires que de profils turbulents. Ces expressions sont trompeuses car on pourrait croire que certains profils sont laminaires jusqu'au bord de fuite. Si cette dernière notion est employée dans les calculs théoriques pour initialiser un calcul avec un point d'arrêt turbulent, il n'en reste pas moins vrai que tout profil comporte dans la réalité une partie laminaire, qui peut évidemment être plus ou moins importante et une partie turbulente [8].

Les ailes à profil dit "laminaire" ont été développées à l'origine pour faire voler un avion plus vite. L'épaisseur h d'une aile à profil laminaire est généralement plus faible qu'une aile à profil aérodynamique conventionnel, le bord d'attaque est plus "pointu" et ses surfaces supérieures et inférieures sont presque symétriques par rapport à la corde. La partie la plus épaisse h d'une aile laminaire se produit à environ 50 % de la corde, alors que pour une aile classique, la partie la plus épaisse se trouve à environ entre 20 et 30 % [8].

L'effet obtenu par ce type de conception d'une aile est de maintenir le flux d'air laminaire dans un pourcentage plus élevé de la corde et de contrôler le point de transition. Le frottement est donc

considérablement réduit et la répartition de la pression sur l'aile de flux laminaire est bien plus importante. Cependant, au vol aux grands angles près du décrochage le point de transition avance plus rapidement que sur une aile classique [8].

Un autre problème très important est la contamination de la surface qui perturbera le flux laminaire et le rendra turbulent, comme la pluie sur l'aile ou des débris d'insectes qui provoqueront également la perte de petites régions d'écoulement laminaire [8].

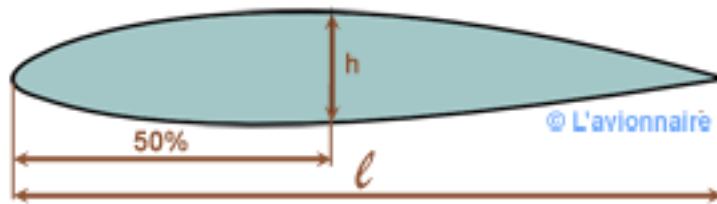


Figure 55 _profil laminaire[8]

3.14. Aile NACA 4415

3.14.1. Air-foil Tools

Dans le domaine de l'ingénierie aéronautique, la conception des profils aérodynamiques joue un rôle crucial en déterminant les performances aérodynamiques des ailes, des hélices et des turbines des avions. Airfoil Tools s'impose comme une ressource précieuse pour les ingénieurs novices et expérimentés, offrant une suite complète d'outils et de ressources dédiés à l'analyse et à la conception de profils aérodynamiques.

Au cœur d'Airfoil Tools se trouve une vaste base de données de plus de 1600 profils, soigneusement sélectionnée à partir de sources diverses. Cette vaste collection répond à une large gamme d'applications, englobant à la fois les conceptions de profils historiques et modernes. Les utilisateurs peuvent facilement naviguer dans cette base de données en recherchant par nom de profil, coordonnées ou caractéristiques spécifiques.

Airfoil Tools étend ses capacités au-delà de la simple visualisation, en offrant une suite d'outils pour le calcul des paramètres aérodynamiques. Les utilisateurs peuvent déterminer les coefficients de portance, de traînée et les distributions de pression sur la surface du profil. Ces calculs fournissent des informations sur les forces aérodynamiques agissant sur le profil, permettant de prendre des décisions éclairées en matière de conception.

3.14.2. Le profil NACA 4415-il

Le profil NACA 4415 est défini par ses paramètres de conception spécifiques, qui dictent sa forme et ses caractéristiques aérodynamiques. Ces paramètres comprennent :

- Courbure Maximale (M) : 4% - Ceci indique la courbure maximale de la surface supérieure du profil, mesurée en pourcentage de la corde.
- Position de la Courbure Maximale (P) : 40% - Cela représente l'emplacement de la courbure maximale le long de la corde, exprimé en pourcentage de la corde à partir du bord d'attaque.
- Épaisseur Maximale (XX) : 15% - Ceci désigne l'épaisseur maximale du profil, mesurée en pourcentage de la corde [10].

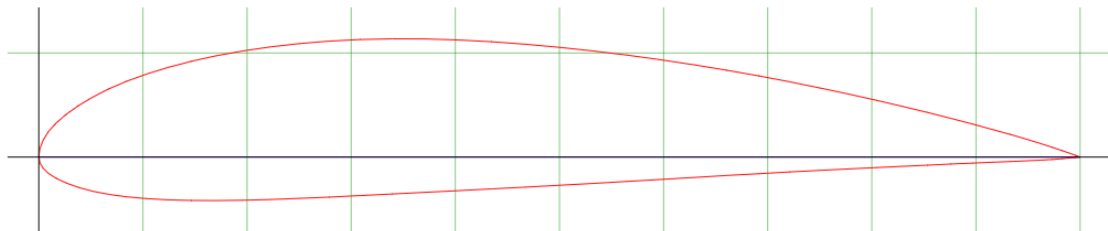
Le profil NACA 4415 présente des performances aérodynamiques remarquables, ce qui en fait un choix polyvalent pour diverses applications aéronautiques. Ses principales caractéristiques aérodynamiques comprennent :

- Rapport Portance/Traînée (L/D) : Le profil NACA 4415 bénéficie d'un rapport portance/trainée élevé, en particulier à des angles d'attaque modérés. Cela signifie qu'il génère une portance importante avec une traînée minimale, ce qui conduit à des performances de vol efficaces.
- Caractéristique de décrochage : Le profil présente un comportement de décrochage en douceur, caractérisé par une diminution progressive de la portance et une augmentation progressive de la traînée lorsque l'angle d'attaque dépasse l'angle critique. Ce comportement de décrochage indulgent améliore la sécurité et la contrôlabilité du vol.
- Répartition de la Pression : La répartition de la pression sur la surface du profil est régulière, avec une transition en douceur du bord d'attaque vers le bord de fuite. Cela contribue à la stabilité et aux performances aérodynamiques globales du profil [10].

Airfoil plotter (naca4415-il)

NACA 4415 - NACA 4415 airfoil

Plot and print the shape of an airfoil (aerofoil) for your specific chord width and transformation. The dat file data can either be loaded from the [airfoil database](#) or your own airfoils which can be entered [here](#) and they will appear in the list of airfoils in the form below.



Name = NACA 4415
Chord = 100mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°

[Open full size plan in new window](#)

[Open paginated plan in new window for multi page printing](#)

[CSV file of coordinates](#)

[SVG image as text file](#)

[Restore defaults](#)

[Download PDF file](#)

Figure 56 _profil d'aile NACA 4415 sur AIRFoil Tools [10]

3.14.3. Applications

Le profil NACA 4415 a trouvé de nombreuses applications dans la conception de divers aéronefs en raison de ses propriétés aérodynamiques favorables. Il est couramment utilisé dans :

- Avions d'Aviation Générale : Le rapport portance/traînée élevé et les caractéristiques de décrochage en douceur du profil le rendent bien adapté aux avions d'aviation générale, y compris les petits avions, les planeurs et les avions d'entraînement.
- Véhicules Aériens Sans Pilote (UAV) : L'efficacité et la stabilité du profil NACA 4415 en font un choix populaire pour les UAV, en particulier ceux conçus pour une endurance à longue portée et un fonctionnement à basse vitesse.
- Éoliennes : La capacité du profil à générer de la portance à des vitesses de vent faibles le rend adapté aux pales d'éoliennes, contribuant à une production d'énergie efficace [10].

3.15. Nombre de Reynolds

En mécanique des fluides, le nombre de Reynolds, noté Re , joue un rôle crucial dans la compréhension du comportement des écoulements des fluides. Ce nombre adimensionnel, introduit par Osborne Reynolds en 1883, permet de caractériser le régime d'écoulement d'un fluide, c'est-à-dire la manière dont il se déplace et interagit avec les parois environnantes [10].

Le nombre de Reynolds se base sur le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité qui agissent sur un fluide en mouvement. Les forces d'inertie sont celles qui font que le fluide continue à se déplacer une fois mis en mouvement, tandis que les forces de viscosité, liées à la résistance interne du fluide à la déformation, s'opposent à ce mouvement.

3.15.1. Calcul du Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad \dots\dots[17]$$

A l'aide d'Air-Foil Tools qui nous permet de calculer le nombre de Reynolds et on trouve

$$Re = 140\,776$$

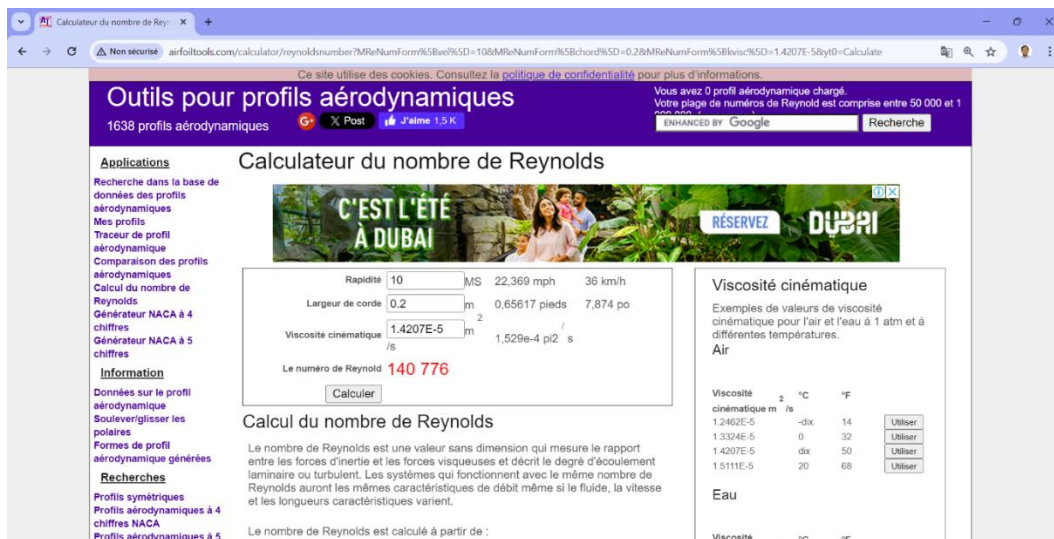


Figure 57 _ calcul de nombre de Reynolds sur AIRFoil Tools [10]

3.15.2. Applications du Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds trouve de nombreuses applications en mécanique des fluides, notamment :

- Dimensionnement des conduites : Le choix du diamètre des conduites pour le transport de fluides dépend du nombre de Reynolds afin d'éviter des écoulements turbulents générateurs de pertes de charge importantes.
- Conception de profilés aérodynamiques : Le nombre de Reynolds est crucial pour analyser les performances aérodynamiques des ailes d'avion et d'autres profilés, permettant de prédire la portance, la traînée et le comportement de décrochage.

- Étude des écoulements dans les échangeurs thermiques : Le nombre de Reynolds est utilisé pour optimiser la conception des échangeurs thermiques, en garantissant un transfert de chaleur efficace entre le fluide et la paroi.

3.16. La portée & La traînée

3.16.1. Comprendre les Coefficients Aérodynamiques

- Coefficient de Portance (C_l) : Le coefficient de portance représente la force de portance générée par le profil aérodynamique, perpendiculaire à la direction du flux d'air. Il augmente généralement avec l'angle d'attaque jusqu'à un certain point, puis diminue lorsque le profil décroche.
- Coefficient de Moment de Tangage (C_m) : Le coefficient de moment de tangage représente le moment de tangage généré par le profil aérodynamique autour de son quart de corde moyen. Il est généralement positif pour les angles d'attaque positifs, ce qui signifie que le profil a tendance à piquer vers le bas, et négatif pour les angles d'attaque négatifs, ce qui signifie qu'il a tendance à cabrer.
- Coefficient de Traînée (C_d) : Le coefficient de traînée représente la force de traînée générée par le profil aérodynamique, parallèle à la direction du flux d'air. Il augmente généralement avec l'angle d'attaque.

3.16.2. Analyse des Graphes

- Graphique C_l vs α : Ce graphique indique la variation de la portance en fonction de l'angle d'attaque. La pente de la courbe représente la sensibilité du profil à l'angle d'attaque. Un profil avec une pente plus élevée aura une portance plus importante pour un changement d'angle d'attaque donné.
- Graphique C_m vs α : Ce graphique indique la variation du moment de tangage en fonction de l'angle d'attaque. La position de la courbe par rapport à l'axe des abscisses indique la stabilité longitudinale du profil. Un profil stable aura une courbe qui passe par le centre de gravité aérodynamique (généralement autour de 25% de la corde).
- Graphique C_d vs α : Ce graphique indique la variation de la traînée en fonction de l'angle d'attaque. La pente de la courbe représente la sensibilité du profil à la traînée. Un profil avec une pente plus faible aura une traînée plus faible pour un changement d'angle d'attaque donné.

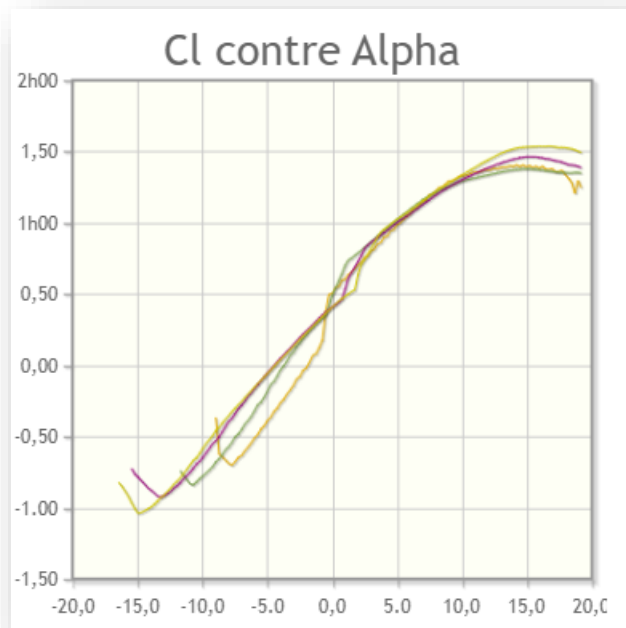


Figure 58 graphe de Cl / Alpha [10]

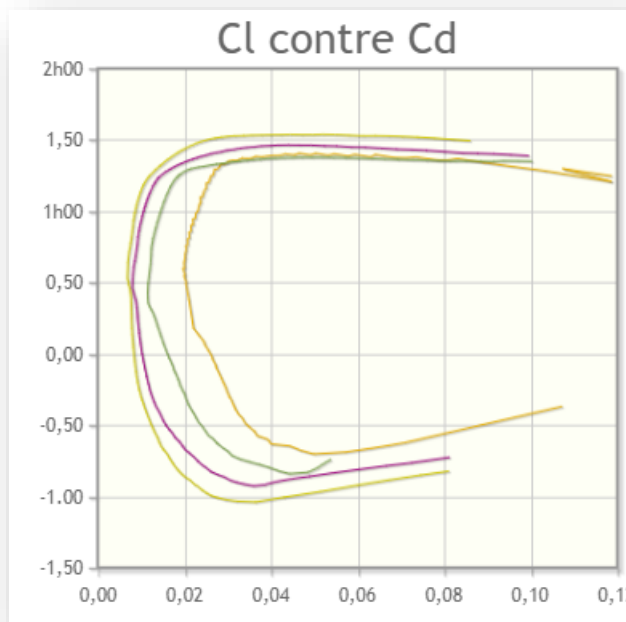


Figure 59 graphe Cl / Cd [10]

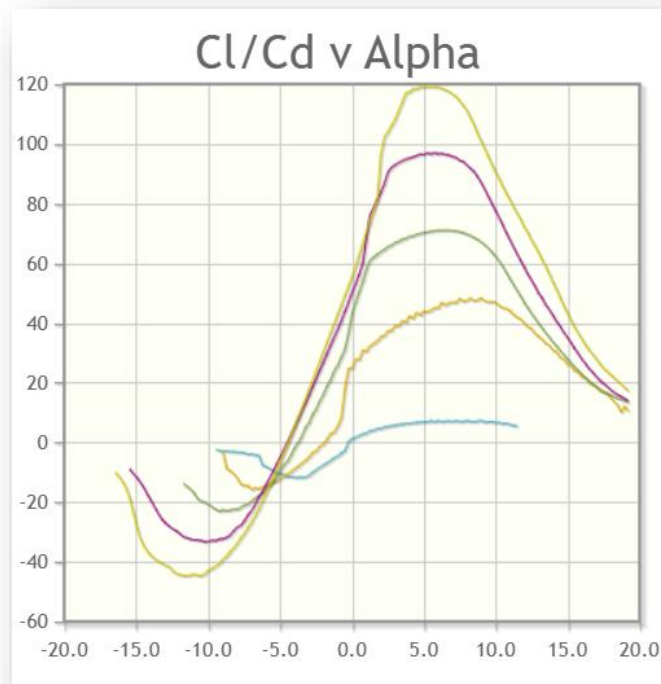


Figure 60 graphe $C_l/C_d / \text{Alpha}$ [10]

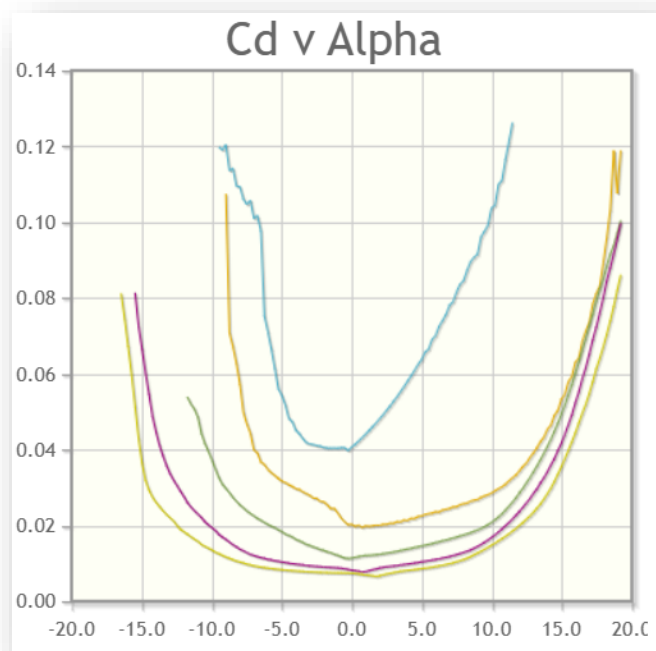


Figure 61 graphe C_d / Alpha [10]

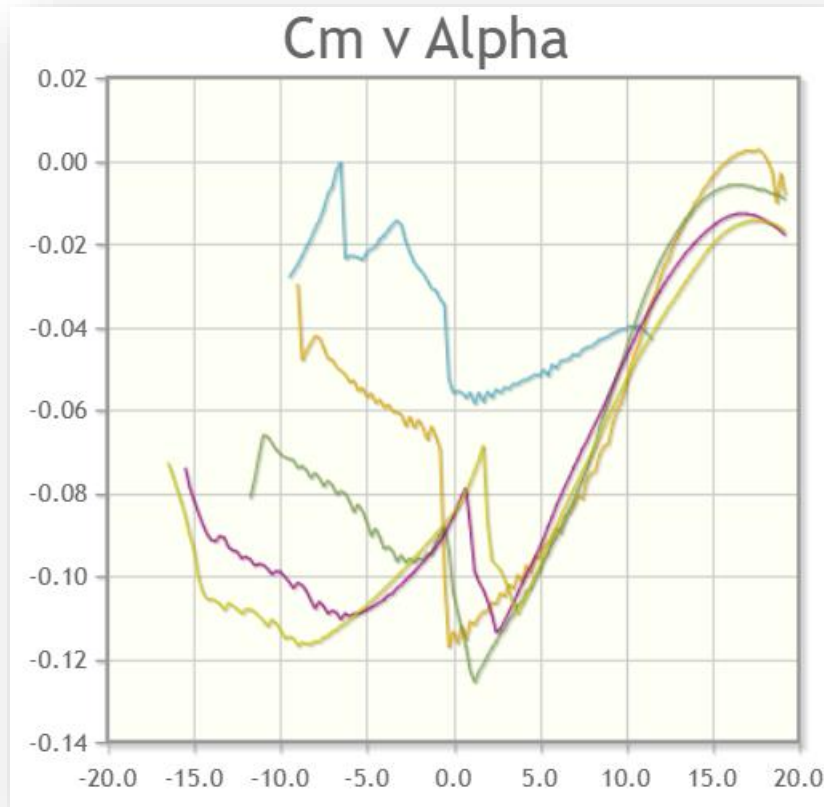


Figure 62 graphe Cm / Alpha [10]

3.16.3. Applications des Graphes

Les graphes C_l , C_m , et C_d en fonction d'alpha sont essentiels pour la conception et l'analyse des profils aérodynamiques. Ils permettent aux ingénieurs de :

- Déterminer les performances aérodynamiques du profil dans différentes conditions de vol, telles que le décollage, le vol en croisière et l'atterrissage.
- Comparer les performances de différents profils et choisir celui qui convient le mieux à une application particulière.
- Prédire le comportement d'un avion en vol et optimiser sa conception.

3.16.4. Calculer la portance (L)

Un drone à voilure fixe, tout comme un avion, doit générer une force suffisante pour s'opposer à la gravité et ainsi voler. Cette force, c'est la portance. Alors pour calculer cette force On a :

$$L = \frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S \times C_l \quad \dots\dots[18]$$

CHAPITRE III Bases physiques et mécanique des drones à voilure fixe

Avec :

$$\alpha = 0^\circ$$

$$cl(\alpha) = 0,5$$

$$\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$$

Donc

$$L = \frac{1}{2} 1,204 \times 10^2 \times 0,216 \times 0,5$$

$$L = 6,50 \text{ N}$$

3.16.5. Calculer la traînée (D)

La traînée est une force qui s'oppose au mouvement d'un drone à voilure fixe. C'est un peu comme si le drone devait constamment lutter contre un vent contraire, et pour la calculer On a :

$$D = \frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S \times Cd \quad . \quad \dots\dots|19|$$

Avec :

$$\alpha = 0^\circ$$

$$cd(\alpha) = 0,02$$

$$\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$$

Donc :

$$D = \frac{1}{2} 1,204 \times 10^2 \times 0,216 \times 0,02$$

$$D = 0,26 \text{ N}$$

3.16.6. Analyser les résultats

Les valeurs de portance et de traînée calculées nous permettent d'analyser les performances aérodynamiques du profil NACA 4415 dans les conditions de vol spécifiées. Nous pouvons comparer ces valeurs à d'autres profils ou aux exigences de notre application pour évaluer la pertinence du profil NACA 4415 pour notre conception.

3.17. Moteur

Dans le domaine de la propulsion électrique, les moteurs coreless, ou moteurs à balais commutant électroniques, se distinguent par leur efficacité, leur fiabilité et leur large plage de vitesses.

Comprendre le calcul de la puissance et de la vitesse de ces moteurs est crucial pour une utilisation optimale dans divers systèmes, notamment les drones, les véhicules électriques et les robots.

3.17.1. Facteurs Déterminants de la Puissance et de la Vitesse

La puissance et la vitesse d'un moteur coreless sont déterminées par plusieurs facteurs clés :

- **Tension d'alimentation (U)** : La tension d'alimentation fournie au moteur influence directement sa capacité à générer de la puissance. Une tension plus élevée permet au moteur de tourner plus rapidement et de produire plus de puissance.
- **Constante de moteur (Kv)** : La constante de moteur, exprimée en tours par minute par volt (RPM/V), relie la vitesse de rotation du moteur à la tension d'alimentation. Un Kv plus élevé indique une vitesse de rotation plus élevée pour une tension donnée.
- **Courant (I)** : Le courant consommé par le moteur dépend de la charge appliquée et de l'efficacité du moteur. Un courant plus élevé permet au moteur de générer plus de couple, mais il augmente également la consommation d'énergie et la chaleur générée.

3.17.2. Formules de Calcul

- **Puissance mécanique (Pm)** : La puissance mécanique produite par le moteur est calculée par la formule suivante :

$$P_m = K_v \times U \times I \quad \dots\dots|20|$$

Sachant que pour le moteur coreless.

$$P_m: 5,5 \text{ W}$$

$$U : 3,7\text{V}$$

$$I : 0,15 \text{ A}$$

$$K_v = \frac{P_m}{U \times I} \quad \dots\dots|21|$$

- **Vitesse de rotation (N)** : La vitesse de rotation du moteur est calculée par la formule suivante :

$$N = K_v \times U - (I \times R_{int}) \quad \dots\dots|22|$$

Si on néglige R_{int} alors on aura :

$$N = 1100 \times 3,7 - 0 = 4070 \text{ tr/m}$$

3.18. Conclusion

Les lois de l'aérodynamique, étudiées en détail dans les parties précédentes, constituent le fondement de la conception d'un drone à voilure fixe. La compréhension des forces agissant sur une aile, telles que la portance et la traînée, est essentielle pour dimensionner correctement les surfaces portantes et choisir les profils adaptés. Les connaissances acquises sur la stabilité et le contrôle du vol nous permettront de définir les caractéristiques géométriques du drone et de sélectionner les actionneurs appropriés. C'est sur ces bases théoriques solides que nous allons désormais aborder la phase de conception et de réalisation du drone.

CHAPITRE 4
Conception et
Réalisation mécanique

4. Conception et Réalisation mécanique

4.1. Introduction

Le cœur d'un drone réside dans sa conception mécanique. C'est elle qui lui donne sa forme, sa résistance et ses capacités de vol. De la sélection des matériaux à l'assemblage des composants, chaque détail compte. Dans cette partie, nous allons plonger au cœur de la mécanique d'un drone, en analysant les éléments clés qui contribuent à ses performances : fuselage, aile et bien d'autres encore.

4.2. SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) 3D largement utilisé dans l'industrie pour créer des modèles numériques de produits. Il est particulièrement apprécié pour son interface intuitive et sa puissance, ce qui le rend accessible aux débutants tout en offrant des fonctionnalités avancées pour les professionnels.

4.2.1. Les bases de SolidWorks

- **Modélisation 3D** : SolidWorks permet de créer des formes géométriques complexes en 3 dimensions, de la simple pièce à l'assemblage complet d'un produit.
- **Conception paramétrique** : Chaque élément d'une pièce est défini par des paramètres (dimensions, contraintes, etc.). Cela facilite les modifications ultérieures et garantit la cohérence du modèle.
- **Assemblages** : Plusieurs pièces peuvent être assemblées pour créer des produits finis. SolidWorks gère les relations entre les pièces (contraintes, mouvements, etc.).
- **Mises en plan** : Des dessins techniques en 2D peuvent être générés automatiquement à partir du modèle 3D.

4.2.2. Domaines d'utilisations

SolidWorks est utilisé dans de nombreux domaines, notamment :

- **La mécanique** : Conception de pièces mécaniques, d'assemblages, de machines.
- **L'automobile** : Conception de véhicules et de leurs composants.
- **L'aéronautique** : Conception d'avions et de leurs systèmes.
- **Le design industriel** : Conception de produits grand public.

4.3. Matériaux utilisés

Un matériau, c'est tout ce qui compose la matière qui nous entoure. C'est la substance fondamentale d'un objet, d'une structure ou d'un produit. Les matériaux peuvent être naturels (comme le bois, la pierre, le coton) ou synthétiques (comme le plastique, le métal, le verre).

4.3.1. Polystyrène

Le polystyrène (PS) est un thermoplastique reconnu pour sa rigidité et sa transparence. Sa nature amorphe lui confère une certaine fragilité et une faible résistance aux chocs, bien qu'il puisse être modifié par l'ajout de plastifiants. Le PS est facilement transformable par injection ou extrusion. Sa faible résistance chimique et sa sensibilité à la fissuration sous contrainte limitent ses applications. Le polystyrène est un matériau polyvalent aux propriétés intéressantes : rigidité, légèreté et facilité de mise en œuvre. Cependant, sa fragilité et sa sensibilité aux solvants en limitent l'utilisation dans certaines applications. Le PS est couramment utilisé dans l'emballage, l'isolation et la fabrication d'objets quotidiens.

a. Les différents types de polystyrène

Le polystyrène se décline en plusieurs types, chacun présentant des propriétés spécifiques liées à son mode de fabrication et à sa composition. Ces différentes variantes offrent une large gamme d'applications, allant de l'emballage à la construction.

Polystyrène expansé (PSE)

- **Fabrication** : Les billes de polystyrène sont expansées à la vapeur d'eau, formant ainsi une structure alvéolaire.
- **Caractéristiques** : Léger, isolant thermique, facile à façonner.
- **Applications** : Emballages (barquettes, calages), isolation thermique (murs, toitures), maquettes, décoration.

Polystyrène extrudé (XPS)

- **Fabrication** : Les billes de polystyrène sont extrudées sous haute pression, créant un matériau dense et à cellules fermées.
- **Caractéristiques** : Rigide, étanche, excellent isolant thermique, résistant à l'humidité.

- **Applications** : Isolation des sols, des fondations, des toitures, des planchers chauffants, revêtements de façades.

Polystyrène haute densité (HIPS)

- **Fabrication** : Obtenu par polymérisation en masse ou en suspension.
- **Caractéristiques** : Plus rigide et résistant que le PS standard, peut être coloré.
- **Applications** : Boîtiers d'appareils électriques, jouets, articles de bureau, pièces automobiles.

b. Les critères de choix

Le choix du type de polystyrène dépendra des propriétés recherchées pour une application donnée :

- **Isolation thermique** : Le PSE et l'XPS sont particulièrement adaptés.
- **Rigidité et résistance** : Le HIPS est plus adapté.
- **Étanchéité** : L'XPS offre une meilleure étanchéité à l'eau.
- **Facilité de mise en œuvre** : Le PSE est plus facile à façonner.

c. Domaine d'application

Le **polystyrène** présente une large gamme d'applications industrielles et domestiques en raison de ses propriétés spécifiques :

- **Isolation thermique** : panneaux isolants pour bâtiments, équipements frigorifiques.
- **Emballage** : protection de produits fragiles, contenants alimentaires.
- **Construction** : éléments de construction légers, coffrages isolants.
- **Industrie** : pièces moulées, composants électroniques.
- **Autres** : loisirs (maquettes, flotteurs), médical (matériel de laboratoire), militaire (composant de certaines armes).

Les différentes formes de polystyrène (PS cristal, PS choc, PSE) offrent des propriétés adaptées à chaque application.

4.3.2. Papier Kraft

Le papier kraft est tiré du mot allemand « kraft », qui signifie littéralement « force » dû à sa résistance et à sa durabilité. Le papier kraft s'utilisait initialement pour des applications industrielles et

d'emballages grâce à sa résistance, de sa durabilité et de sa capacité à résister à l'humidité. Au fil des années, le papier kraft s'est amélioré et s'est diversifié. Il est reconnaissable à sa couleur brune (voir figure 63) signifiant qu'il n'a pas été traité comme peut l'être un papier normal. Le bois est la matière première essentielle qui permet de fabriquer les sacs papier kraft. En effet, ces fibres de bois sont blanchies et traitées afin de produire une pâte à papier. Ensuite, cette pâte se presse et sèche avant de s'enrouler en bobines pour créer par la suite des feuilles de papier kraft, le papier kraft possède de multiples usages dans le monde de l'impression grâce à sa texture, sa couleur et sa résistance. [11]



Figure 63 _ papier Kraft

4.4 matériels utilisés

Le matériel est un ensemble d'outils, d'instruments ou de machines utilisés pour une activité spécifique (voir figure 64). Et sont nommés selon leur domaine d'utilisation, par exemple un matériel électronique, c'est tout le matériel qu'on utilise en électronique tels que le fer à souder, loupe ... etc.

4.4.1. Colle

La colle est une substance liquide, visqueuse ou pâteuse. Elle permet de fixer des objets, des surfaces ou des matériaux ensemble. On retrouve 3 types de colles : végétale, animale et synthétique. Aujourd'hui, les colles synthétiques sont plus pratiques et efficaces.



Figure 64 matériel utilisé

a. Colle blanche

Les colles vinyliques sont des colles visqueuses blanches destinées à coller le bois et tous ses dérivés, comme le liège ; elles peuvent aussi servir à réunir des matériaux tels que le papier, le carton, le tissu et le verre, et aussi à la fabrication de porcelaine froide. Pour des questions de séchage, une des deux surfaces doit être absorbante, par exemple bois sur verre mais pas verre sur verre. Par ailleurs.

b. Colle à papiers peints

La colle à papier peint ou pâte à papier peint est une colle spécifique, à base d'amidon modifié, de méthylcellulose ou d'argile, qui est utilisée pour fixer le papier peint aux murs. Ces propriétés sont nécessaires pour ralentir la pénétration de l'adhésif dans le papier et le mur, et donner une vitesse de collage lente qui donne au poseur de papier peint le temps d'aligner correctement le papier peint sur le mur. L'adhésif est généralement vendu dans des sachets ou des boîtes sous forme de flocons qui sont mélangés à de l'eau pour produire la pâte. Il est également disponible prêt à l'emploi dans des pots.

CHAPITRE IV Conception et Réalisation mécanique

4.4.2. Matériel de mesure

Le matériel de mesure est tout outil ou instrument qui nous permet de mesurer une distance ou un angle ou autre.

a. Règles

Une règle est un instrument de mesure, est généralement en métal, en plexiglas ou en matériel composite souple (règles Superflex). Elle peut être graduée ou non. Les règles modernes comprennent généralement une échelle, avec laquelle des longueurs peuvent être mesurées par comparaison, généralement au millimètre près.

b. Mètre

Les mètres rubans, appelés encore « galons à mesurer » ou « mètre », ils servent à mesurer des distances allant de 1 à 10 mètres, sont constitués d'un ruban d'acier graduée qui s'enroule automatiquement dans un boîtier en plastique ou en métal grâce à un ressort interne. Le ruban d'acier qui les constitue est incurvée, ce qui les rend rigides une fois déroulés, les plus robustes peuvent être utilisés verticalement jusqu'à plusieurs mètres sans support.

4.4.3. Matériel de découpage

Le matériel de découpage est tout outil ou instrument qui nous permet de découper ou de limer un matériau. En d'autres termes c'est tout outils avec quoi on peut enlever ou cisailer une matière.

a. Cutter

Le cutter est un outil de coupe manuel, généralement composé d'un manche et d'une lame rétractable. Cette lame, extrêmement tranchante, est conçue pour couper une grande variété de matériaux, du papier au carton en passant par certains plastiques.

Domaines d'utilisations :

- **Bureautique** : Pour ouvrir des colis, couper du papier, du carton ou des films plastiques.
- **Bricolage** : Pour découper des matériaux légers comme le contreplaqué, le plastique ou le linoléum.
- **Artisanat** : Pour réaliser des travaux de précision comme la découpe de papier, de tissus ou de matériaux plus rigides.
- **Industriel** : Pour l'emballage, le déballage et d'autres tâches nécessitant une coupe précise.

b. Ciseaux

Un ciseau est un outil composé de deux lames tranchantes, articulées à une extrémité, permettant de couper différents matériaux. Ces lames peuvent être droites, courbes ou pointues, adaptées à des usages spécifiques.

c. Mini meuleuse

Une mini-meuleuse est un outil électrique rotatif de petite taille, équipé d'un arbre flexible sur lequel on vient fixer différents accessoires abrasifs (meules, brosses, etc.). Elle est utilisée pour effectuer des travaux de meulage, de polissage, de perçage, de découpe et de gravure sur une grande variété de matériaux comme le métal, le bois, le plastique ou encore la céramique.

Domaines d'utilisations : La mini-meuleuse est un outil très polyvalent qui trouve ses applications dans de nombreux domaines :

- **Bricolage :** Affûter des outils, enlever de la rouille, poncer des surfaces, graver des motifs.
- **Modélisme :** Créer des formes complexes, affiner des pièces.
- **Bijouterie :** Découper des métaux précieux, polir des pierres.
- **Réparation :** Enlever de la peinture, nettoyer des soudures.

Les avantages de la mini-meuleuse : Polyvalence : Grâce à la multitude d'accessoires disponibles, elle permet de réaliser de nombreuses opérations.

Précision : Elle offre une grande précision pour les travaux délicats.

Accessibilité : Sa petite taille lui permet d'atteindre des endroits difficiles d'accès.

Maniabilité : Elle est facile à utiliser et à manipuler.

d. Fil résistif chaud

Le fil de coupe en styromousse est ce que l'on appelle un fil résistif chauffant. Fabriqué en alliage à base de nickel, de préférence en alliage nickel-chrome-cuivre, le fil de coupe pour polystyrène possède des propriétés spéciales. Ce sont en particulier une bonne résistance à la corrosion et, pour le fil de coupe pour le coupeur de styromousse indispensable, la résistance à haute température. Cela est nécessaire car le fil de coupe doit chauffer suffisamment haut. Parce que le point de fusion du polystyrène se situe dans la plage de température d'environ 180 ° C. Ce n'est que lorsque le fil de la fraise en polystyrène atteint cette température élevée que le bord de coupe est propre et, surtout, lisse.

Vu que cela ne coûte pas cher et c'est un outil indispensable alors il est fortement recommandé de fabriquer un comme le montre la figure 65.

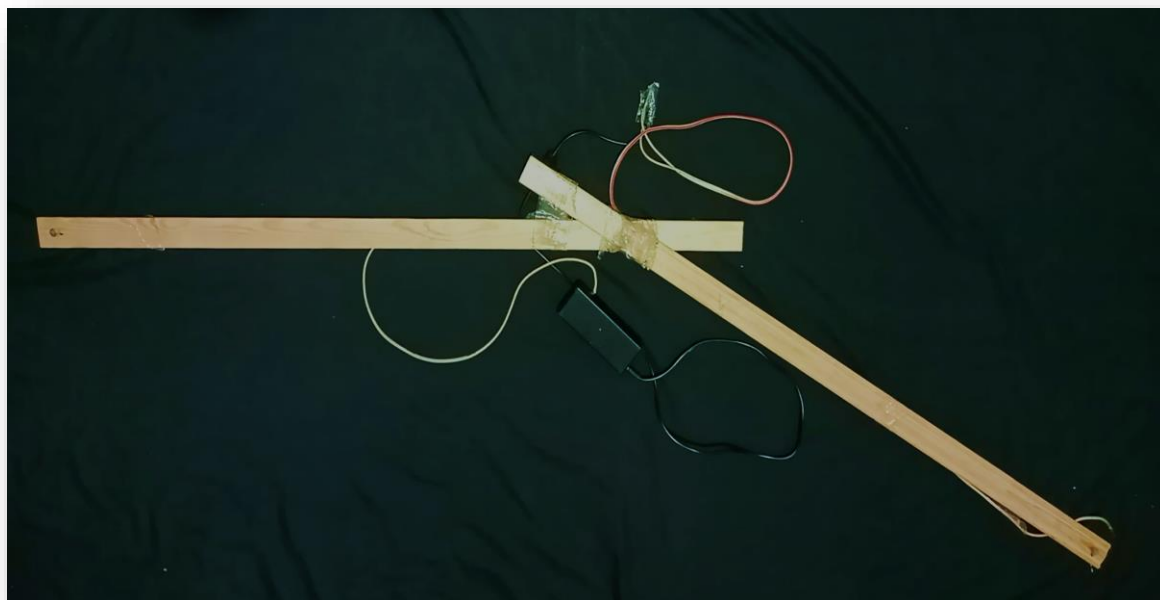


Figure 65 Notre propre appareil au fil résistif chaud

1. Fabrication

Matériels utilisés :

- 2 tasseaux de bois
- 2 boulons (vis + écrou)
- 6 rondelles pour boulon
- 2 petits crochets à visser F et G en acier inoxydable ou laiton
- 1.5 mètres de fil de pêche H en acier inoxydable (fil de résistance)
- 1 bornier domino I que vous aurez "dénudé"
- 3 mètres de fil électrique
- 1 transformateur électronique ou ferromagnétique
- 1 câble avec prise secteur 220V 2 pôles plus terre

Montage :

Avec ce plan, réalisez rapidement un archet à fil chaud élémentaire qui pourra être branché sur un transformateur "électronique" pour lampe halogène basse tension 12V 60VA. Le réglage de la

température du fil se fera en réglant la longueur effective du fil résistif à l'aide d'un contact coulissant [12].

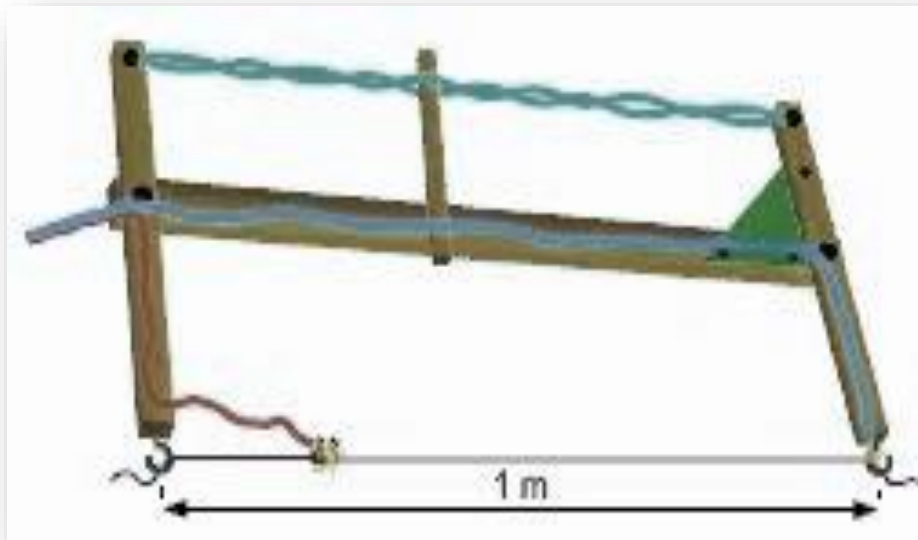


Figure 66 Schéma de montage du fil résistive [12]

2. Calcule de chaleur

Rêve de pierre : Est un site web dédié au partage de connaissances et de techniques de bricolage ce site nous donne l'opportunité de choisir ou de régler nos instruments pour atteindre la chaleur exacte pour chaque type de polystyrène tout en introduisant les paramètres tels que, le diamètre et le matériau du fil, sa longueur et même le type de polystyrène à découper (voir la figure 67).

4.5. Techniques utilisées

La technique est un ensemble d'actions, de règles ou de principes utilisés pour atteindre un résultat spécifique. Par exemple, la technique de la peinture à l'huile, la technique de la programmation informatique, Découpage

Gabarit : le gabarit est un morceau de carton ou de papier dur ou même d'une plaque fine de bois (Balza ou contre-plaqué) qu'on découpe sous une forme souhaitée, elle nous sert d'un moule, comme on le voit dans la figure 68. Dans notre cas le gabarit est la forme d'aile imprimé puis collé sur un morceau de papier cartonné ensuite découpé pour avoir la forme exacte de l'aile, on l'habille avec un scotch en aluminium pour qui ne se brûle pas au contact avec le fil chaud.

1 - Choisissez votre fil résistif...

Diamètre du fil résistif (mm) :

Type de fil résistif :

Alliage : (corde à piano) Cr18 Ni8 Ca0.15 Fe
Résistivité : 0.6 Ohms.mm²/m
Coefficient de température : 0.0002 Ohms/°c

Température cible du fil :

Découpe Polystyrène moyenne densité

Longueur effective du fil L (cm) :

2 - Lancez le Calcul...

3 - Découvrez le Résultat...

Fil résistif Dia. 0.8mm, longueur 150cm, alliage Acier Inox , température 300°C.

Résistance du fil à chaud : **1.96 Ohms**

Courant de chauffe IF injecté dans le fil : **10.38 A**

Tension nécessaire UF aux extrémités du fil : **20.33 V**

Puissance injectée dans le fil : **211.1 W**



Figure 67 calcule de résistance et de courant nécessaire pour le découpage [12]



Figure 68 Les Gabarits utilisés

4.5.1. Habillage

L'habillage d'un avion, c'est bien plus qu'un simple choix esthétique. C'est une véritable enveloppe qui protège la structure de l'appareil, lui confère une identité visuelle forte et optimise ses performances aérodynamiques.

a. Les différentes formes d'habillage

- **Peinture** : La méthode la plus traditionnelle, qui consiste à appliquer plusieurs couches de peinture sur la carrosserie de l'avion. Elle offre une large palette de couleurs et permet des finitions personnalisées.
- **Revêtement adhésif** : De plus en plus utilisé, ce procédé consiste à appliquer des films vinyliques autocollants sur la surface de l'avion. Il offre une grande flexibilité en termes de motifs et de couleurs, et peut être retiré plus facilement que la peinture.
- **Composite** : Pour certaines parties de l'avion, comme le nez ou les ailerons, des matériaux composites peuvent être utilisés pour l'habillage. Ces matériaux offrent une grande résistance aux chocs et aux intempéries.

b. Les fonctions de l'habillage

- **Protection** : L'habillage protège la structure de l'avion des agressions extérieures telles que les rayons UV, la pluie, la grêle et les chocs.
- **Isolation** : Il contribue à isoler l'habitacle des variations de température extérieure.
- **Aérodynamisme** : L'habillage est conçu pour optimiser les performances aérodynamiques de l'avion en réduisant la traînée.
- **Identification** : Chaque compagnie aérienne a sa propre identité visuelle, qui est retranscrite sur l'habillage de ses avions. Cela permet de les identifier de loin.
- **Publicité** : L'habillage peut être utilisé comme support publicitaire pour les entreprises qui souhaitent promouvoir leur marque.

Dans notre cas on a habillé notre drone avec du papier Kraft collé avec un mélange de colle blanche et de la colle en poudre ce qui nous donne une couche de protection assez dure et légère.

4.6. Aile

4.6.1. Conception

Pour la conception d'aile sur SW (SolidWorks) on doit importer les coordonnées (x, y, z) du profile d'aile NACA 4415 générer par le site web AirFoil Tools. Une courbe du profile est dessiner on qu'a extrudé avec une longueur de 1,20m, ensuite on va posséder à enlèvement de matière pour l'emplacement des ailerons et on obtient la forme illustrer dans les figures 69 et70 .

| X | Y | Z |
|------------|-----------|---|
| 190.000000 | 0.000000 | 0 |
| 189.796700 | 0.074100 | 0 |
| 189.186800 | 0.296400 | 0 |
| 188.174100 | 0.663100 | 0 |
| 186.762400 | 1.159000 | 0 |
| 184.959300 | 1.770800 | 0 |
| 182.768600 | 2.475700 | 0 |
| 180.203600 | 3.260400 | 0 |
| 177.271900 | 4.115400 | 0 |
| 173.988700 | 5.038800 | 0 |
| 170.369200 | 6.024900 | 0 |
| 166.424800 | 7.062300 | 0 |
| 162.174500 | 8.137700 | 0 |
| 157.637300 | 9.239700 | 0 |
| 152.832200 | 10.360700 | 0 |
| 147.780100 | 11.491200 | 0 |
| 142.500000 | 12.619800 | 0 |
| 137.016600 | 13.731300 | 0 |
| 131.354600 | 14.810500 | 0 |
| 125.536800 | 15.847900 | 0 |
| 119.587900 | 16.830200 | 0 |
| 113.534500 | 17.747900 | 0 |
| 107.399400 | 18.591500 | 0 |
| 101.213000 | 19.351500 | 0 |
| 95.000000 | 20.022200 | 0 |
| 88.787000 | 20.590300 | 0 |
| 82.600600 | 21.044400 | 0 |
| 76.465500 | 21.371200 | 0 |
| 70.412100 | 21.555500 | 0 |
| 64.463200 | 21.585900 | 0 |
| 58.645400 | 21.458600 | 0 |
| 52.983400 | 21.167900 | 0 |
| 47.500000 | 20.715700 | 0 |
| 42.219900 | 20.109600 | 0 |
| 37.167800 | 19.361000 | 0 |
| 32.362700 | 18.479400 | 0 |
| 27.825500 | 17.470500 | 0 |
| 23.575200 | 16.353300 | 0 |

CHAPITRE IV Conception et Réalisation mécanique

| | | |
|------------|-----------|---|
| 19.630800 | 15.143000 | 0 |
| 16.011300 | 13.837700 | 0 |
| 12.728100 | 12.427900 | 0 |
| 9.796400 | 10.930700 | 0 |
| 7.231400 | 9.380300 | 0 |
| 5.040700 | 7.824200 | 0 |
| 3.237600 | 6.275700 | 0 |
| 1.825900 | 4.729100 | 0 |
| 0.813200 | 3.142600 | 0 |
| 0.203300 | 1.567500 | 0 |
| 0.000000 | 0.142500 | 0 |
| 0.203300 | -1.075400 | 0 |
| 0.813200 | -2.093800 | 0 |
| 1.825900 | -3.021000 | 0 |
| 3.237600 | -3.915900 | 0 |
| 5.040700 | -4.753800 | 0 |
| 7.231400 | -5.538500 | 0 |
| 9.796400 | -6.233900 | 0 |
| 12.728100 | -6.805800 | 0 |
| 16.011300 | -7.252300 | 0 |
| 19.630800 | -7.582900 | 0 |
| 23.575200 | -7.801400 | 0 |
| 27.825500 | -7.915400 | 0 |
| 32.362700 | -7.936300 | 0 |
| 37.167800 | -7.879300 | 0 |
| 42.219900 | -7.748200 | 0 |
| 47.500000 | -7.550600 | 0 |
| 52.983400 | -7.305500 | 0 |
| 58.645400 | -7.030000 | 0 |
| 64.463200 | -6.739300 | 0 |
| 70.412100 | -6.441000 | 0 |
| 76.465500 | -6.135100 | 0 |
| 82.600600 | -5.819700 | 0 |
| 88.787000 | -5.492900 | 0 |
| 95.000000 | -5.154700 | 0 |
| 101.213000 | -4.805100 | 0 |
| 107.399400 | -4.446000 | 0 |
| 113.534500 | -4.083100 | 0 |
| 119.587900 | -3.720200 | 0 |
| 125.536800 | -3.366800 | 0 |
| 131.354600 | -3.032400 | 0 |
| 137.016600 | -2.717000 | 0 |
| 142.500000 | -2.426300 | 0 |
| 147.780100 | -2.158400 | 0 |
| 152.832200 | -1.911400 | 0 |
| 157.637300 | -1.683400 | 0 |
| 162.174500 | -1.472500 | 0 |
| 166.424800 | -1.280600 | 0 |
| 170.369200 | -1.107700 | 0 |
| 173.988700 | -0.953800 | 0 |

CHAPITRE IV Conception et Réalisation mécanique

| | | |
|------------|-----------|---|
| 177.271900 | -0.818900 | 0 |
| 180.203600 | -0.691600 | 0 |
| 182.768600 | -0.564300 | 0 |
| 184.959300 | -0.431300 | 0 |
| 186.762400 | -0.296400 | 0 |
| 188.174100 | -0.174800 | 0 |
| 189.186800 | -0.079800 | 0 |
| 189.796700 | -0.020900 | 0 |
| 190.000000 | 0.000000 | 0 |

Tableau 2 coordonnées x,y,z du profile d'aile NACA 4515

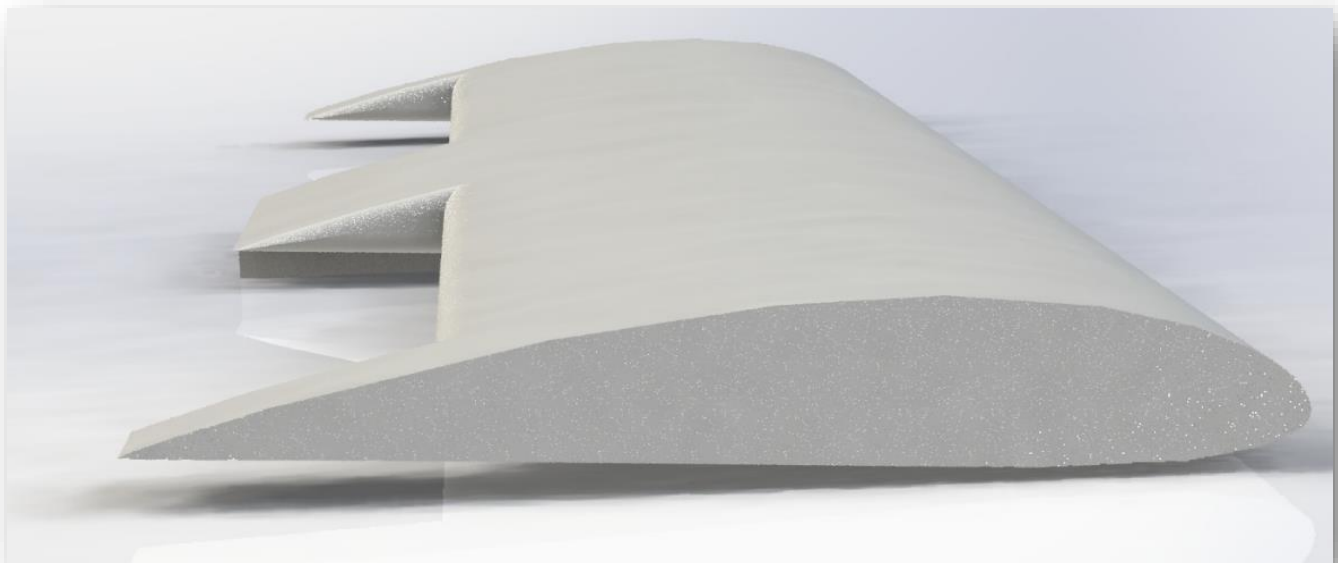


Figure 69 conception d'aile vue de profile



Figure 70 conception d'aile

4.6.2. Réalisation

Après avoir coupé un morceau de polyester de 1.20m de longueur, 0.19m de largeur et de 0.03m de hauteur, on fixe les gabarits sur les deux extrémités, ensuite on fait passer le fil chaud sur les gabarits pour obtenir un profil similaire tout au long de la surface. Et comme on peut aussi faire passer un petit coup de papier verre afin d'obtenir une surface lisse et unifiée. (voir figure 71).



Figure 71 le profil d'aile lors de la réalisation

Une fois le profile est dessiner, on délimite la surface des ailerons pour les couper à l'aide d'un cutter. Au final on arrondit toutes les extrémités avec un papier verre. (voir figure 72).

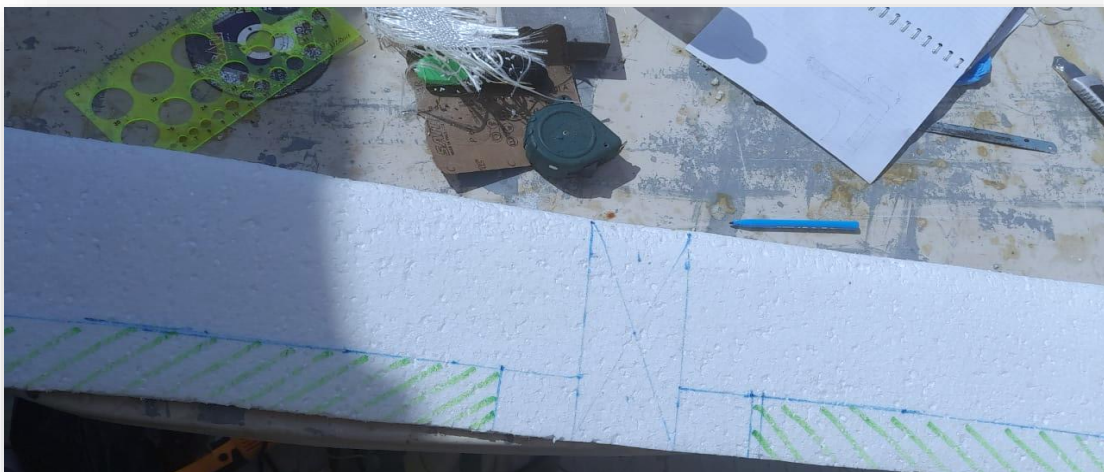


Figure 72 délimitation des ailerons lors de la réalisation

La longueur d'aile, et la fragilité de polyester nous pousse à renforcer sa structure en ajoutant une barre d'acier dure de 10g. (voir figure 73).



Figure 73 le renforcement de l'aile

Une fois que tout est fini on passe maintenant à l'habillage en la couvrant avec du papier Kraft et de mélange de colle. (voir figure 74).

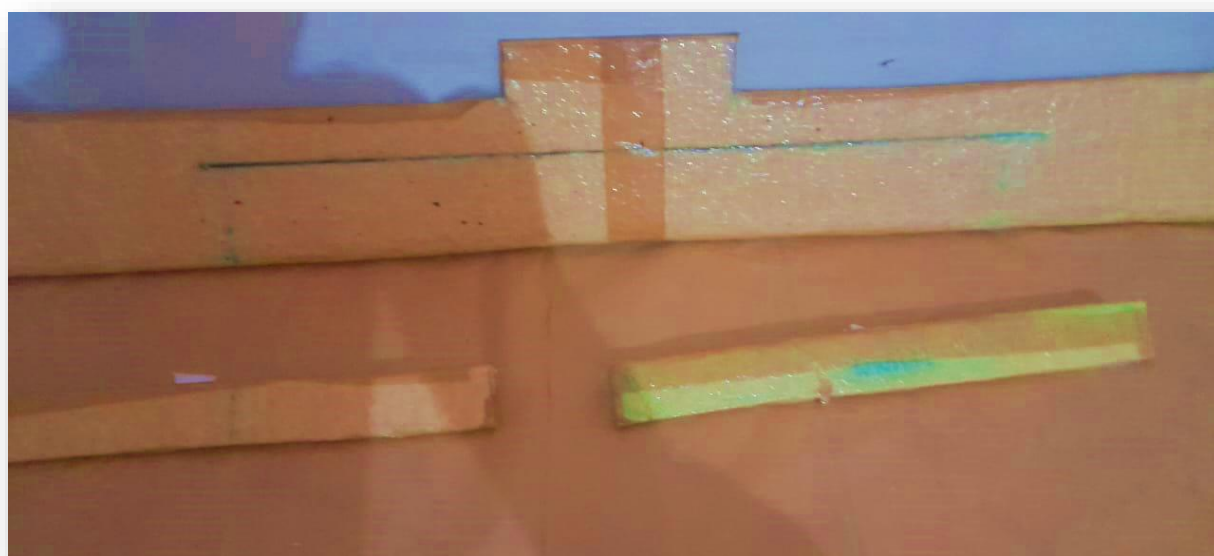


Figure 74 l'état final de l'aile

4.7. Fuselage

Le fuselage d'un drone à voilure fixe est bien plus qu'une simple carcasse. C'est un élément clé de la conception aérodynamique de l'appareil. Sa forme, sa section et sa distribution de masse influencent directement les performances en vol, telles que la vitesse, l'autonomie et la stabilité.

4.7.1. Conception

Après avoir dimensionner le fuselage on doit d'abord la dessiner en 3D sur SW comme le montre les figures 75 et 76.

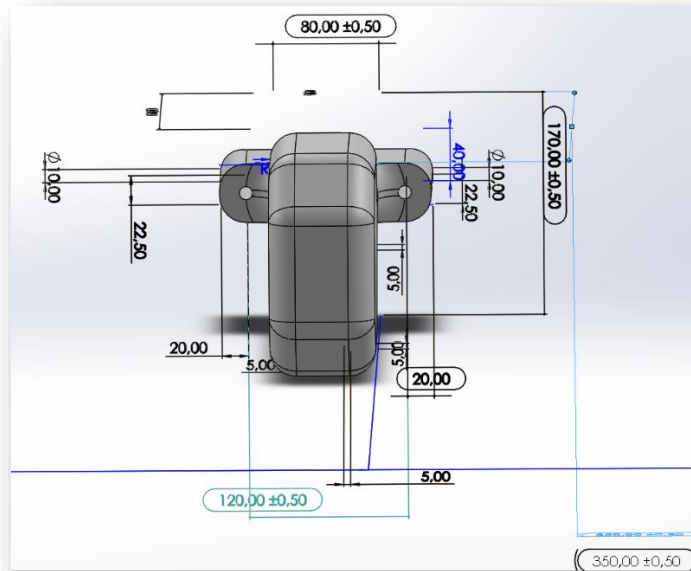


Figure 75 dimensions du fuselage

SW avec ses fonctionnalités qui nous permet de spécifier le matériau qu'on utilise afin de faire des études dynamiques ou d'autres, el aussi SW View 360 une extension qui nous permet de photographier notre modèle.

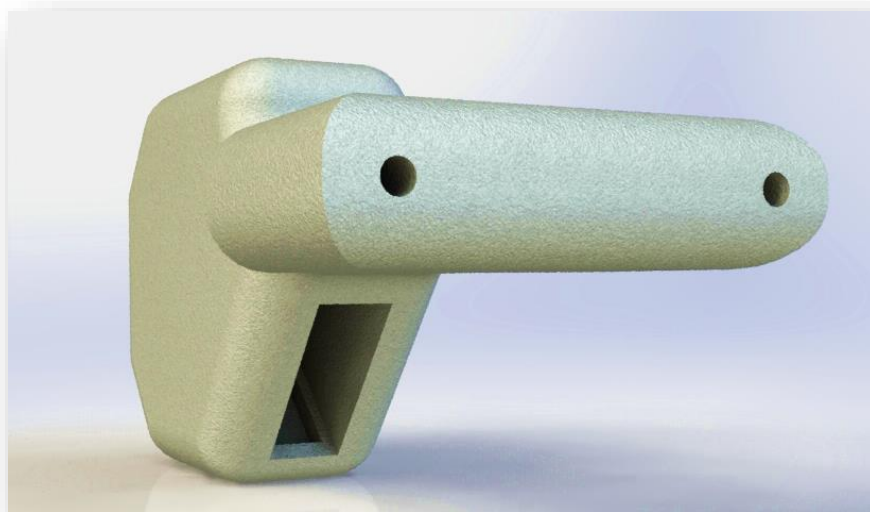


Figure 76 conception du fuselage (vu de derrière)

4.7.2. Réalisation

Pour réaliser un bon fuselage il suffit seulement de prendre un morceau de polystyrène avec des dimensions supérieures aux dimensions souhaité, on dessine avec un feutre un schéma approximatif du fuselage conçu, à l'aide d'une scie ou d'un cutter commence à couper les coins pour donner forme à notre structure, une fois la forme générale est traitée, on peut lisser la surface a l'aide d'un papier verre, ou même d'un fer à souder.

Une fois que le fuselage a pris forme on a qu'à l'habiller avec une couche de colle blanche pour l'endurcir, ensuite une couche de papier Kraft et du mélange de colle. (voir figure 77)



Figure 77 Fuselage

4.8. Élévateur et Gouverne de direction

L'élévateur est une surface mobile située à l'arrière de l'aile d'un drone à voilure fixe. Il joue un rôle crucial dans le contrôle de l'assiette de l'appareil, c'est-à-dire son inclinaison vers le haut ou vers le bas. (voir figure 78).

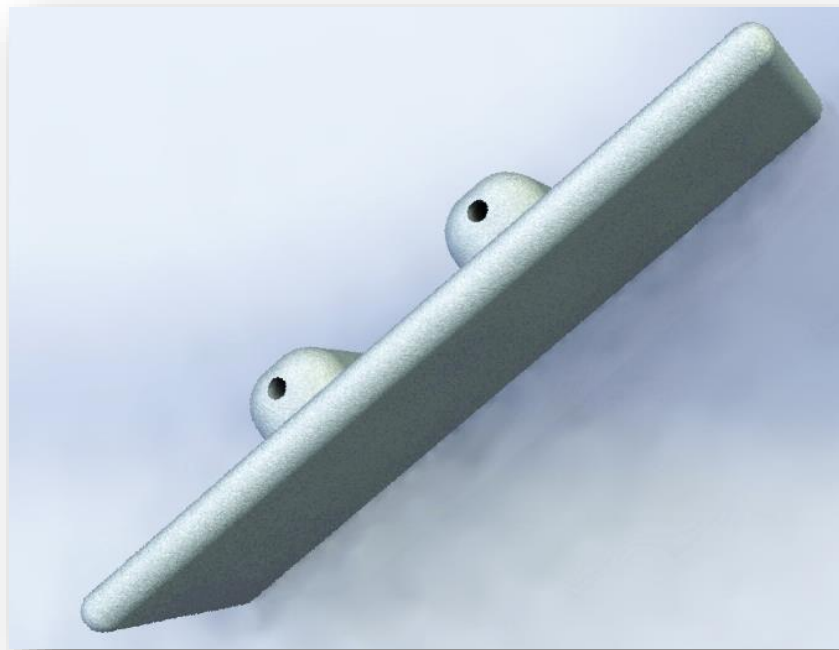


Figure 78 Elévateur

La dérive joue un rôle essentiel dans le contrôle de l'appareil. Il s'agit d'une surface verticale située à l'arrière de l'avion, souvent reliée au stabilisateur horizontal (élevateur). (voir figure 79).

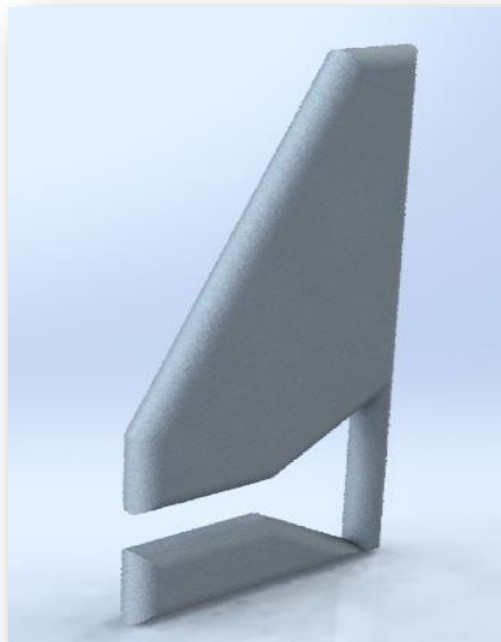


Figure 79 gouverne de direction

4.9. Manette

La manette d'un drone à voilure fixe est bien plus qu'un simple outil de contrôle. C'est l'interface entre le pilote et son engin volant, lui permettant de donner vie à ses commandes et de piloter son drone avec précision.

4.9.1. Conception

Pour concevoir une manette cela ne demande pas un grand savoir, cela n'importe quelle boîte qui pourra héberger tout le circuit électronique sera parfaite, on a qu'à faire sortir l'antenne du boîtier cela permet à la radio de fonctionner avec un maximum de ses capacités. (voir figure 80 et 81).

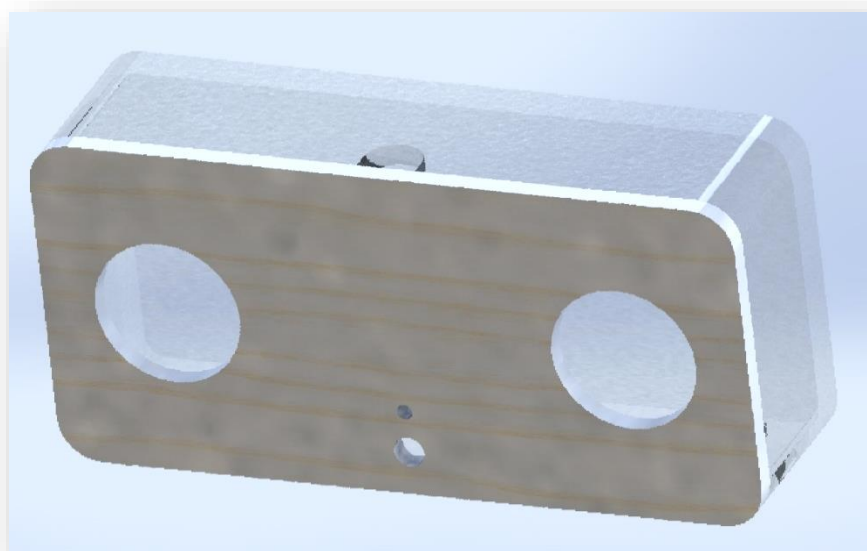


Figure 80 modèle 3D de la manette vue de face

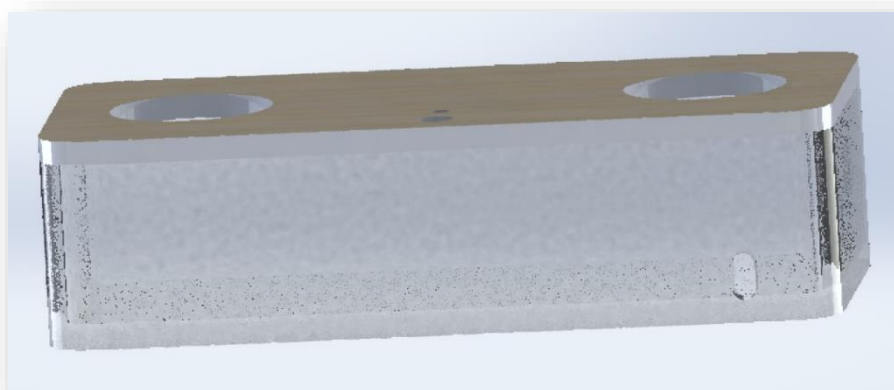


Figure 81 modèle 3D de la manette

4.9.2. Réalisation

Pour rendre la réalisation plus originaire on a opté à fabriquer notre propre boîtier, qui se compose d'un boîtier en Plexiglas, sa transparence nous permet de voir le branchement du circuit, et un couverct en bois d'une épaisseur de 5mm, cela nous permet de visser les composants tels que le joystick sur la surface. (voir figure 82 et 83)



Figure 82 Radio commande vu de face

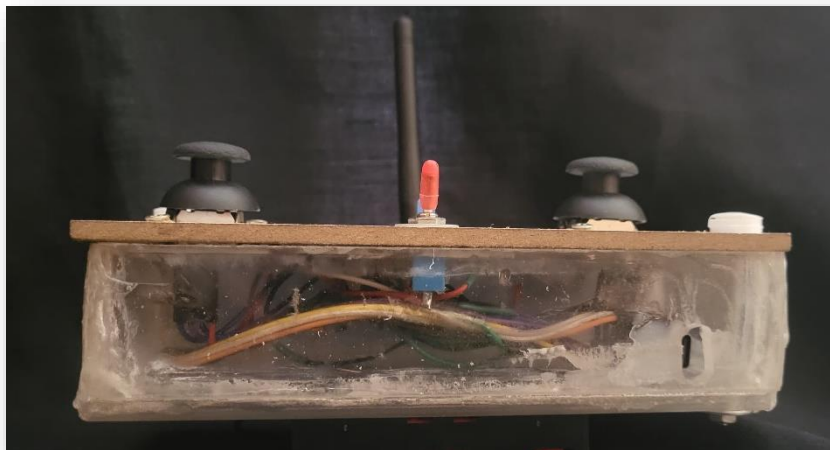


Figure 83 Radio commande

4.10. Assemblage finale

Comme dernière retouche on va assembler les parties, comme on l'avait prévu dans la conception. Pour cela on va juste poser les pièces comme un puzzle et les faire coller avec de la colle blanche, et la faire peser pour avoir un poids approximatif afin de dimensionner et de choisir les moteurs.

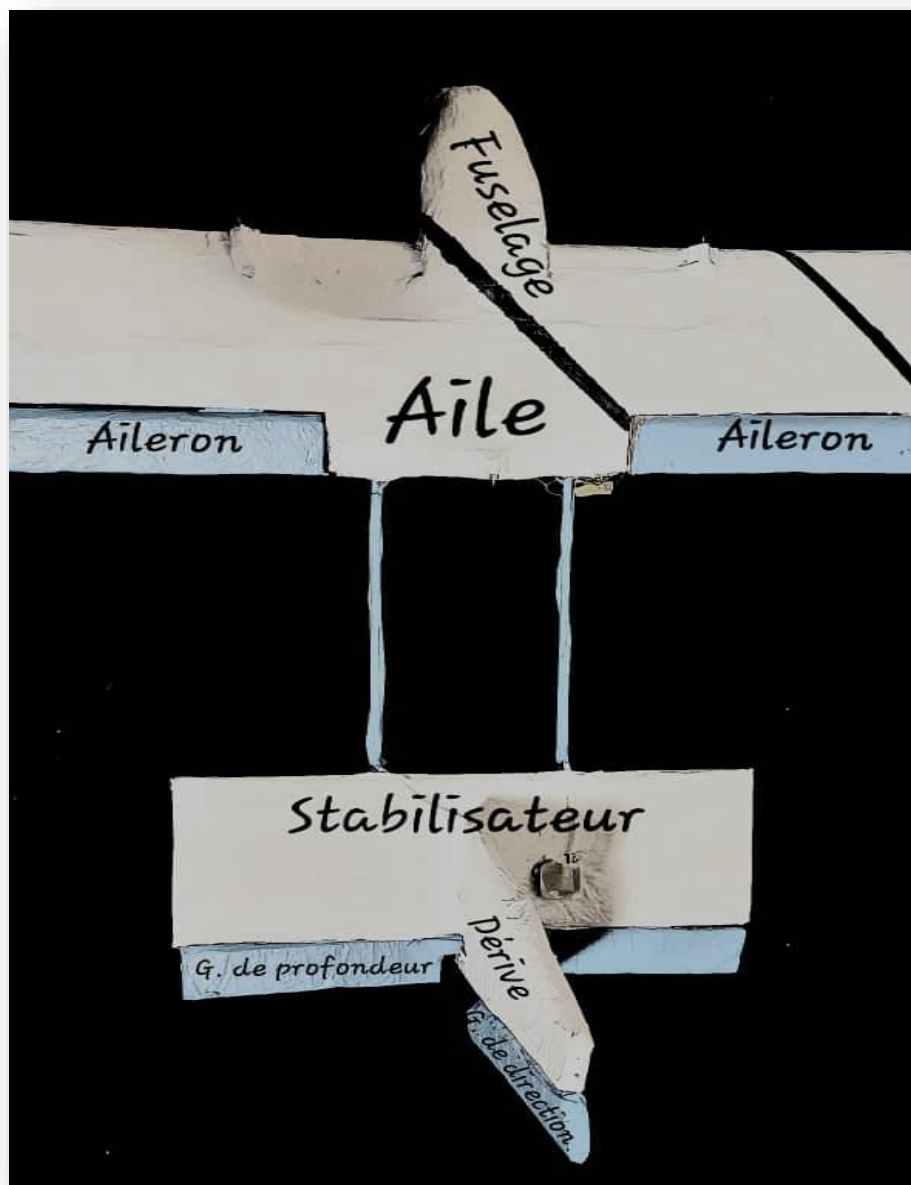


Figure 84 Assemblage finale du drone

Une fois que le drone est assemblé, les Servos moteurs sont collés on va remettre une couche de papier Kraft et de colle, ce qui va nous permettre de renforcer notre drone et de d'avoir une structure homogène et lisse.

Une fois que tout est fini on crée un mécanisme pour que les Servos puisse gérer la rotation des ailerons et des gouvernes comme le montre la Figure_84



Figure 85 Mécanisme d'aileron gauche

On passe maintenant à l'esthétique. L'esthétique d'un drone est le résultat d'une combinaison complexe de facteurs techniques, culturels et esthétiques.

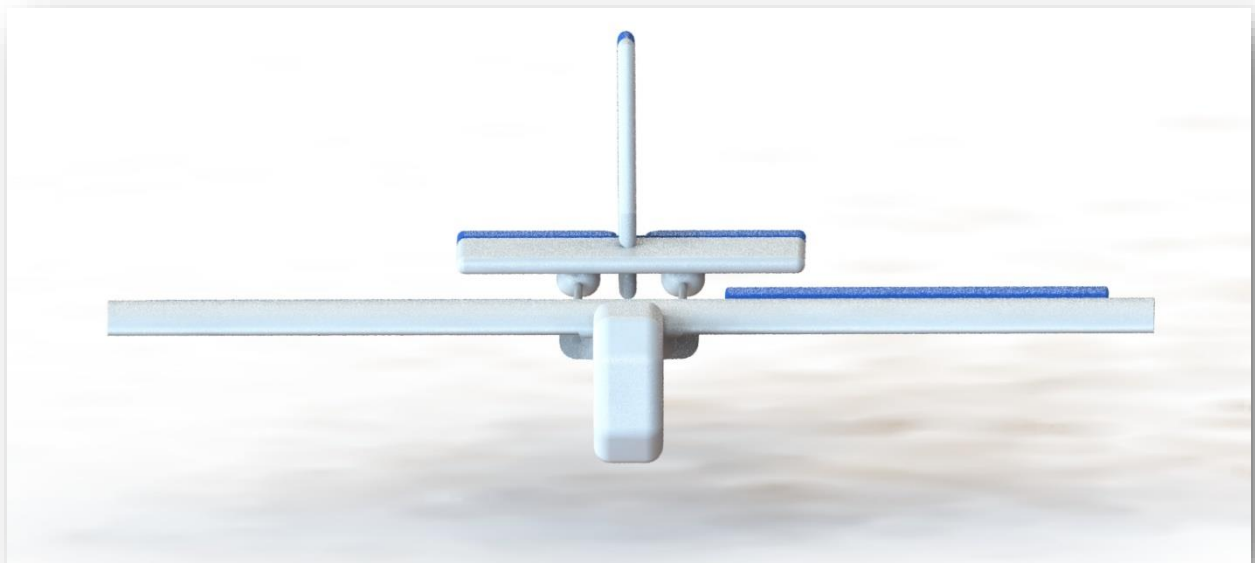


Figure 86 drone vue de face

Enfin on passe à la dernière manœuvre qui est l'équilibrage. L'équilibrage d'un drone à voilure fixe est une étape cruciale dans sa construction et sa mise en œuvre. Il s'agit de répartir de manière homogène le poids de tous les composants du drone afin d'assurer un vol stable et contrôlable. Et cela en ajoutant des petites masses de plomb dans la partie manquante afin d'avoir une masse totale équilibrer. Et c'est là où on peut donner le poids exact de notre drone.



Figure 87 état finale du drone

4.11. Conclusion

Les choix techniques effectués lors de la phase de conception et réalisation mécanique ont été choisis par exigences de performance et de fiabilité du drone. L'utilisation du polyester protégé avec une couche de papier et de colle a permis d'obtenir une structure légère et résistante. La géométrie de l'aile et des gouvernes ont été optimisées pour améliorer la stabilité en vol. Les prochaines étapes porteront sur la sélection et l'intégration des composants électroniques, qui assureront la gestion de l'alimentation, la communication sans fil et le contrôle des moteurs.

CHAPITRE 5
Instrumentation -
Conception et
réalisation de la partie
électronique

5. Instrumentation- Conception et réalisation de la partie électronique

5.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons explorer les différents composants électroniques qui confèrent au drone ses capacités de vol et à la radiocommande ses fonctions de pilotage. Nous verrons comment les microcontrôleurs, les capteurs, les actionneurs et les modules de communication interagissent pour permettre au drone d'effectuer des mouvements complexes et de répondre aux sollicitations du pilote.

5.2. Arduino

Arduino est une plate-forme électronique open source basée sur du matériel et des logiciels faciles à utiliser. Les cartes Arduino sont capables de lire des entrées (lumière sur un capteur, doigt sur un bouton ou message Twitter) et de les transformer en sortie (activation d'un moteur, allumage d'une LED, publication en ligne). Vous pouvez indiquer à votre carte ce qu'elle doit faire en envoyant un ensemble d'instructions au microcontrôleur de la carte. Pour ce faire, vous utilisez le langage de programmation Arduino et le logiciel Arduino (IDE), basé sur Processing [13].

Au fil des années, Arduino a été le cerveau de milliers de projets, des objets du quotidien aux instruments scientifiques complexes. Une communauté mondiale de créateurs - étudiants, amateurs, artistes, programmeurs et professionnels - s'est rassemblée autour de cette plateforme open source, leurs contributions ont permis d'obtenir une quantité incroyable de connaissances accessibles qui peuvent être d'une grande aide pour les novices comme pour les experts [13].

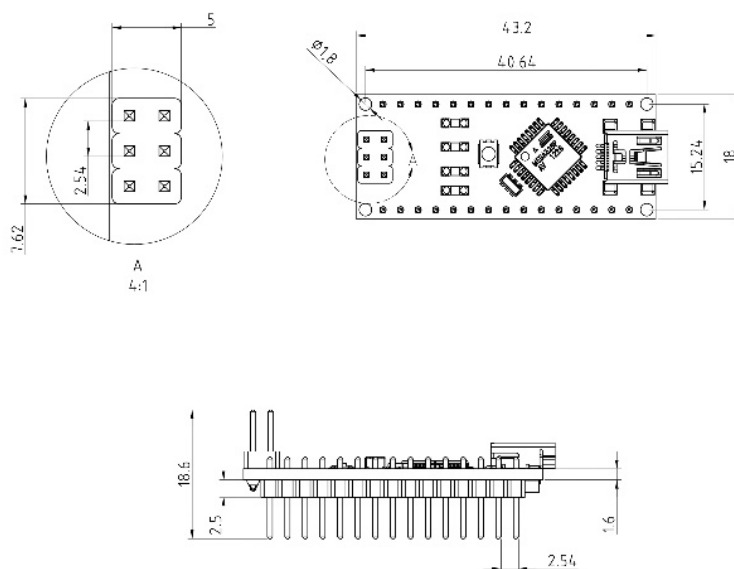
Arduino est né à l'Ivrea Interaction Design Institute comme un outil simple pour le prototypage rapide, destiné aux étudiants sans formation en électronique et en programmation. Dès qu'elle a atteint une communauté plus large, la carte Arduino a commencé à évoluer pour s'adapter aux nouveaux besoins et défis, différenciant son offre des simples cartes 8 bits aux produits pour les applications IoT, les wearables, l'impression 3D et les environnements embarqués [13].

5.2.1. L'Arduino Nano

L'Arduino Nano est une carte électronique de développement très populaire, appréciée pour sa petite taille et sa grande polyvalence. Elle est basée sur le microcontrôleur ATmega328, le même que celui utilisé sur l'Arduino Uno, mais dans un format beaucoup plus compact. La Nano est la plus petite carte Arduino avec des dimensions de seulement 45x18 mm et un poids inférieur à 5 g (voir figure 88). Son faible encombrement et son prix bas font, une carte particulièrement adaptée aux inventions

portables, à la robotique à faible coût et aux projets interactifs nécessitant une carte microcontrôleur petite et facile à utiliser [13].

ARDUINO
NANO
Size



2020/11/19

Figure 88 dimension d'une carte Arduino NANO [13]

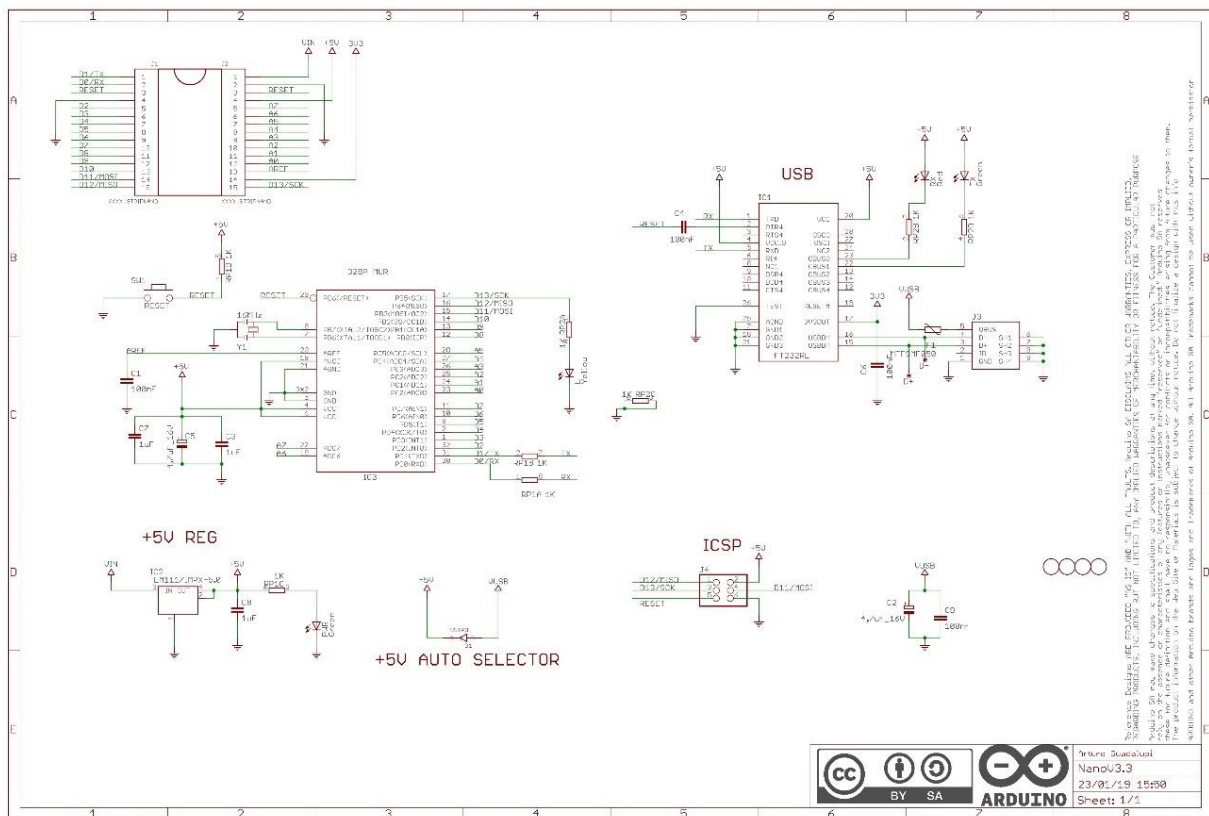
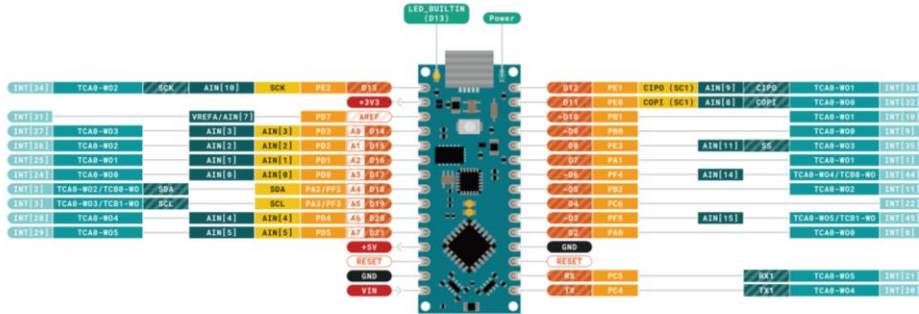


Figure 89 schéma électrique d'une Arduino NANO [13]

5.2.2. Arduino NANO Pin Out

Dans cette section, nous couvrirons le brochage de l'Arduino Nano, nous discuterons de la description des broches de chaque broche intégrée sur la carte. (voir figure 90).



| | | | | | |
|--------------|------------------------|---------------|---|--------------------------------|---|
| Ground | Digital Pin | Analog | <p> MAXIMUM current per pin 40mA, 20mA recommended</p> <p> MAXIMUM current 200mA for the entire package</p> <p> The total current of each port power group should not exceed 100mA</p> | VIN 7-21 V input to the board. | <p>NOTE: CPO/COPI have previously been referred to as MISG/MOSI</p> <p>ARDUINO.CC Last update: 15/12/2021</p> <p></p> <p><small>This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. To see a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/ or send a letter to Creative Commons, 505 15th Street, San Francisco, CA 94103, USA.</small></p> |
| Power | Analog Pin | Communication | | | |
| LED | Other Pin | Timer | | | |
| Internal Pin | Microcontroller's Port | Interrupt | | | |
| SMD Pin | Default | Sercom | | | |

Figure 90 Arduino Nano Pin Out [13]

Broches numériques : Il y a 14 broches numériques sur la carte qui sont utilisées pour connecter des composants externes.

Broches analogiques : 6 broches analogiques sur la carte utilisées pour mesurer la tension dans une plage de 0 à 5 V.

LED : L'unité est livrée avec une LED intégrée connectée à la broche 13 de la carte.

PWM : Technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux pseudo analogiques à l'aide de circuits numériques (tout ou rien, 1 ou 0), ou plus généralement à états discrets.

VIN : Il s'agit d'une tension d'entrée vers la carte Arduino lors de l'utilisation d'une source d'alimentation externe (6-12 V).

3,3 V : Il s'agit d'une tension minimale produite par le régulateur de tension sur la carte.

5V : Alimentation régulée utilisée pour alimenter le contrôleur et les autres composants de la carte.

AREF : Il s'agit d'une référence analogique qui est appliquée à l'unité comme tension de référence à partir d'une alimentation externe.

GND : Deux broches de terre sont disponibles sur la carte.

Réinitialisation : deux broches de réinitialisation sont intégrées sur la carte. Ces broches permettent de réinitialiser le contrôleur en interne via un logiciel.

Interruptions externes : les broches 2 et 3 sont utilisées pour déclencher des interruptions externes. Ces broches sont utilisées en cas d'urgence.

USART : La carte prend en charge la communication série USART qui transporte deux broches, à savoir Rx qui est utilisée pour recevoir les données série et Tx qui est une broche de transmission utilisée pour transmettre les données série.

I2C : L'unité est livrée avec un protocole de communication I2C où deux broches SDA et SCL sont utilisées pour prendre en charge cette communication. SDA est une ligne de données série qui transporte les données tandis que SCL est une ligne d'horloge série utilisée pour la synchronisation des données entre les appareils sur le bus I2C. La bibliothèque de câbles du logiciel Arduino est accessible pour utiliser le bus I2C.

SPI : L'appareil prend également en charge le protocole de communication SPI (interface périphérique série) où quatre broches (SS, MISO, MOSI, SCK) sont utilisées pour cette communication. Ce protocole est utilisé pour transférer des données entre le microcontrôleur et d'autres périphériques.

5.2.3. Arduino IDE

L'environnement de développement intégré Arduino - ou logiciel Arduino (IDE) - contient un éditeur de texte pour écrire du code, une zone de messages, une console de texte, une barre d'outils avec des boutons pour les fonctions courantes et une série de menus, comme le montre la figure 91. Il se connecte au matériel Arduino pour télécharger des programmes et communiquer avec eux [13].

Les programmes écrits à l'aide du logiciel Arduino (IDE) sont appelés **croquis**. Ces croquis sont écrits dans l'éditeur de texte et sont enregistrés avec l'extension de fichier.ino. L'éditeur dispose de fonctions de coupe/collage et de recherche/remplacement de texte. La zone de message fournit des informations lors de l'enregistrement et de l'exportation et affiche également les erreurs. La console affiche le texte généré par le logiciel Arduino (IDE), y compris les messages d'erreur complets et d'autres informations. Le coin inférieur droit de la fenêtre affiche la carte configurée et le port série.

Les boutons de la barre d'outils vous permettent de vérifier et de télécharger des programmes, de créer, d'ouvrir et d'enregistrer des croquis et d'ouvrir le moniteur série [13].

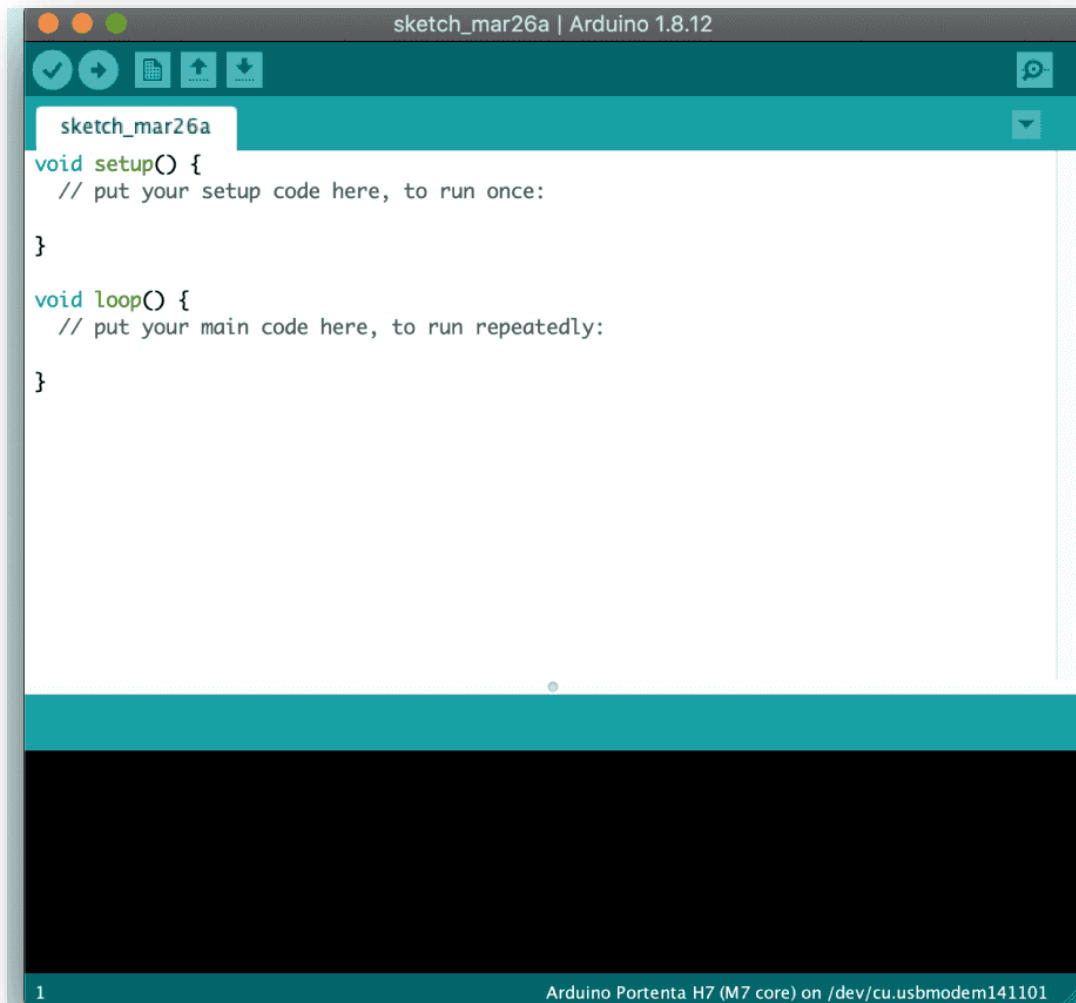


Figure 91 interface ARDUINO IDE [13]

5.3. La Batterie

Une batterie est un dispositif chimique qui stocke l'énergie électrique sous forme de produits chimiques et qui, au moyen d'une réaction électrochimique, convertit l'énergie chimique stockée en énergie électrique à courant continu (CC). Alessandro Volta, un physicien italien, a inventé la première pile en 1800. La réaction électrochimique dans une pile implique le transfert d'électrons d'un matériau à un autre (appelé électrodes) par le biais d'un courant électrique. Les spécifications les plus courantes que l'on retrouve partout sur les emballages et le matériel de marketing sont les suivantes :

5.3.1. Ampère-heure (Ah)

L'Ah, ou ampère-heure, est la quantité totale de charge que votre batterie peut fournir en une heure. Par exemple, dans des conditions idéales, une tondeuse à gazon sans fil qui consomme en permanence 2,0 ampères de courant videra la charge totale d'une batterie de 2,0 Ah en une heure

5.3.2. Voltage de la batterie

La tension nominale (V) d'une batterie est une mesure de la puissance que cette batterie peut fournir. En termes simples, plus la tension est élevée, plus la batterie est puissante. Certains appareils sans fil ont besoin de plus de puissance pour fonctionner.

5.3.3. Différents types de batteries pour outils sans fil

Les différents types de batteries se regroupent en trois :

- **Lithium-ion (Li-Ion) :**

Entrée en production commerciale en 1991, la toute dernière technologie en matière de batteries pour outils sans fil est la batterie Lithium-Ion (Li-Ion). En ce qui nous concerne, les batteries Li-Ion sont le meilleur choix pour les outils sans fil. (voir figure 92).



Figure 92 batterie en lithium polymère

- **Nickel-Cadmium (NiCd) :**

La batterie au nickel-cadmium a une longue histoire. En fait, elle a été inventée en 1899, elles n'ont commencé à être produites en masse qu'en 1946 et leur popularité n'a cessé de croître depuis. Elles sont généralement dépassées par les batteries NiMH et Li-Ion, mais sont encore utiles pour certains travaux aujourd'hui. (voir figure 93).

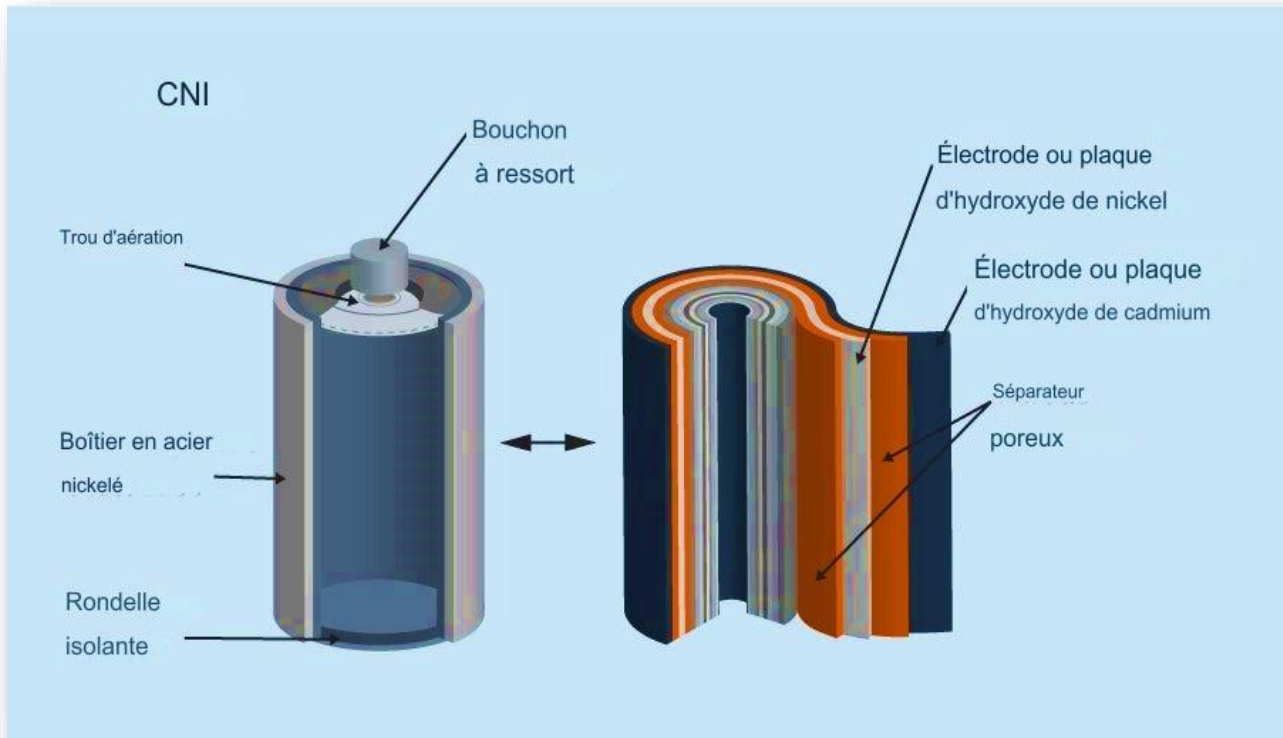


Figure 93 structure d'une pile NiCd

- **Nickel-hydrure métallique (NiMH) :**

Introduites en production de masse en 1989, les batteries NiMH sont une technologie beaucoup plus récente. Elles constituent une amélioration par rapport aux batteries NiCd à bien des égards, les principaux points étant qu'elles sont moins toxiques pour notre environnement lorsqu'elles sont mises au rebut et qu'elles ont une capacité (Ah) considérablement améliorée. Elles présentent bien sûr quelques inconvénients, que nous verrons dans les sections suivantes.

5.4. Chargeur de batterie

Le principe des batteries Lithium est basé sur l'intercalation des ions lithium successivement dans les électrodes positives (cathodes) et négatives (anodes). Lorsque la batterie se charge, un courant électrique est appliqué, provoquant le déplacement des ions lithium de l'anode vers la cathode à travers l'électrolyte. Du côté de la cathode, les ions lithium sont capturés et intercalés dans la structure de la cathode. Ce processus d'intercalation des ions lithium est réversible, ce qui signifie qu'il se produit également lors de la décharge de la batterie.

Dans les batteries lithium, il n'y a donc pas de réactions chimiques comme dans les batteries Plomb. Et pour cela on a choisi un module Chargeur de batterie Li-ion basé sur la puce TP4056. (voir figure 94).

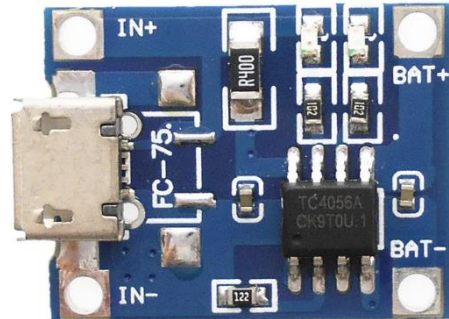


Figure 94 FC-75 chargeur de batteries Li-Ion

5.5. Joystick

Un joystick est un capteur de position constitué d'une tige qui tourne sur un socle et envoie l'angle ou la direction sous forme d'abscisse et d'ordonnée à la carte Arduino. Ils sont largement utilisés dans notre environnement, notamment les manettes de jeu pour contrôler à distance les voitures, les drones et les caméras. Il est équipé de deux potentiomètres de 10K ohms, un pour chaque axe. Lorsque on déplace un joystick, la valeur du potentiomètre change en conséquence, nous donnant les coordonnées de position. Ces potentiomètres sont indispensables pour convertir les mouvements du joystick en données numériques interprétables par la carte Arduino. Le déplacement du joystick modifie la tension de 0 V à 5 V, couvrant toute la gamme des valeurs possibles pour chaque axe. Lorsque on lit la valeur du joystick à l'aide de la carte Arduino, on obtient une valeur de 512 lorsque le joystick est arrêté, et lorsque le joystick est déplacé on obtient une valeur qui varie entre 0 et 1023 selon la position [13].

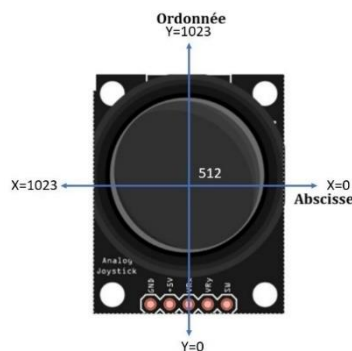


Figure 95 axes de joystick [13]

5.5.1. Branchement

Comme on avait dit que le joystick vaut deux potentiomètres assemblés dans un seul mécanisme, alors son branchement aussi sera semblable au branchement de deux potentiomètres.

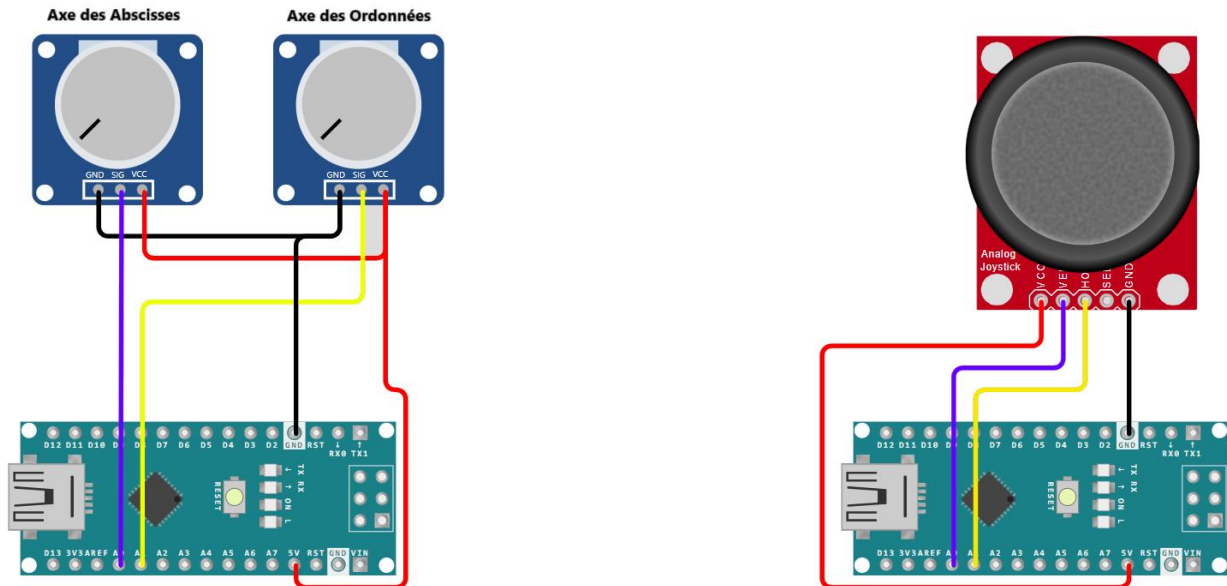


Figure 96 Branchement d'un joystick et son équivalent en potentiomètre

5.5.2. Code

Et pour son code dans le langage de programmation C++ sur Arduino IDE ;

```
#define VRX_PIN  A0 //connecter A0 de l'Arduino au VRX
#define VRY_PIN  A1 // connecter A1 de l'Arduino au VRY
int xValue = 0; // mettre la Valeur a 0
int yValue = 0; // mettre la Valeur a 0
void setup() {
  Serial.begin(9600) ; //commencer la communication avec se Serial de l'Arduino IDE
}
void loop() {
  // lire les Valeurs X et Y du joystick
  xValue = analogRead(VRX_PIN);
  yValue = analogRead(VRY_PIN);
  // ecrire les valeurs de X et Y dans Le Serial de l'Arduino IDE
  Serial.print("x = ");
  Serial.print(xValue);
  Serial.print(", y = ");
  Serial.println(yValue);
  delay(200);
}
```

5.6. Servo moteur

Il s'agit d'un excellent actionneur polyvalent pour les petits mécanismes. Un servomoteur, souvent simplement abrégé en « servo » par les utilisateurs, est un type spécifique de moteur très populaire pour faire tourner quelque chose dans une position très précise et maintenir cette position jusqu'à ce qu'une nouvelle commande arrive. Ils sont souvent utilisés dans la modélisation (par exemple, le contrôle de voitures radiocommandées, le contrôle de la dérive des avions ou des gouvernes de profondeur), mais sont également utilisés en robotique et dans l'industrie, comme dans les vannes pour réguler le débit des fluides. Dans Ce projet on utilise des Servos, qui sont les plus courants dans la modélisation et la petite électronique. Ce sont les modèles dits 9g, soit 9 grammes. L'extérieur a une petite forme rectangulaire avec deux petits bords sur les côtés. Il possède un arbre excentrique qui peut être équipé d'un bras échangeable pour maintenir la fixation et assurer la connexion mécanique aux pièces mobiles. Des servomoteurs à rotation continue sont également disponibles, mais la plupart des modèles ne peuvent déplacer le bras que jusqu'à 180°. Quand on regarde un servomoteur de l'intérieur, c'est un peu plus compliqué qu'il n'y paraît.

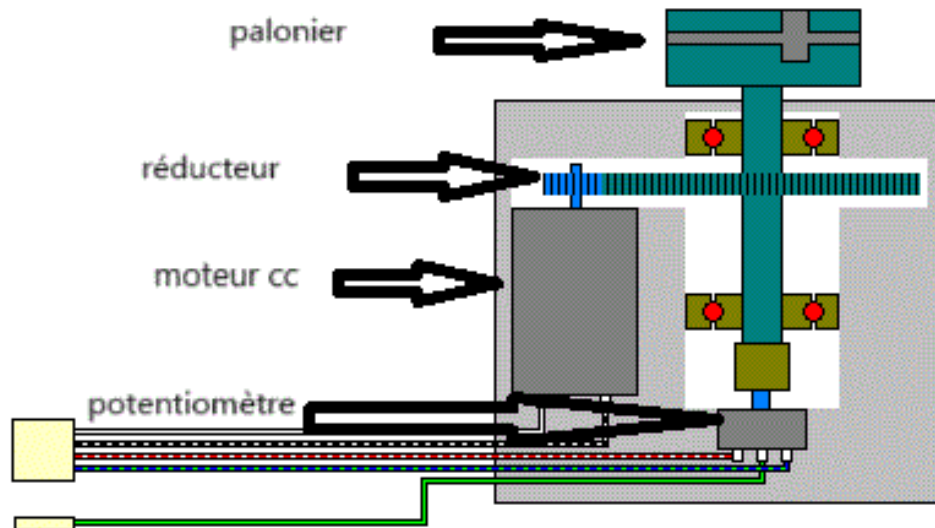


Figure 97 composition d'un Servomoteur 9g [17]

Un petit moteur à courant continu est connecté à un potentiomètre (résistance variable) via un circuit électronique, permettant un réglage fin du moteur en fonction de la position du servomoteur. Potentiomètre sur l'arbre de sortie du moteur, une série d'engrenages augmente le couple (puissance effective) en diminuant la vitesse. Lorsque le moteur tourne, l'engrenage bouge, le bras bouge et le

potentiomètre bouge avec lui. Lorsque le mouvement s'arrête, le circuit électronique ajuste en permanence la vitesse du moteur pour que le potentiomètre s'arrête, et donc le bras du moteur, reste toujours dans la même position. Cela évite par exemple que le bras du robot ne recule sous son propre [17].

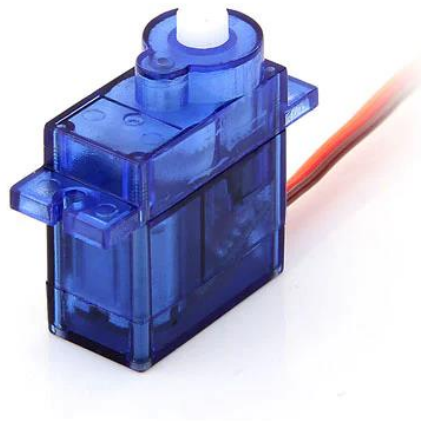


Figure 98 Servo 9g

5.6.1. Branchement

La connexion du servo à l'Arduino se fait généralement de la manière suivante : connecter le fil noir à GND, connecter le fil rouge à 5V, le fil orange/jaune à la broche numérique d'usage général. Le contrôle des servomoteurs sur l'Arduino (comment commander un servomoteur) Cependant, cette connexion rendra le courant de l'Arduino NANO instable (voir figure B 99),, provoquant des oscillations involontaires dans le servo. Pour régler cela, fournissez simplement une alimentation externe (voir figure A 99).

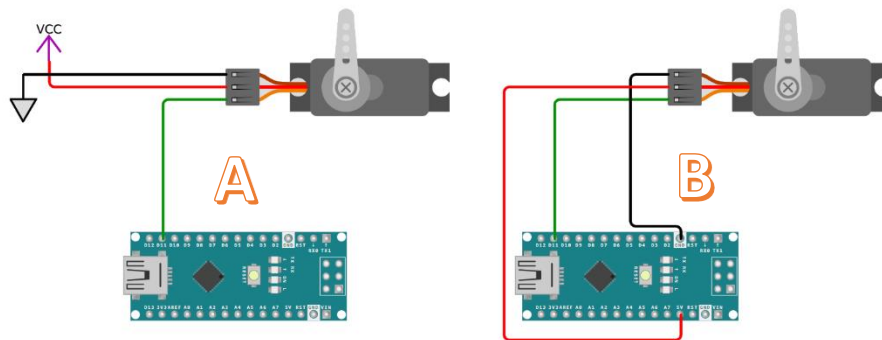


Figure 99 différent branchement d'un Servo moteur

5.6.2. Code

Pour programmer un Servo il va nous falloir une librairie, et qui est simplement un ensemble regroupé de fonctions utilitaires disponibles pour les utilisateurs de l'environnement Arduino, éliminant ainsi le besoin de réécrire des programmes complexes. Les fonctions sont regroupées selon leur appartenance à un même domaine conceptuel (mathématiques, graphisme, tri, etc. Arduino est livré par défaut avec des bibliothèques externes. Pour les importer dans le programme, nous devons les sélectionner dans Sketch > Import Library. Ensuite, l'instruction suivante est ajoutée au début du programme.

```
#include <librairie.h>
```

Dans notre cas, on va utiliser la bibliothèque <Servo.h>.

```
#include <Servo.h>
Servo Servoramzi; // création de l'objet sous le nom " Servoramzi "
void setup() {
  Servo.attach(11); // attache le servo au pin spécifié
}
void loop() {
  servo.write(0); // demande au servo de se déplacer à cette position
  delay(1000); // attend 1000 ms entre changement de position
  servo.write(90); // demande au servo de se déplacer à cette position
  delay(1000); // attend 1000 ms entre changement de position
  servo.write(180); // demande au servo de se déplacer à cette position
  delay(1000); // attend 1000 ms entre changement de position
}
```

5.7. Moteurs Coreless (Sans Noyau)

Moteur sans noyau (il peut également être appelé moteurs à godet creux), le moteur à godet sans noyau est en fait une sorte de moteur à courant continu. Sont largement utilisés dans les téléphones portables, les brosses à dents électriques et les appareils portables pour les notifications d'alerte de vibration et le retour haptique. Il présente les caractéristiques d'une petite taille, d'une vitesse de sortie élevée, d'un faible moment d'inertie, d'aucun crantage, d'un faible frottement, etc. Le mini moteur sans noyau appartient aux micromoteurs à aimant permanent à courant continu. Il présente des caractéristiques d'économie d'énergie exceptionnelles, des caractéristiques de contrôle sensibles et pratiques et des caractéristiques de fonctionnement stables, et son progrès technologique est très évident. En tant que dispositif de conversion d'énergie à haut rendement, il représente l'orientation du

développement des moteurs électriques dans de nombreux domaines. Les petits moteurs sans noyau sont divisés en deux types : à balais et sans balais [16].

Un moteur sans noyau à balais typique se compose d'un stator externe, généralement constitué d'un aimant permanent ou d'enroulements électromagnétiques, et d'un rotor interne constitué de tôles de fer avec des enroulements de bobine. Un collecteur segmenté et des balais contrôlent la séquence dans laquelle les enroulements du rotor sont alimentés, pour produire une rotation continue. Les moteurs sans balais sans noyau n'ont pas de noyau de fer dans le rotor. Les moteurs sans noyau sans balais n'ont pas de noyau de fer dans le stator (voir figure 100). Le moteur électrique sans noyau peut généralement être utilisé avec des boîtes de vitesses, avec une vitesse et une décélération réglable, afin d'obtenir l'effet de décélération [16].

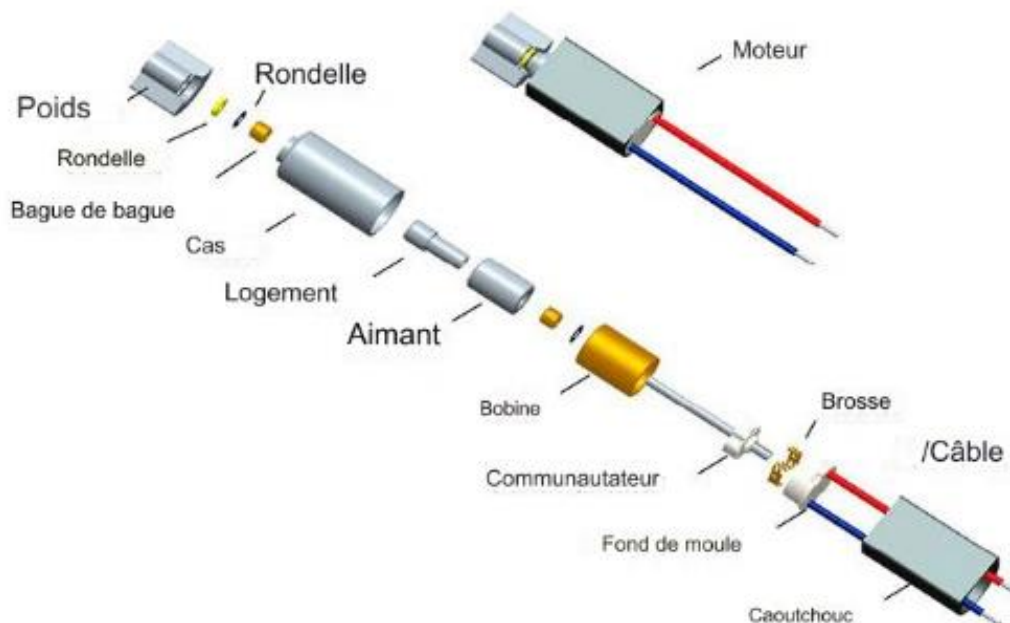


Figure 100 composition d'un moteur sans noyau [16]

5.7.1. Moteur à micro-vibrations (Moteur de drone de 3,7 volts)

IND-YQ0610-001 est l'un des micromoteurs à courant continu de 6 mm de diamètre. Il appartient également au moteur ERM. Et il est doté d'un couple de décrochage de 2,38 g.cm et d'une vitesse à vide de 34 770 tr/min. Ce type de moteur vibrant sans noyau de cylindre appartient aux micromoteurs à aimant permanent à courant continu [16].

En termes de structure, il rompt avec la structure du rotor du moteur traditionnel et utilise un rotor sans noyau (sans noyau de fer). Cette structure de rotor sans noyau élimine complètement la perte de puissance causée par les courants de Foucault. Comme le poids et l'inertie de rotation du rotor sans

noyau sont considérablement réduits, la perte d'énergie mécanique du rotor est réduite. En raison des modifications du rotor sans noyau, les caractéristiques de fonctionnement du moteur sont considérablement améliorées. Il présente non seulement des caractéristiques exceptionnelles d'économie d'énergie, mais surtout, il présente des caractéristiques de contrôle et de traînée qui ne peuvent pas être obtenues par le moteur à vibration à noyau de fer [16].

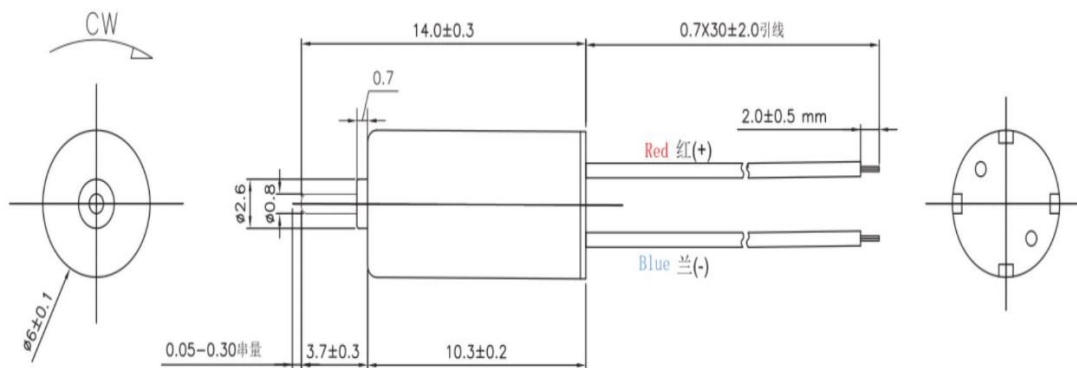


Figure 101 dessin au trait d'un moteur IND-YQ0610-001[16]

| | |
|------------------------------|--------------------------|
| Numéro de pièce du fabricant | IND-YQ0610-001. |
| TENSION NOMINALE | 3,0 V CC. |
| COURANT À VIDE | 150 mA max. |
| VITESSE À VIDE | 55 000 +/- 2 000 tr/min. |
| TENSION DE DÉMARRAGE | 0,8 V CC max. |

Tableau 3 Tableau 1 Les performances techniques du moteur d'entraînement 0610 [16]

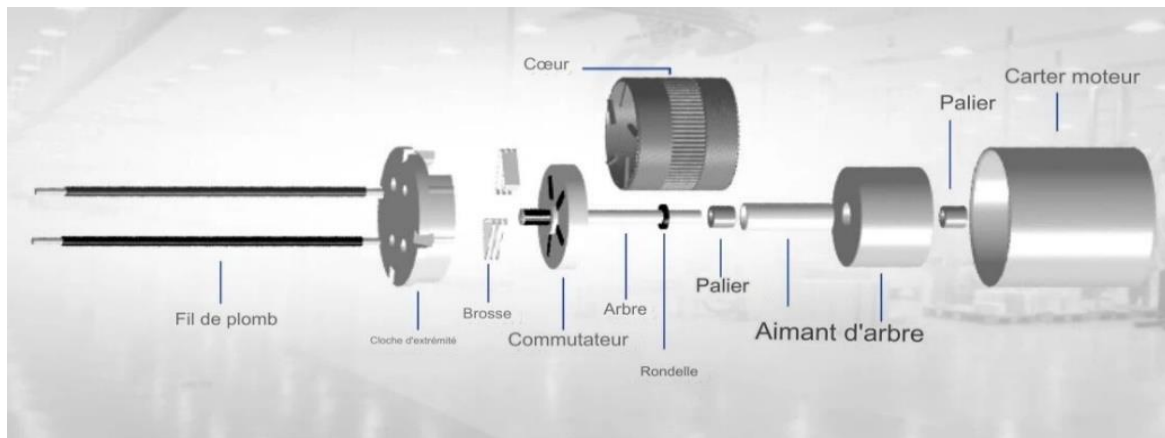


Figure 102 Composition d'un moteur coreless [16]

电机性能曲线

Client

Modèle de moteur 电机型号

IND-YO0610-001

Tension nominale 3 V/DC

Charge nominale

Date du test

17/03/2017

| Tableau des paramètres 性能参数表 | | F/L 空载 | Eff (max) 最大效率点 | P(maxi) 最大功率点 | Débrayage 堵转点 |
|---------------------------------|------|-----------|--------------------|------------------|------------------|
| Couple : | g.cm | 0 | 0,50 | 1.19 | 2.38 |
| 转速 Vitesse : | RPM | 34770 | 27437 | 17385 | 0 |
| Actuel : | mA | 25.3 | 94.7 | 189.8 | 354.2 |
| Sortie : | W | 0 | 0.14 | 0.21 | 0 |
| Description Efficacité : | % | 0 | 49.8% | 37.4% | 0 |

| Paramètres de 特征参数 | | |
|---|---------|----------|
| Constante de couple pour la constante : | 7.247 | g.cm/A |
| 转速常数 Constante de vitesse : | 12482 | RPM/V |
| 速度/转矩 Voir plus Régulation moteur : | 14586.8 | Rpm/g.cm |

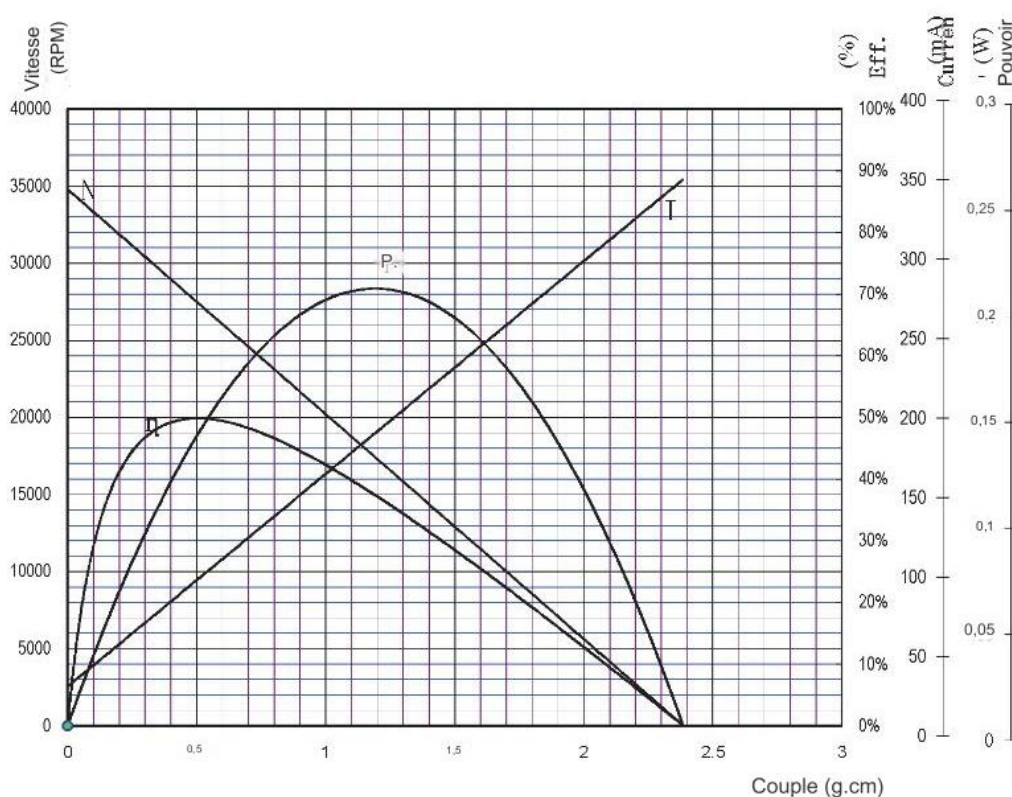


Figure 103 Courbe de performance du moteur Coreless [16]

5.8. Driver L298N mini :

Le variateur de moteur à double pont en H peut faire fonctionner deux moteurs à courant continu ou un moteur pas à pas biphasé à quatre fils. La tension d'alimentation du module est de 2 V à 10 V. La tension d'entrée du signal est de 1,8 à 7 V. Courant de fonctionnement unique 1,5 A, courant de crête 2,5 A, faible courant de veille (moins de 0,1 uA). La transmission en mode commun intégrée ne dysfonctionnera pas lorsque la glissière de la broche d'entrée sera relâchée. Circuit de protection thermique interne à effet d'hystérésis (TSD), sans souci d'arrêt du moteur [15].

- Taille du produit : 24,7 * 21 * 5 mm (longueur, largeur, hauteur), très petite taille (voir figure 101).
- Diamètre du trou de montage : 2 mm

Idéal pour les modules d'entraînement motorisés, les voitures intelligentes alimentées par batterie, les petites voitures, les robots. La tension d'alimentation peut être de 2 V ~ 10 V, deux moteurs à courant continu ou des moteurs pas à pas biphasés à 4 fils peuvent être actionnés, la marche avant ou arrière peut-être atteinte, il est possible de régler la vitesse de rotation. Chacun peut fournir un courant continu de 1,5 A, un courant de crête jusqu'à 2,5 A, une protection thermique et peut être restauré automatiquement [15].

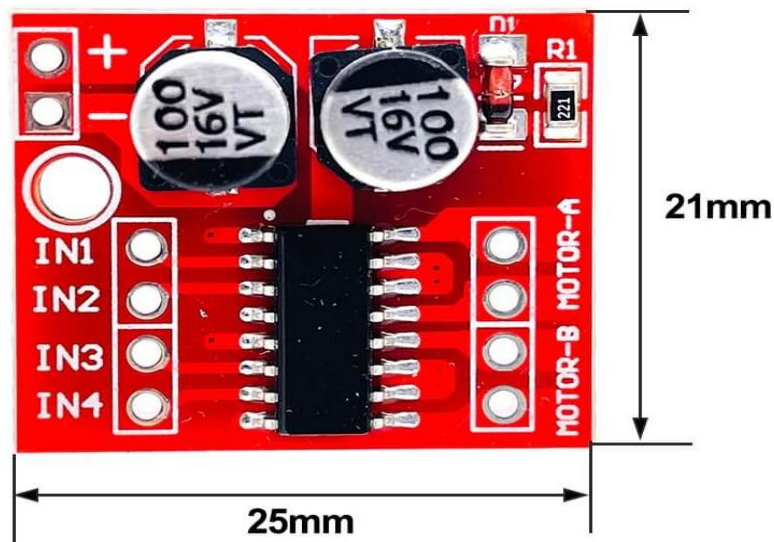


Figure 104 Driver L298N Mini [15]

5.8.1. Les « Ponts en H »

Les Ponts en H ne sont en fait qu'un nom donné à une configuration particulière, de composants électroniques. Classiquement, ceux-ci sont composés de 4 transistors, disposés d'une certaine manière, formant visuellement la lettre « H » (ou presque !). En voici un exemple, avec quatre transistors bipolaires, comme ceux qu'on trouve en interne, dans le L298N [15].

Le principe d'un pont en H est super simple : en activant les transistors deux par deux (ceux de sens opposés), on peut contrôler le sens du passage du courant dans la charge, branchée « au milieu du H ». Et c'est ce changement de sens de courant, qui permet aux moteurs à courant continu de changer leurs sens de rotation. Visuellement, voici comment cela se passe : [15]

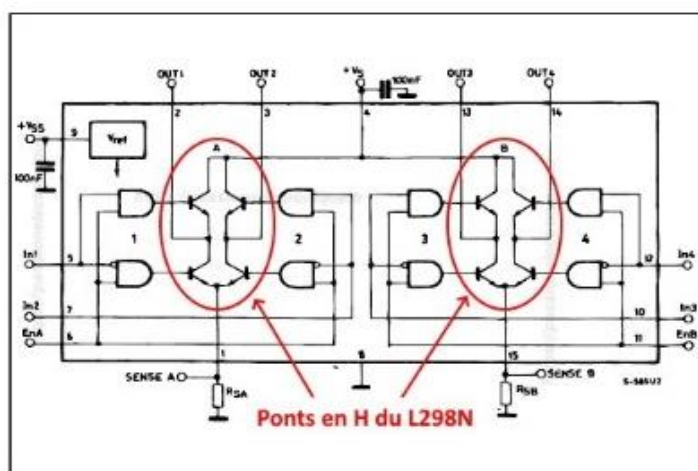
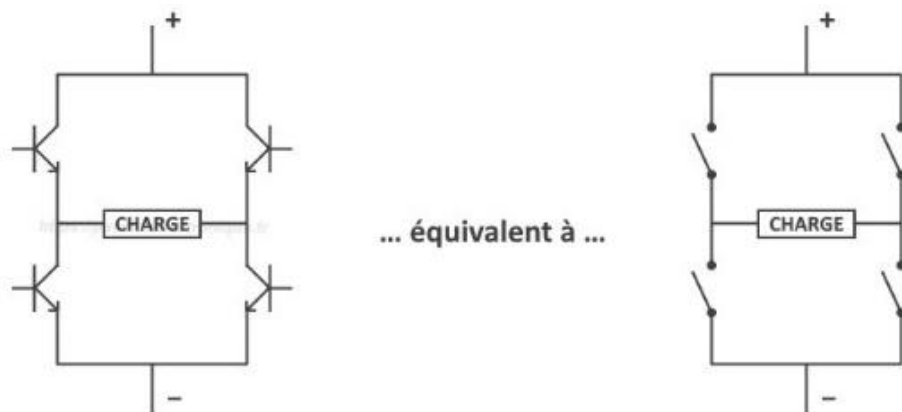
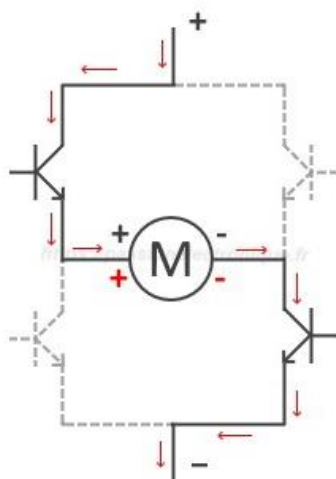


Figure 105 Schéma électronique d'un pont en "H"

« Marche avant »

« Marche arrière »

Dans ce premier cas, le "+" du moteur correspond avec le "+" de l'alimentation. Ainsi, le moteur tourne "à l'endroit".



Dans ce deuxième cas, le "+" du moteur correspond avec le "-" de l'alimentation. Ainsi, le moteur tourne "à l'envers".

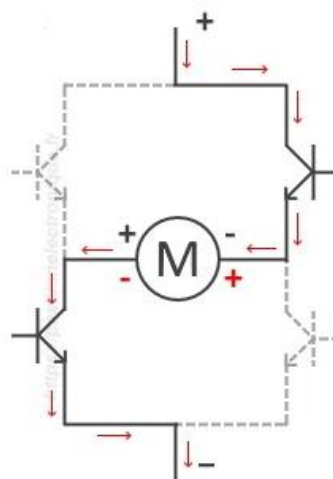


Figure 106 Principe de fonctionnement d'un pont "H"

5.8.2. Branchement

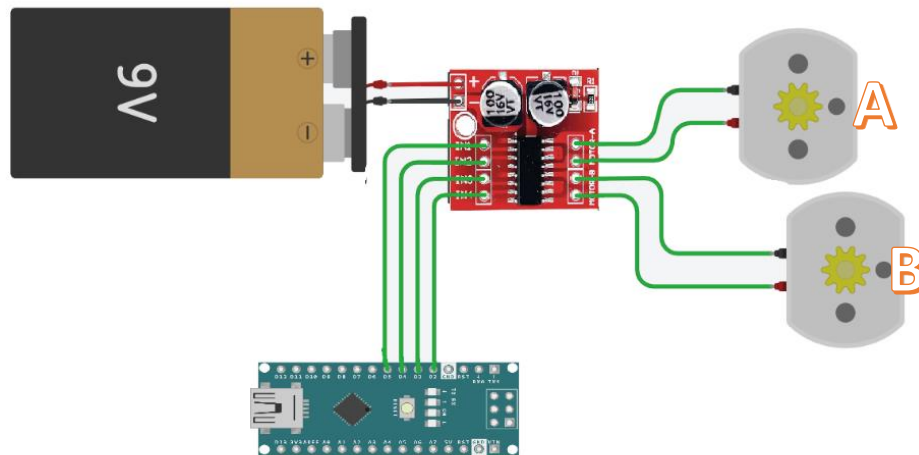


Figure 107 branchement des moteurs sur un driver L298 Mini

5.8.3. Code Arduino

```
//déclaration des moteurs
int moteurA1 = A0; //in1 sur la broche A0 ou une broche PWM MOTEUR A
int moteurA2 = A1; //in2 sur la broche A1 ou une broche PWM MOTEUR A
int moteurB1 =A2; // MOTEUR B
int moteurB2 =A3; // MOTEUR B
void setup() {
//déclaration du mode d'emploi des pins
  pinMode(moteurA1, OUTPUT);
  pinMode(moteurA2, OUTPUT);
  pinMode(moteurB1, OUTPUT);
  pinMode(moteurB2, OUTPUT);
}
void loop()
{
//faire rouler le moteur A dans le sens horaire
analogWrite(moteurA1, LOW );
analogWrite(moteurA2,100);
//faire rouler le moteur B contre le sens horaire
analogWrite(moteurB1, 100 );
analogWrite(moteurB2, LOW);
}
```

5.9. Gyroscope & Accéléromètre MPU6050

Un **gyroscope** est un appareil qui exploite le principe de la conservation du moment cinétique en physique, également connu sous le nom de stabilité gyroscopique. Cette loi fondamentale de la mécanique stipule qu'en l'absence de couple appliqué à un solide en rotation autour d'un de ses axes

principaux, celui-ci conserve son axe de rotation invariable. En termes simples, un gyroscope est un capteur de position angulaire sur trois axes (x, y, z).

Un **accéléromètre** est un capteur utilisé pour mesurer l'accélération d'un corps (voir figure 108). Par exemple, il peut être utilisé pour calculer l'accélération d'une voiture qui passe de 0 à 100 km/h en quelques secondes. Les accéléromètres mesurent les forces de l'accélération linéaire le long de plusieurs axes (généralement x, y et z).



Figure 108 module gyroscope & accéléromètre MPU 6050

Le MPU6050 est un système micro électromécanique (MEMS), il se compose d'un accéléromètre à trois axes et d'un gyroscope à trois axes. Il nous aide à mesurer la vitesse, l'orientation, l'accélération, le déplacement et d'autres caractéristiques de type mouvement. Il est composé d'un processeur de mouvement numérique (DMP), qui a la propriété de résoudre des calculs complexes. Et aussi d'un convertisseur analogique-numérique 16 bits. Grâce à cette fonctionnalité, il capture simultanément des mouvements tridimensionnels. Ce module possède des fonctionnalités célèbres qui sont facilement accessibles, en raison de sa disponibilité facile, il peut être utilisé avec un microcontrôleur célèbre comme Arduino. Il utilise une communication I2C pour l'interfaçage avec Arduino.

5.9.1. Bronchement

Les microcontrôleurs Arduino utilisent deux broches pour le fonctionnement i2c. Dans Arduino Uno et Nano, la ligne SDA correspond au port analogique A4 et SCL correspond au port analogique A5 comme le montre la figure 109.

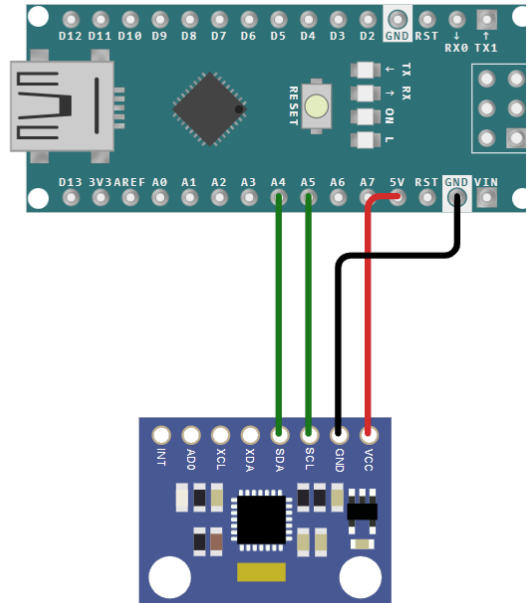


Figure 109 branchement d'un MPU6050 avec une carte Arduino Nano

5.9.2. Code Arduino

Pour ce Code on utilise la bibliothèque Adafruit MPU6050 pour lire et afficher les valeurs d'accélération du capteur.

```
#include <Adafruit_MPU6050.h> // inclure les bibliothèques
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>

Adafruit_MPU6050 mpu; // déclarer notre module MPU6050
void setup(void) {
  // commencer la communication avec le Serial Arduino IDE
  Serial.begin(115200) ;
  //configuration du module
  mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_8_G);
  switch (mpu.getAccelerometerRange())
  mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_500_DEG);
  switch (mpu.getGyroRange()) {
  mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_5_HZ);
  switch (mpu.getFilterBandwidth()) {
  delay(100);
  }
}

void loop() {
  //lire les valeur.
  sensors_event_t a, g, temp;
  mpu.getEvent(&a, &g, &temp);
```

```
//afficher les valeur.  
Serial.print("Acceleration X: ");  
Serial.print(a.acceleration.x);  
Serial.print(", Y: ");  
Serial.print(a.acceleration.y);  
Serial.print(", Z: ");  
Serial.print(a.acceleration.z);  
Serial.print("Rotation X: ");  
Serial.print(g.gyro.x);  
Serial.print(", Y: ");  
Serial.print(g.gyro.y);  
Serial.print(", Z: ");  
Serial.print(g.gyro.z);  
Serial.print("Temperature: ");  
Serial.print(temp.temperature);  
Serial.println("");  
delay(1000);  
}
```

5.10. Radio NRF24L01

Le nRF24L01 est un circuit intégré émetteur-récepteur RF ultra-basse consommation (ULP) de 2 Mbps pour la bande ISM (industrielle, scientifique, médicale) de 2,4 GHz. Avec des courants de crête RX/TX inférieurs à 14 mA, un mode d'arrêt inférieur à μA , une gestion avancée de l'alimentation et une plage de puissance de 1,9 à 3,6 V, le NRF est basé sur le circuit nordique nRF24L01+. Le nRF24L01 est un module radio qui intègre tout le nécessaire pour envoyer et recevoir des données dans la gamme de fréquences de 2,4 GHz (comme le Wi-Fi et le Bluetooth) à l'aide du protocole de communication exclusif « ShockBurst » de Nordic. Ce protocole de communication permet de considérer le nRF24L01 comme un modem complet avec adressage, gestion des erreurs de transmission et retransmission automatique en cas de non réponse du récepteur. Le nRF24L01 possède un démodulateur, un synthétiseur de fréquence et un amplificateur de signal intégrés. La portée du module Arduino nrf24l01+ peut atteindre 100 mètres, et dans la version avec amplificateur et antenne, jusqu'à 1000 mètres en visibilité directe. Le module peut utiliser 127 canaux de communication avec

des fréquences de signal allant de 2,4 GHz à 2,483 GHz. La vitesse de la connexion sans fil peut être réglée à 250 kbps, 1Mbps ou 2Mbps.



Figure 110 le module NRF 24L01 + Antenne

5.10.1. Branchement

Le module NRF24L01 possède 8 broches pour une communication SPI alors (voir figure 111):

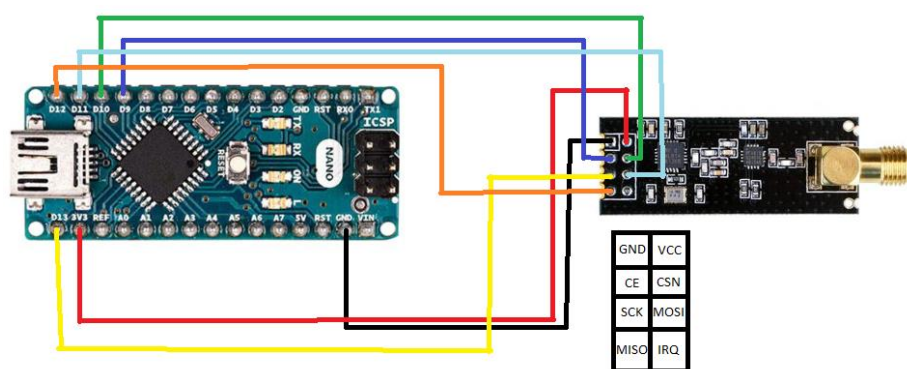


Figure 111 branchement du module NRF 24L01 + Antenne avec une Arduino NANO

5.10.2. Code

Pour le code on aura besoin d'une bibliothèque pour la communication SPI et d'autres pour la communication Radio <SPI.h>

```
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
```

Code pour l'émetteur :

```
#include <SPI.h> // inclure les bibliothèques
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
const uint64_t pipeOut = 000322; // adresse de communication
RF24 radio (9, 10) ; // sélectionner les broches CE, CSN sur 9, 10 de
l'Arduino
//déclarer les chaines de transmission
struct Signal {
  byte chaine_1;
  byte chaine_2;
  byte chaine_3;
}
  Signal data{
  byte data.chaine_1;
  byte data.chaine_2;
  byte data.chaine_3;
}
  void setup()
  {
  //configuration du module NRF24
  radio.begin();
  radio.openWritingPipe(pipeOut);
  radio.stopListening(); // commencer la transmission Radio
  ResetData();
  }
  void loop()
  {
  //envoi des données
  radio.write(&data, sizeof(Signal));
  }
}
```

Code pour le récepteur :

```
include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

struct Signal {
  byte chaine_1;
  byte chaine_2;
  byte chaine_3;
};

  Signal data{
  byte data.chaine_1;
```

```

byte data.chaine_2;
byte data.chaine_3;
}
const uint64_t pipeIn = 000322;
// faut mettre la meme adresse Sur l'émetteur

RF24 radio(9, 10);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  radio.begin();
  radio.openReadingPipe(1,pipeIn);
  radio.startListening();
  // commencer la communication Radio pour la reception
}

void loop()
{
  recvData();
  Serial.println( byte data.chaine_1);
  Serial.println( byte data.chaine_2);
  Serial.println( byte data.chaine_3);
}

```

NB : *le gyroscope n'a pas été utilisé dans ce programme.*

5.11. La Radiocommande

La Radiocommande est un type de télécommande et est un outil qui nous permet de contrôler à distance des appareils via la communication sans fil. Ce type de commande est utilisé dans l'aérospatiale, le modélisme et même dans des situations et actions dangereuses pour l'homme et impliquant des robots radiocommandés.

5.11.1. L'émetteur

C'est le boîtier de commandes, pour le plus simple, il est composé de deux manches. Chacun d'eux peut être actionné sur deux axes (haut, bas et droite, gauche), en effectuant une action sur les manches, un mécanisme va entraîner des potentiomètres qui vont permettre de transformer ces ordres en impulsions électroniques. Ces ordres, vont être transmis à leur tour, au récepteur par l'intermédiaire du module HF, en émettant des ondes radio en utilisant la fréquence de 2,4 GHz (fréquence similaire

au Wifi, le principe est que la radio scanne les fréquences disponibles et sélectionne un canal libre pour communiquer avec son récepteur).



Figure 112 émetteur Commande RC

5.11.2. Le récepteur

C'est le module électronique embarqué dans la voiture ou l'avion, qui a pour but de recevoir et d'analyser les signaux radio émis par l'émetteur afin de les transmettre aux différents éléments de commande.



Figure 113 Récepteur d'une commande RC

5.11.3. Présentation de la commande RC

La Radio Commande dispose de deux joysticks responsables du contrôle des axes du drone et des moteurs, comme elle a aussi un module Radio avec antenne qui joue le rôle d'un émetteur Radio, d'un bouton d'allumage et d'un témoin.

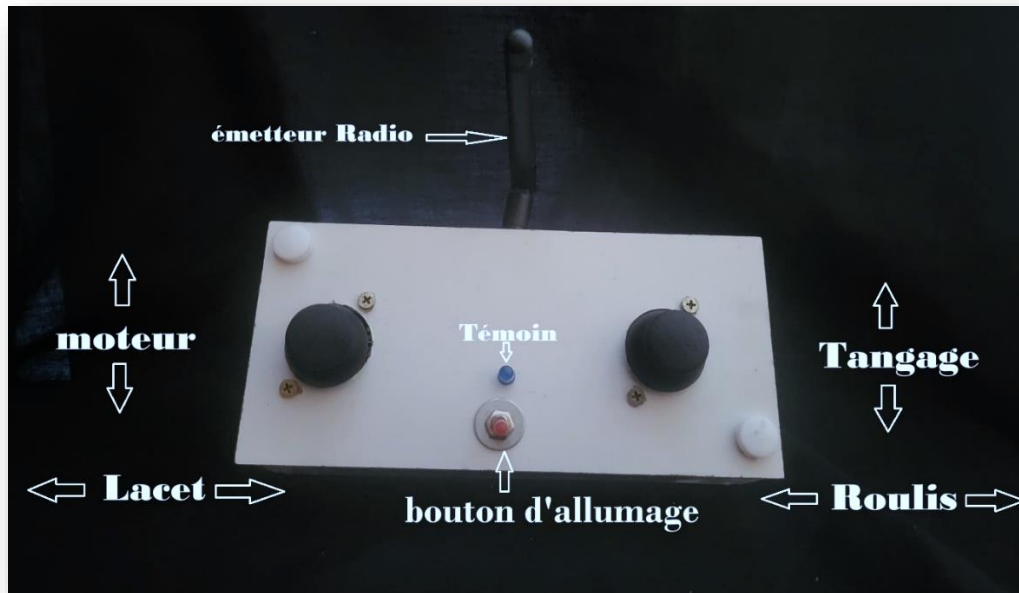


Figure 114 présentation de la Radio Commande

5.11.4. Circuit de la commande RC Émetteur.

Les radiocommandes offrent de nombreux avantages. C'est un excellent moyen de se détendre et de s'amuser. Mais c'est aussi un outil pédagogique. En construisant et en pilotant un modèle réduit, on apprend beaucoup sur l'électronique, comme le branchement des éléments qui le compose et du programme et le fait fonctionner comme le montre la figure 115.

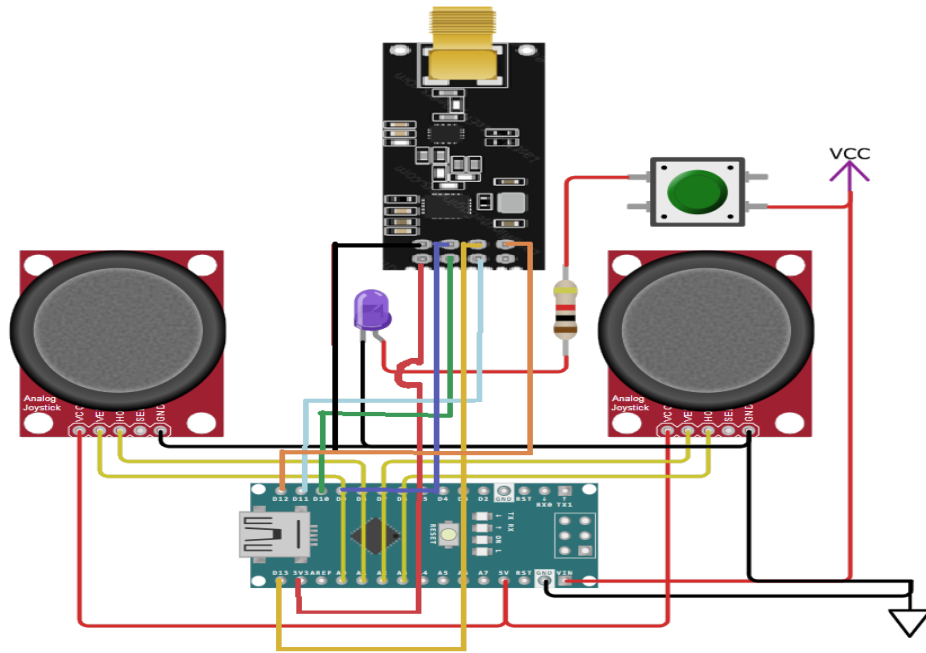


Figure 115 schéma électronique de l'émetteur RC

Code Arduino:

```

#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
const uint64_t pipeOut = 0xABCDABCD71LL;
RF24 radio(9, 10);

struct Signal {
int DaileG;
int Dgouvern;
int Delevateur;
int DmoteurA;
int DmoteurB;
};

Signal data;
void ResetData()
{
data.DaileG ;
data.Dgouvern ;
data.Delevateur ;
data.DmoteurA;
data.DmoteurB;
}

void setup()
{
radio.begin();

```

```

radio.openWritingPipe(pipeOut);
radio.setChannel(100);
radio.setAutoAck(false);
radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
radio.stopListening();
ResetData();
}
int Border_Map(int val, int lower, int middle, int upper, bool reverse)
{
val = constrain(val, lower, upper);
if ( val < middle )
val = map(val, lower, middle, 0, 128);
else
val = map(val, middle, upper, 128, 255);
return ( reverse ? 255 - val : val );
}
void loop()
{
data.DaileG = analogRead(A1);
data.Dgouvern = analogRead(A2);
data.Delevateur = analogRead(A3);
data.DmoteurA = analogRead(A4);
radio.write(&data, sizeof(Signal));
}

```

5.11.5. Circuit du drone a voilure Fixe

Dans cette présentation, nous allons explorer en détail les composants électroniques qui permettent à un drone à voilure fixe de vol. Nous verrons l'ensemble du système après qu'on a mentionné les différents éléments qui le composent comme le montre la figure 116.

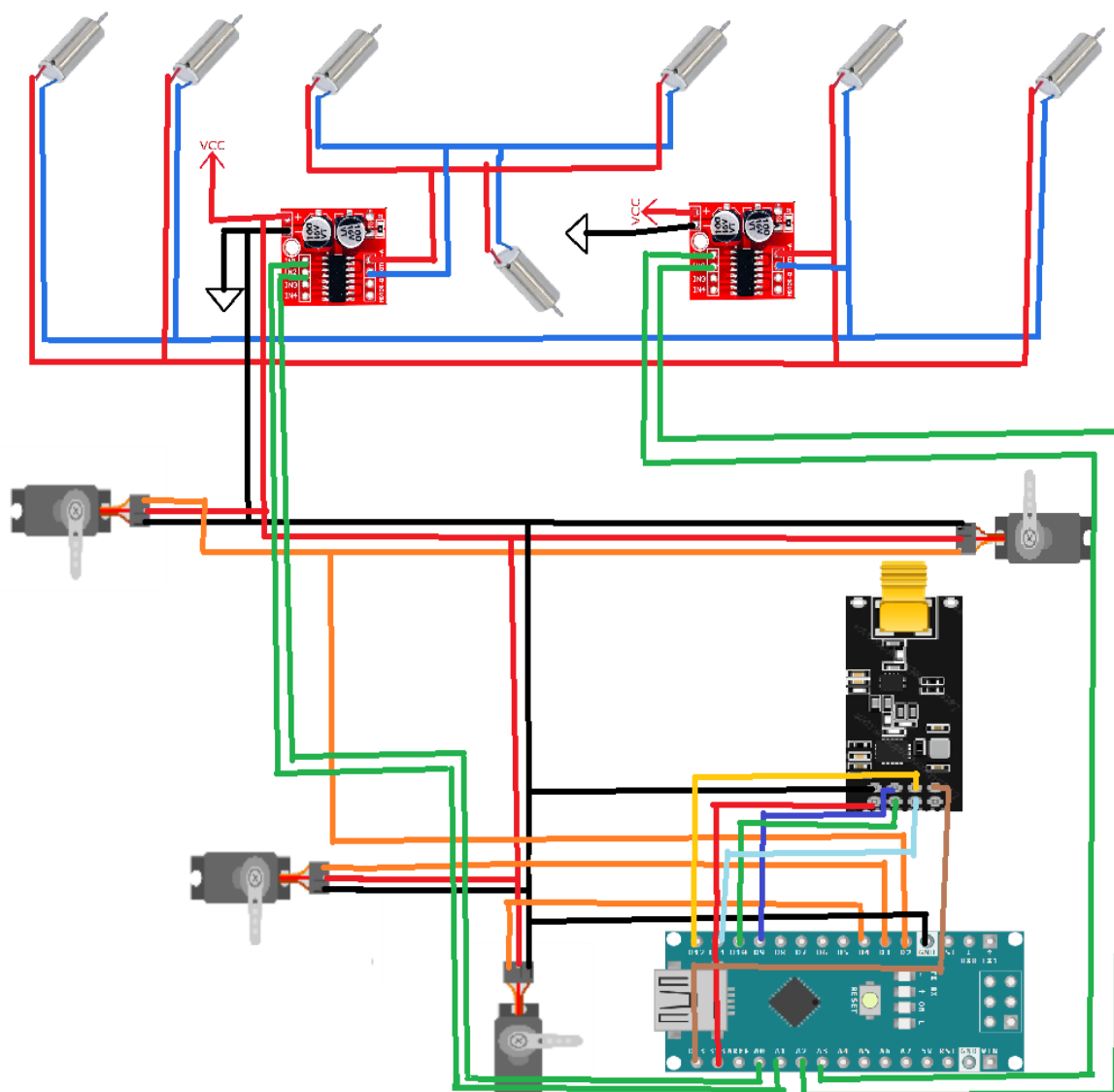


Figure 116 schéma électronique du récepteur

Code Arduino :

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <Servo.h>
int moteurA = 5;
int moteurB = 6;
int moteurC = 7;
int moteurD = 8;

int VaileG;
int Vgouvern;
```

```

int Velevateur;
int VmoteurA;
int VmoteurB;
Servo aileG;
Servo aileD;
Servo gouvern;
Servo elevateur;

struct Signal {
int DaileG;
int Dgouvern;
int Delevateur;
int DmoteurA;
int DmoteurB;
};
Signal data;
const uint64_t pipeIn = 0xABCDABCD71LL;
RF24 radio(9, 10);
void ResetData()
{
data.DaileG ;
//data.aileD ;
data.Dgouvern ;
data.Delevateur ;
data.DmoteurA;
data.DmoteurB;
}
void setup()
{
Serial.begin(115200);
aileG.attach(2);
gouvern.attach(3);
elevateur.attach(4);

pinMode(moteurA, OUTPUT);
pinMode(moteurB, OUTPUT);
pinMode(moteurC, OUTPUT);
pinMode(moteurD, OUTPUT);

ResetData();
radio.begin();
radio.openReadingPipe(1,pipeIn);
radio.setChannel(100);
radio.setAutoAck(false);
radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
radio.startListening();
}

```

```

unsigned long lastRecvTime = 0;
void recvData()

{
  while ( radio.available() ) {
    radio.read(&data, sizeof(Signal));
    lastRecvTime = millis();
  }
}

void loop()
{
  recvData();
  unsigned long now = millis();
  if ( now - lastRecvTime > 1000 ) {
    ResetData();
  }
  VaileG = map(data.DaileG, 0, 1023, 0, 180);
  //ch_width_2 = map(data.Vaile, 0, 255, 1000, 2000);
  Vgouvern = map(data.Dgouvern, 0, 1023, 0, 180);
  Velevateur = map(data.Delevateur, 0, 1023, 0, 180);
  VmoteurA = map(data.DmoteurA, 0, 1023, 255, 0);
  //ch_width_6 = map(data.aux2, 0, 1, 1000, 2000);
  if (VmoteurA < 130){
    digitalWrite(moteurB, LOW );
    analogWrite(moteurA, LOW);
    digitalWrite(moteurC, LOW );
    analogWrite(moteurD, LOW);
  }
  else {
    digitalWrite(moteurB, LOW );
    analogWrite(moteurA, VmoteurA*3);
    digitalWrite(moteurC, LOW );
    analogWrite(moteurD, VmoteurA*3);
  }

  aileG.write(VaileG);
  gouvern.write(Vgouvern);
  elevateur.write(Velevateur);
}

```

5.12. Régulation et asservissement PID

En automatique, le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques. Le PID permet 3 actions en fonction de cette erreur :

- **Proportionnelle** : l'erreur est multipliée par un gain G
- **Intégrale** : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps, puis multipliée par un gain T_i
- **Dérivée** : l'erreur est dérivée suivant un temps, puis multipliée par un gain T_d

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les 3 effets (série, parallèle ou mixte) [14].

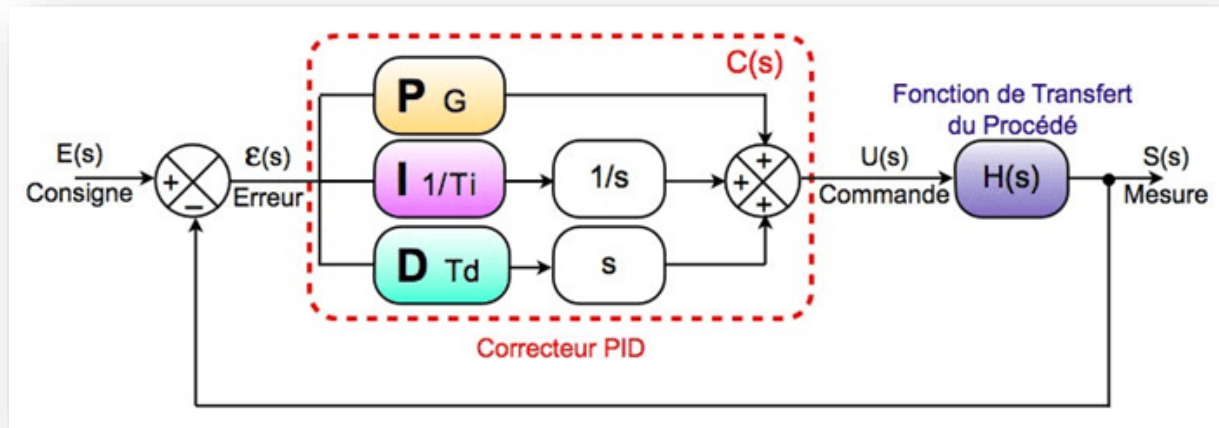


Figure 117 Principe de fonctionnement de PID [14]

5.12.1. L'action Proportionnelle

L'action proportionnelle permet de jouer sur la vitesse de réponse du procédé. Plus le gain est élevé, plus la réponse s'accélère, plus l'erreur statique diminue (en proportionnel pur), mais plus la stabilité se dégrade. Il faut donc trouver un bon compromis entre vitesse et stabilité [14].

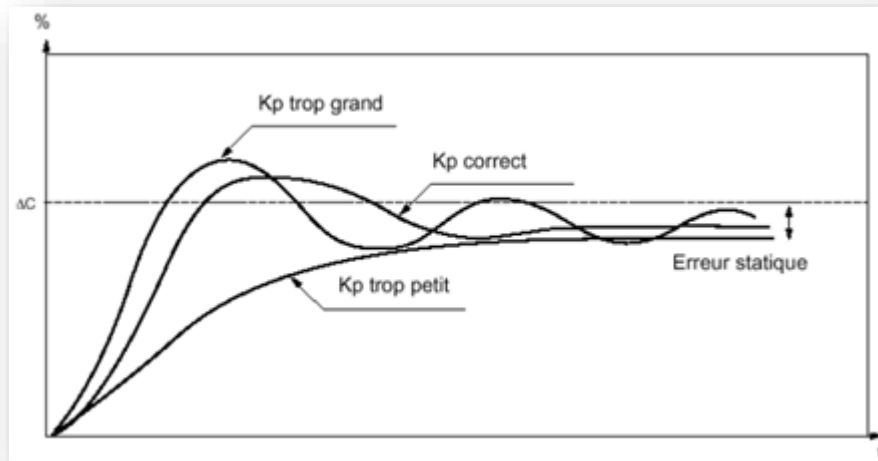


Figure 118 Action proportionnelle de PID [14]

5.12.2. L'action Intégrale

L'action intégrale permet d'annuler l'erreur statique (l'écart entre la mesure et consigne).

Plus l'action intégrale est élevée (TI petit), plus la réponse s'accélère et plus la stabilité se dégrade. Là aussi, il faut donc trouver un bon compromis entre vitesse et stabilité [14].

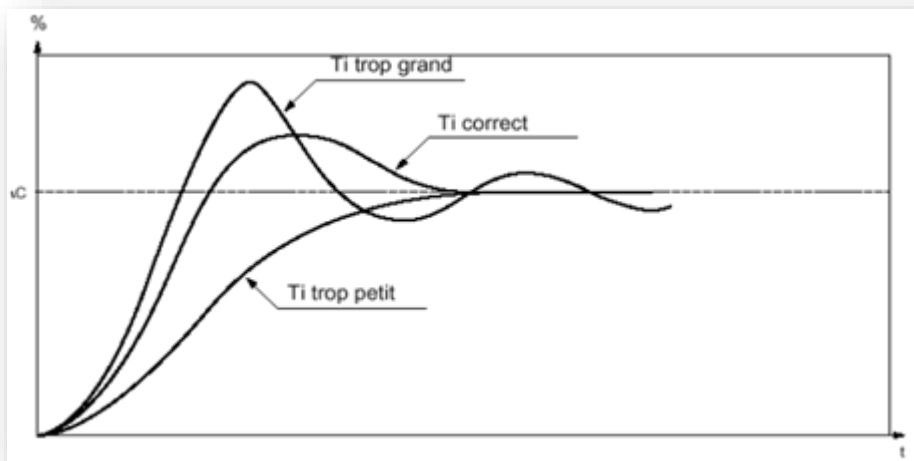


Figure 119 Action intégrale de PID [14]

5.12.3. L'action Dérivée

L'action dérivée est anticipatrice. En effet, elle ajoute un terme qui tient compte de la vitesse de variation de l'écart. Cela permet d'anticiper en accélérant la réponse du processus lorsque l'écart s'accroît. Au contraire en le ralentissant lorsque l'écart diminue. Plus l'action dérivée est élevée (Td

grand), plus la réponse s'accélère. Là encore, il faut trouver un bon compromis entre vitesse et stabilité [14].

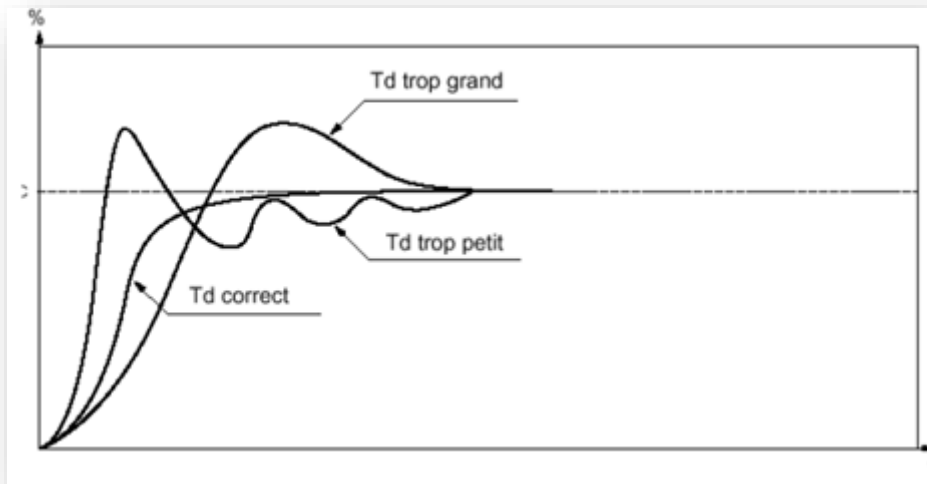


Figure 120 Action dérivée de PID[14]

5.12.4. L'action (PID) Proportionnelle, Intégrale, Dérivée

Cette figure met en évidence l'action de chaque correcteur par un même système réglé.

Assurer la rapidité : action P

Annuler l'erreur statique : action I

Améliorer la stabilité : action D

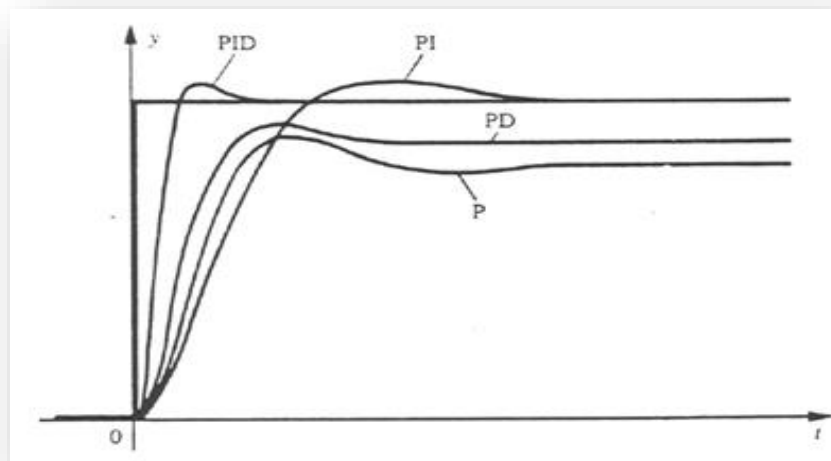


Figure 121 Action PID totale [14]

5.12.5. Méthode de réglage des paramètres PID

Si le système doit rester en production, une méthode de réglage consiste à mettre les valeurs Intégrale (I) et Dérivée (D) à zéro. Augmenter ensuite le gain Proportionnel (P) jusqu'à ce que la sortie oscille. Puis, augmenter le gain de l'Intégrale jusqu'à ce que cesse l'oscillation [14].

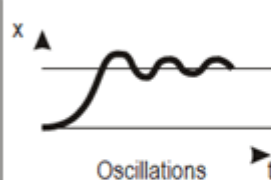
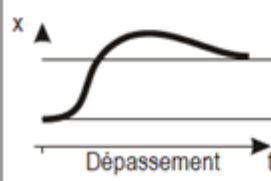
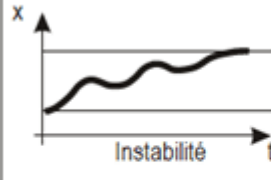
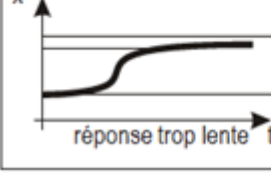
| Réponse du système | Réglage à effectuer en fonction du type | | | |
|---|---|---------|---------|-------------|
| | P | PD | PI | PID |
|  <p>Oscillations</p> | Pb↑ | Pb↑ td↓ | Pb↑ | Pb↑ ti↑ td↓ |
|  <p>Dépassement</p> | Pb↑ | Pb↑ td↑ | Pb↑ ti↑ | Pb↑ ti↑ td↑ |
|  <p>Instabilité</p> | | Pb↓ td↓ | | Pb↓ td↓ |
|  <p>réponse trop lente</p> | Pb↓ | Pb↓ | ti↓ | Pb↓ ti↓ |

Figure 122 Paramétrage de PID [14]

5.12.6. Code Arduino

Pour le code Arduino on aura besoin de la librairie <PID_v1.h>

```
#include <PID_v1.h>
//définir les variable ;

#define PIN_INPUT 0
#define PIN_OUTPUT 3

//définir les coefficient de P.I.D. Kp=2, Ki=5, Kd=1;
```

```
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

void setup()
{
  //démarrer la fonction de PID
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
}

void loop()
{
  Input = analogRead(PIN_INPUT);
  myPID.Compute(); // calcule de la fonction
  analogWrite(PIN_OUTPUT, Output); écrire la valeur régler avec PID
}
```

5.13 Conclusion

Le développement de la partie électronique et instrumentation du drone a nécessité une approche méthodique, alliant connaissances théoriques et compétences pratiques. Le choix d'une architecture basée sur une carte de contrôle Arduino Nano et d'un capteur IMU MPU6050 s'est avéré judicieux pour assurer un vol stable et contrôlable. Les tests de la communication Radio ont confirmé les performances attendues du système. Notamment en termes d'autonomie, de charge utile et de fonctionnalités avancées

Conclusion Générale

Notre projet de fin d'étude s'est porté sur la conception d'un drone à voile fixe qui présente l'apparence d'un avion. Notre conception se veut d'abord peu coûteuse pour rendre la technologie du drone plus accessible et stimuler ainsi son développement.

D'autres part, nous avons opté pour une conception plus respectueuse de l'environnement et cela en utilisant des matériaux recyclés, démontrant ainsi notre engagement pour la durabilité qui est un enjeu majeur à notre époque.

L'un des principaux défis dans la conception de notre drone est de trouver un équilibre entre la masse et l'énergie. Un drone plus léger peut être plus agile et consommer moins d'énergie, mais il doit également être suffisamment robuste pour supporter les composants nécessaires. Nous devons donc choisir des matériaux légers mais résistants, tout en optimisant la capacité de la batterie pour prolonger le temps de vol. C'est pourquoi notre choix s'est porté sur le papier Kraft, la colle blanche et le polystyrène.

Nous avons, d'abord, conçu un modèle sur le logiciel SolidWorks dédié à la CAO, ce qui nous a permis de connaître le volume total du drone, cela nous a aidé à estimer la quantité de matériaux et la masse de notre drone. On balançait entre le volume du drone et la masse volumique du polystyrène afin d'avoir une structure d'un design souhaité et d'une masse optimisée.

Les principales étapes de la réalisation du drone peuvent se résumer aux points suivants :

- ∫ Découper le polystyrène à l'aide du fil chaud, un appareil que nous avons fabriqué ou avec un cutter pour avoir la forme générale du drone.
- ∫ Renforcer la structure en polystyrène avec des tiges en acier et le couvrir de papier Kraft avec un mélange de colle.
- ∫ Fixer tous les composants et les instruments nécessaires et les connecter à une carte Arduino Nano que nous avons programmé.

Ce travail, bien qu'il soit modeste, ouvre la voie à des avancées technologiques qui pourraient vraiment transformer notre quotidien en ajoutant, par exemple, un système de traitement d'images afin de détecter des anomalies ou des dangers, la détection de début d'incendie, ou allez encore plus loin et le doter d'un système météorologique avancé afin de déterminer de prêt les températures, les pressions et les autres paramètres, et ce n'est que le début pour des exploits plus prometteurs à l'avenir.

Annexe



Figure 123 image du drone prise avec SW view 360

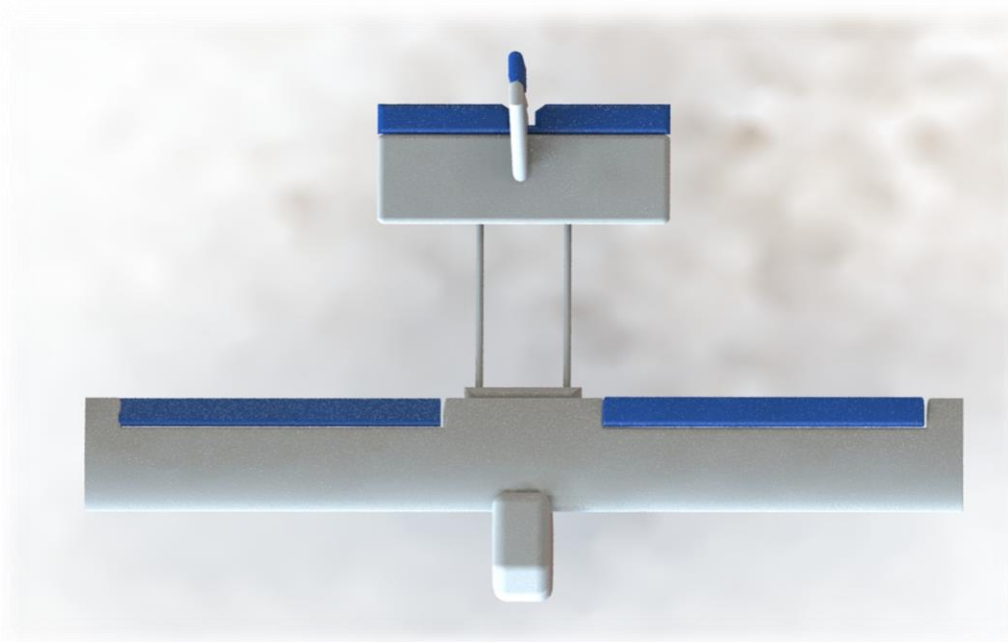


Figure 124 prise d'en haut du drone avec SW View 360

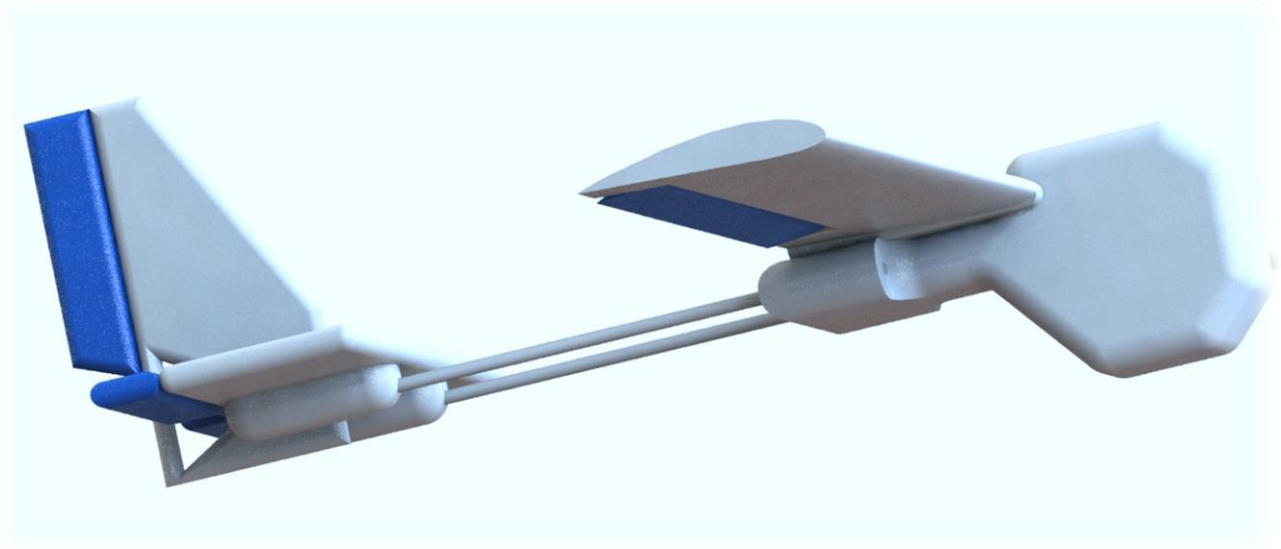


Figure 125 photo du drone vue de droite

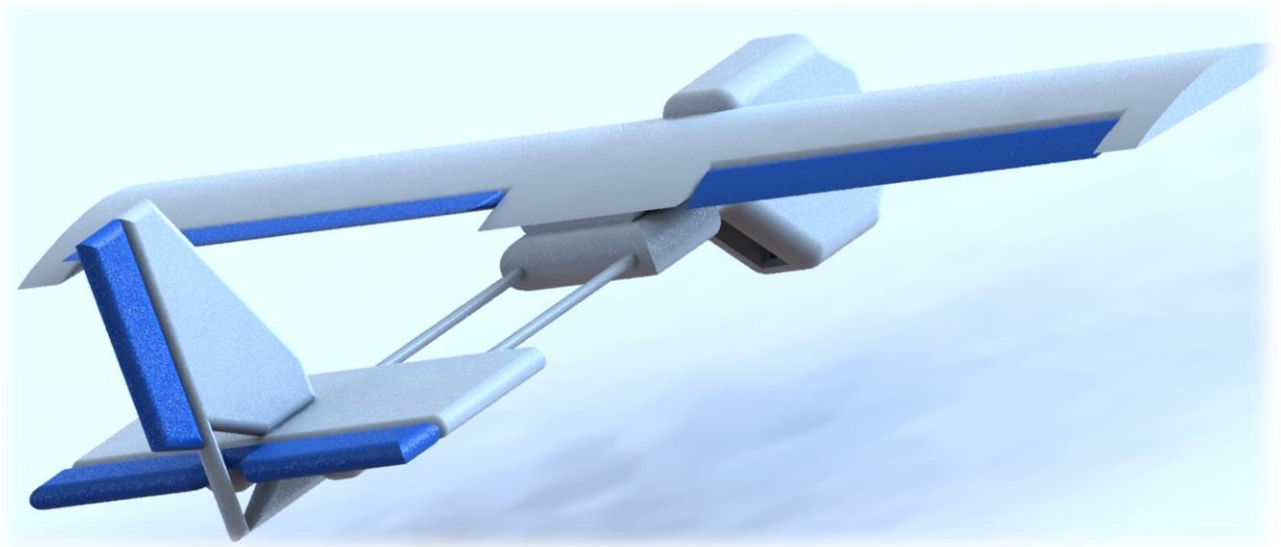


Figure 126 photo du drone vue de derrière

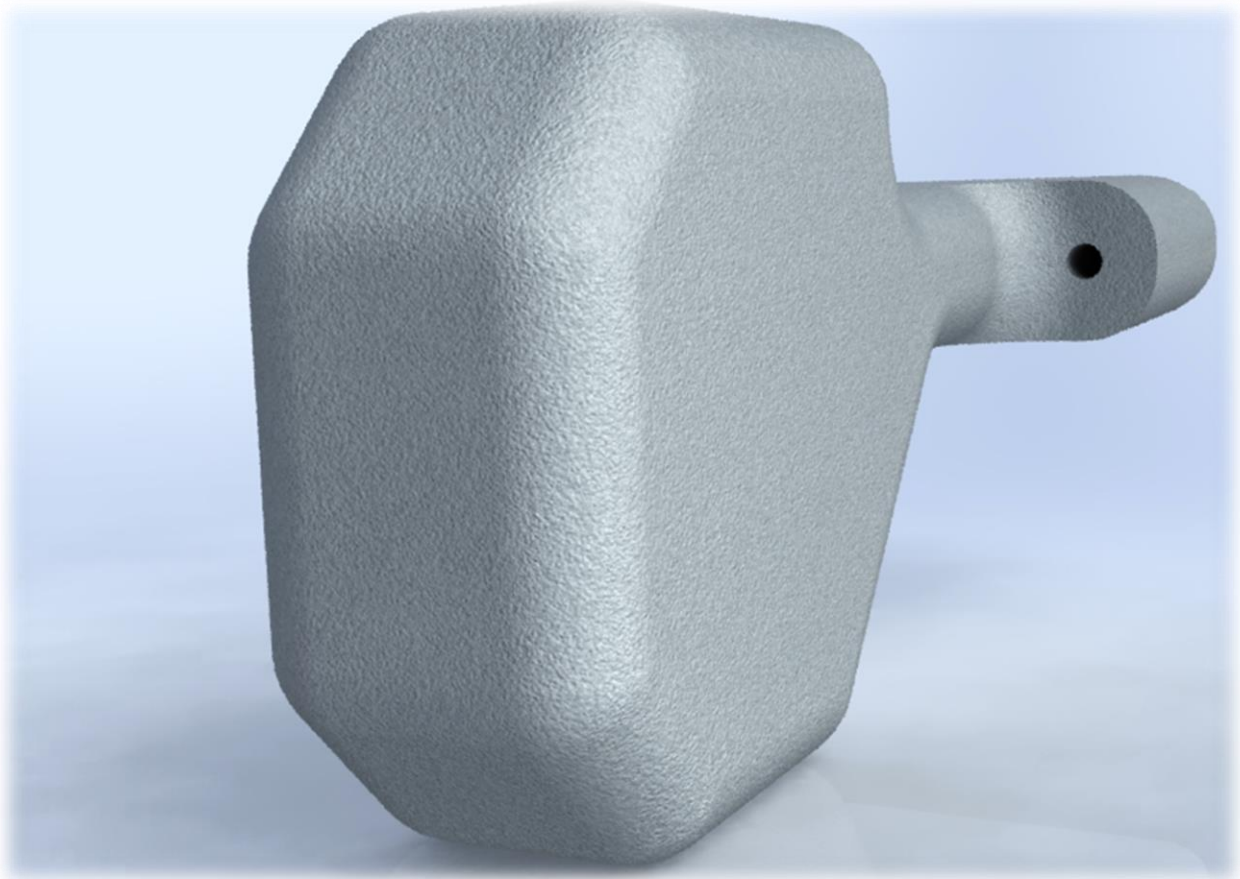


Figure 127 structure du fuselage

Bibliographie

[3] Arturo Tadeo Espinoza-Fraire, Alejandro Enrique Dzúl López, Ricardo Pavel Parada Morado, José Armando Sáenz Esqueda, Design of Control Laws and State Observers for Fixed-Wing UAVs, ELSEVIER.

Webographie

- [1] Reference drone, [Histoire du drone - Référence drone \(reference-drone.fr\)](https://reference-drone.fr), 10/05/2024.
- [2] Le berry republicain , [Le drone est né à Avord il y a cent ans - Avord \(18520\) \(leberry.fr\)](https://leberry.fr) ,10/05/2024.
- [4] UASolution, [Quels sont les différents types de drones? - UASolutions Sarl](https://uasolutions.com) ,21/05/2024.
- [5] Planeur Grand Nancy , [Les planeurs du Club – Planeur Grand Nancy \(planeurnancy.com\)](https://planeurnancy.com),21/05/2024.
- [6] Aero-modelisme.com, [Sortie de grenier : le Sporty 2 de Simprop Electronic - aero-modelisme.com](https://aero-modelisme.com),21/05/2024.
- [7] Fédération française d'aéromodélisme, [FFAM - Fédération Française d'Aéromodélisme](https://ffam.fr),21/05/2024.
- [8] L'avionnaire, [L'avionnaire site dédié à l'aviation \(lavionnaire.fr\)](https://lavionnaire.fr),05/06/2024.
- [9] Mécanique du vol, [La mécanique du vol \(free.fr\)](https://free.fr) ,05/06/2024.
- [10] Airfoil Tools, [NACA 4415 \(naca4415-il\) \(airfoiltools.com\)](https://airfoiltools.com) , 02/05/2024.
- [11] RouDev impression , <https://www.rouxdev.com/glossaire/quest-ce-que-le-papier-kraft/> , 05/09/2024.
- [12] Reve De Pierre , [Calculateur fil résistif en ligne, température, tension et courant d'alimentation \(reve-de-pierre.fr\)](https://reve-de-pierre.fr), 18/04/2024.
- [13] Arduino, [Arduino - Home](https://arduino.cc), 10/03/2024.
- [14] Technic-achat blog, [Découvrez qu'est ce que le PID - blog technic-achat](https://technic-achat.com), 10/09/2024.
- [15] passion électronique, [Tutoriel L298N : fonctionnement, branchement, code arduino \(passionelectronique.fr\)](https://passionelectronique.fr), 12/08/2024.
- [16] ineedmotors, [China Customized Micro Vibration Motor Suppliers & Manufacturers & Factory - Made in China - Ineed Electronics \(ineedmotors.com\)](https://ineedmotors.com), 15/08/2024.
- [17] HONDA, http://125nsr.free.fr/accueil_debridageelectrique_leservomoteur.htm, 15/08/2024.