

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : électromécanique

Spécialité : mécatronique

THEME

Etude et réalisation d'un drone

Présenté par :

AOUN Zaki

DJEDDI Abderrahmane Adel

Promoteur : Pr. Djamel.Benazzouz

Promotion 2021- 2022

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné l'énergie, le courage et la patience pour atteindre nos objectifs et arriver au bout de ce chemin.

Nous donnons nos sincères remerciements à notre promoteur d. D.J. Ben Azzouz, qui a fait de gros efforts pour nous donner ses conseils et toutes les informations pour mener à bien notre projet.

Aussi, nous tenons à remercier Monsieur M. Adjrid de nous honorer de ses conseils et de son soutien en tant que Co-Promoteur

Nous tenons remercier aussi les membres du jury pour avoir exprimé leurs avis et leur intérêt et pour avoir évalué notre travail.

Enfin, Nous réservons nos sincères remerciements à nos chers collègues qui nous ont soutenus de près ou de loin pour mener à bien cet humble travail.



Dédicace

Je dédie ce mémoire de fin d'études pour ma famille, notamment pour :

Mes chers parents, n'eut été de leurs sacrifices (surtout dans des circonstances très difficiles) et leurs conseils et leur aide, je n'aurais pas atteint ce niveau. Ils y consacrent leur vie à notre éducation et notre complète réussite dans les études et dans la vie. Dieu les bénisse toute la vie.

Mes frères et sœurs (mohamed, abderrazak, nour elhouda, bouchra, rokia, wiam), tout au long de ce parcours d'études, ont toujours été pour moi des sources de motivation pour atteindre mon objectif, malgré certaines circonstances difficiles.

Que Dieu les guide et leur facilite la réussite de leurs études et de leurs projets futurs.

À tous les enseignants et professeurs qui ont supervisés mes études du primaire à l'université, grâce à eux j'ai pu gravir les échelons, jusqu'à ce niveau.

Enfin, je dédie chaque personne qui m'a aidé de ses conseils, en particulier mes chers amis (K. Mohamed Reda, B. Mohamed Amine, D. Yahia, B. Hamza, D. Mounir, M. Abderrahmen) qui m'ont permis de surmonter tous les obstacles qui se sont dressés sur mon chemin, du début jusqu'à la fin de ce parcours.

A. Djeddi



Dédicace

Je dédie ce mémoire de fin d'études pour ma famille, notamment pour :

Mes chers parents, n'eut été de leurs sacrifices (surtout dans des circonstances très difficiles) et leurs conseils et leur aide, je n'aurais pas atteint ce niveau. Us y consacrent leur vie à notre éducation et notre complète réussite dans les études et dans la vie. Dieu les bénisse

Toute la vie.

Mes frères et sœurs (Gussama, Filia, Abdenour),

Tout au long de ce parcours d'études, ont toujours été pour moi des sources de motivation pour atteindre mon objectif, malgré certaines circonstances difficiles.

Que Dieu les guide et leur facilite la réussite de leurs études et de leurs projets futurs.

A tous les enseignants et professeurs qui ont supervisés mes études Du primaire à l'université, grâce à eux j'ai pu gravir les échelons, jusqu'à ce niveau.

Enfin, je dédie chaque personne qui m'a aidé de ses conseils, en particulier

Mes chers amis (K. Mohamed Reda, B. Mohamed Amine, B. Omar, B. Chemseddine, B. Aimen, B. Hamza, D. Mounir, M. Abderrahmen, B. Uham, L. Nessrine, B. Fatiha, J. Hfida, J. Nourelhouda, H. Ferial, R. Linda, K. Ryma) qui m'ont permis de surmonter tous les obstacles qui se sont dressés sur mon chemin,

Du début jusqu'à la fin de ce parcours.

A. Zaki

Sommaire

Sommaire

Remerciement.....	I
Dédias.....	II
Sommaire	III
Liste des figures	V
List des abréviations	VII
Résumé	VIII
Références et Bibliographie	X
Annexe	XII

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art

I. 1.Introduction	2
I. 2.Généralités sur les drones	2
I.2.1.Historique des drones	2
I.2.2.Définition des drones	3
I.2.3.Différentes catégories des drones	4
I.2.3.1.Drone militaires de longue endurance	4
I.2.3.2.Drone tactiques (Tactical Unmanned Air Vehicle).....	6
I.2.3.3.Drone miniatures	8
I.2.3.4.Robot animal volant.....	9
I.2.3.5.Birotor.....	10
I.2.3.6.Trirotor.....	10
I.2.3.7.Multirotor.....	11
I. 2. 4.Avantages et Inconvénients	11
I. 3.Quadcopter	12
I. 3. 1.Description générale du quadcopter	12
I. 3. 2.Mouvements du quadcopter	13
I.3.2. 1 Mouvement vertical (throttle)	14
I.3.2. 2.Mouvement de roulis (roll)	14
I.3.2. 3.Mouvement de tangage (pitch)	15
I.3.2. 4.Mouvement de lacet (Yaw)	15
I.3.2. 5.Mouvement de translation horizontale	16
I. 3. 3.Domaine d'application de quadcopter	16
I. 3. 3. 1.Domaine militaire	16
I. 3. 3. 2.Domaine civil	17
I. 4.Conclusion	21

Chapitre II : Principe d'un quadcopter

II. 1.Introduction	22
II. 2.Fonctionnement du quadcopter	23
II. 3.Mécanique de vol	24
II.3. 1.Schématisation	24
II.3. 2.Mouvement du drone en l'absence de dissipation	24
II.3. 3.Paramétrisation des forces et couple des propulseurs	31
II. 4.COMMANDE PID	34
II. 5.Conclusion	35

Sommaire

Chapitre III : Equipements essentielles du quadcopter

III. 1. Introduction	36
III. 2.Arduino Nano	36
III. 3.MPU-6050	36
III. 4. Moteurs sans balais « brushless»	37
III. 5.ESC « électronique speed Controller ».....	39
III. 6.Batterie LIPO	40
III. 7.Hélices	40
III. 8.Module radio NRF24L01	42
III. 9. Joysticks	42
III. 10.Châssis	43
III. 11. Conclusion	44

Chapitre IV : réalisation du quadcopter

IV. 1.Introduction	44
IV. 2. Réalisation du l'émetteur RF	44
IV. 3. Réalisation du récepteur RF 2.4 GHz	46
IV. 4. Contrôleur de vol du quadcopter	48
IV. 5. Conclusion	50
Conclusion générale	51

List des figures

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art

Figure1. 1: General Atomics MQ-9	5
Figure1. 2: RQ-170 Sentinel	6
Figure1. 3: Drone Tactique RQ-7 Shadow.....	7
Figure1. 4: Drone solaire Facebook « Aquila ».	7
Figure1. 5: Drone miniature (nano drone UAV).	8
Figure1. 6: Robot chauve-souris volante « BAT BOT B2 ».	9
Figure1.7:(a)Hélicoptère Yamaha air max, (b) Hovereye de bertrintechnologieet (c) Auryon.....	10
Figure1. 8: (a) Trirotor(b)Vectron et (c) Hélicoptère auto stable.....	11
Figure1. 9: Drone Multirotors.....	11
Figure1. 10: Mouvements de bases du quadcopter	13
Figure1. 11: Illustration du mouvement vertical.....	14
Figure1. 12: Illustration du mouvement de roulis.....	15
Figure1. 13: Illustration du mouvement de tangage	15
Figure1. 14: Illustration du mouvement lacet	16
Figure1. 15: Illustration du mouvement de translation horizontal	16
Figure1. 16: Drone pour la photographie	17
Figure1. 17: Drone pour la recherche	18
Figure1. 18: Drone pour l'agriculture.....	18
Figure1. 19: Drone pour livraison et expédition.....	19
Figure1. 20: Drone pour l'ingénierie	19
Figure1. 21: Drone pour la cartographie 3D	20
Figure1. 22: Drone pour la sécurité	20
Figure1. 23: Drone pour la recherche des sciences naturelles	21

Chapitre II : Principe d'un quadcopter

Figure2. 1: Schéma explicatif des axes	24
Figure2. 2: Type des hélices.....	27
Figure2. 3:Schéma d'une hélice avec l'axe de rotation d	32
Figure2. 4: Géométrie d'une hélice avec le principe de Bernoulli.....	32
Figure2. 5: Architecture parallèle d'un correcteur PID.....	35

Chapitre III : Equipements essentielles du quadcopter

Figure3. 1: Arduino Nano.....	36
Figure3. 2: MPU-6050	37
Figure3. 3: Moteur brushless A2212/13T et Structure interne d'un BLDC.....	38
Figure3. 4: Schéma d'un moteur brushless.....	38
Figure3. 5: Electronique Speed Controller	40
Figure3. 6: Batterie LIPO	40
Figure3. 7: Hélice DJI 8045	41
Figure3. 8: NRF24L01 PA et NRF24L01	42
Figure3. 9: Joystick	43

List des figures

Figure3. 10: Châssis de drone 44

Chapitre IV : réalisation du quadcopter

Figure4.1:Emetteur RF.....44

Figure 4. 2: Câblage de l'émetteur RF 44

Figure 4. 3: Schéma électronique de l'émetteur RF 2.4 GHz..... 44

Figure 4. 4: Capture d'écran des valeurs analogiques affichées sur le moniteur série de l'Arduino IDE..... 45

Figure4.5: Algorithme de transmetteur RF.....46

Figure 4.6 :Transmetteur RF.....46

Figure 4. 7: Câblage de récepteur RF 46

Figure 4. 8: Schéma électronique de récepteur RF 2.4 GHz 47

Figure 4. 9: Valeurs afficher sur le moniteur série de l'Arduino IDE des signaux PWM 48

Figure 4.10: Algorithme de récepteur 48

Figure 4. 11: Câblage de contrôleur de vol du quadcopter. 49

Figure 4.12: Câblage complet du quadcopter.....49

List des abérviation

List des abréviations

VTUAV: Vertical Take-Off and Landing Tactical UAV.

RPV: remotely piloted vehicles.

SUA: small-unmanned aircraft.

RPAS: remote piloted aircraft systems.

UAS: unmanned air systems.

UA: Unmanneed aircraft.

UAV : Unmanned Aerial Vehicle.

Aéronef : Tout appareil, conçu par l'homme, capable de s'élever ou de circuler dans les airs.

Sous-marin : est un navire submersible qui se déplace dans trois dimensions, en surface et sous l'eau. Inventé en 1624 par Cornelis Drebbel.

IA : intelligence artificiel

LIPO : lithium polymère.

ESC : électronique speed controller.

MALE : moyenne altitude et longue endurance.

HALE : haute altitude et longue endurance.

GPS : global positioning system.

DDL : degrés de liberté.

RF : radio fréquence.

IMU : unité de mesure inertielle.

RPM : rotation par minute.

PCM : protection circuit module.

FEM : force electromotrice

MEMS : micro électromecanique système

I2C : inter integrated circuit

Résumé

Ces dernières années, les avions connus sous le nom de drones ou UAV sont devenus une partie importante de la vie quotidienne. Leurs domaines d'application sont très divers, allant des plus simples aux plus sensibles. En effet, ils sont aujourd'hui utilisés aussi bien dans la vie de chacun d'entre nous (ex : livraison de colis ou comme la photographie) plus que dans la vie professionnelle (Drones de combat par exemple). Ces drones sont contrôlés à distance via des liens sans fil à différentes portées (de quelques mètres à des dizaines de milliers de kilomètres). Les petits drones utilisent généralement des moteurs électriques sans balais (brushless). Ils sont alimentés par des batteries LIPO et régulateurs de vitesse électroniques (ESC). L'autonomie de ces petits drones est un défi qu'il faut relever.

Ainsi notre projet de fin d'études sert à réaliser un drone quadcopter télécommandé avec un émetteur-récepteur RF. Le but est bien entendu de s'assurer un vol stable à moyenne altitude et longue endurance.

Abstract

In recent years, aircraft known as drones or UAVs have become an important part of everyday life. Their fields of application are very diverse, ranging from the simplest to the most sensitive. Indeed, they are used today both in the life of each of us (eg: parcel delivery or as a photographer) more than in professional life (combat drones for example). These drones are remotely controlled via wireless links at different ranges (from a few meters to tens of thousands of kilometers). Small drones generally use brushless electric motors. LIPO batteries and electronic speed controllers (ESC) power them. The autonomy of these small drones is a challenge that must be met.

Thus, our end-of-studies project is used to make a remote-controlled quadcopter drone with an RF transceiver. The goal is of course to ensure a stable flight at medium altitude and long endurance.

Résumé

في السنوات الأخيرة، أصبحت الطائرات المعروفة باسم الطائرات بدون طيار جزءًا مهمًا من الحياة اليومية. مجالات تطبيقهم متنوعة للغاية، وتتراوح من الأبسط إلى الأكثر حساسية. في الواقع، يتم استخدامها اليوم في حياة كل منا (على سبيل المثال: تسليم الطرود أو التصوير الفوتوغرافي) أكثر من الحياة المهنية (الطائرات القتالية بدون طيار على سبيل المثال). يتم التحكم في هذه الطائرات بدون طيار عن بعد عبر روابط لاسلكية على نطاقات مختلفة (من بضعة أمتار إلى عشرات الآلاف من الكيلومترات). تستخدم الطائرات الصغيرة بدون طيار بشكل عام محركات كهربائية بدون فرش. يتم تشغيلها بواسطة بطاريات LIPO ووحدات التحكم الإلكترونية في السرعة (ESC). إن استقلالية هذه الطائرات الصغيرة بدون طيار هو تحدٍ يجب رفعه.

وبالتالي، يهدف مشروع نهاية الدراسة الخاص بنا لصنع طائرة بدون طيار رباعية المروحية يتم التحكم فيها عن بعد بجهاز إرسال واستقبال RF. الهدف بالطبع هو ضمان رحلة مستقرة على ارتفاع متوسط وقدرة على التحمل لفترات طويلة.



Introduction générale

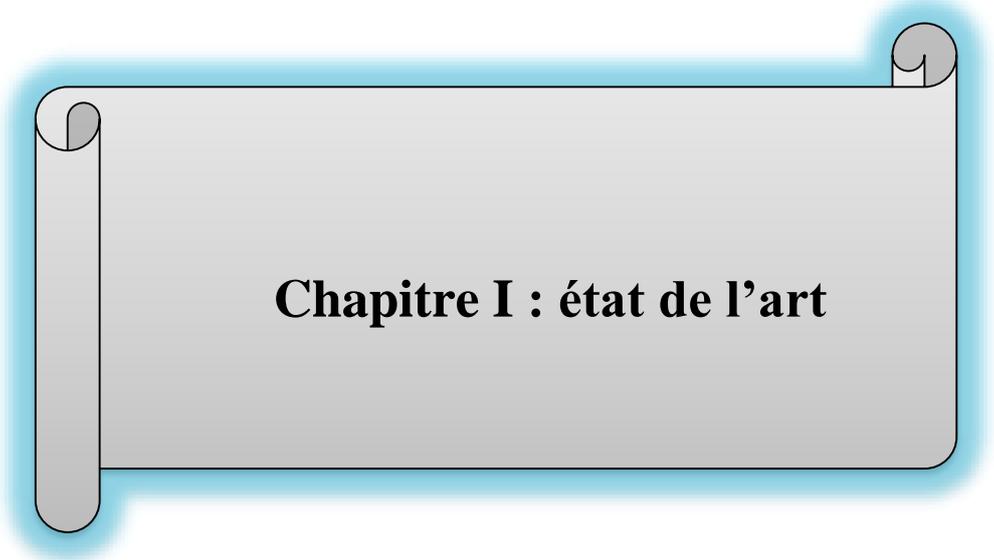
Introduction générale

Les drones ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sont des aéronefs sans pilote capables de réaliser des tâches de manière autonome et automatique. Depuis quelques années, le développement des drones se poursuit grâce aux progrès remarquables aux domaines des systèmes embarqués comme la miniaturisation des capteurs et actionneurs et l'évolution des ordinateurs numériques.

Parmi les drones, on distingue le quadcopter qui est le plus populaires car ces formidables utilisation comme : Missions d'observation et de surveillance, prises de vue aériennes, la poursuite, l'espionnage, contrôle de l'état d'un édifice difficilement accessible ou même le transport de marchandise.

Le but de ce mémoire est l'étude et la réalisation d'un drone quadcopter piloté par l'intermédiaire d'une radiocommande. Il est structuré comme suit :

- Le premier chapitre donne des généralités sur les drones, et en particulier les drones quadcopters.
- Le deuxième chapitre est consacré au principe d'un quadcopter.
- Le troisième chapitre est consacré aux équipements essentiels du quadcopter.
- Le dernier chapitre est destiné à la réalisation d'un quadcopter à base d'Arduino.



Chapitre I : état de l'art

I.1.Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier étapes les généralités, l'évolution historique, les catégories ainsi que les avantages et inconvénients qui concernent les drones, En deuxième partie, on donnera un aperçu sur le quadcopter, ses mouvements et ses domaines d'applications.

I.2.Généralités sur les drones

I.2.1.Historique des drones

L'intérêt actuel pour les drones ne doit pas masquer le fait qu'ils ont déjà une longue histoire : au cours de la Première Guerre mondiale, quelques spécialistes audacieux ont réussi à faire voler des avions-cibles radiocommandés, sans pilote à bord.

Ce paragraphe retrace brièvement l'évolution des drones depuis leur création jusqu'à nos jours. Elle permettra notamment au lecteur de se rendre compte que, comme pour de nombreuses technologies, les drones ont été avant tout du matériel militaire et que leur utilisation n'a que récemment basculé dans le domaine civil. L'histoire des drones a commencée en 1916, et le premier projet était de créer des appareils sans pilote pour servir d'avion cible pour la formation des pilotes de l'armée britannique. En 1917, les Français furent les premiers à piloter un avion sans intervention humaine sur une distance d'un kilomètre. Depuis ce jour, la technologie n'a cessé d'évoluer et de s'améliorer, elle est devenue plus complexe et mortelle. Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'utilisation de drones tels que les V1 et V2 (missiles autoguidés allemands) est devenue populaire. D'autres types de drones aux usages plus diversifiés tels que la reconnaissance et l'entraînement au tir sont apparus dans les années 1950, notamment le Ryan FireBee qui a été utilisé pendant la guerre du Vietnam [1].

Par la suite, les Américains et de nombreux autres pays ont développé une flotte très diversifiée de drones allant des hélicoptères de surveillance (Northrop Grumman, Black Hornet Nano, etc.) aux avions de combat (USAF Reaper, Global Hawk, Dassault Neuron, ...) en passant par les avions. Drone aérospatial (Boeing X-37B). Ce n'est que dans les années 1990 que la sous-estimation des technologies de communication sans fil et l'avènement de capteurs abordables ont permis le développement de drones civils par des entreprises privées [1].

Mais pendant la Seconde Guerre mondiale, face aux pertes importantes de l'aviation de surveillance à chacun des adversaires, l'idée de développer des véhicules de surveillance sans pilote (sans pilote et sans observateur) est née, dans le but d'applications

opérationnelles. Cependant, la sensibilité de leurs systèmes de guidage au brouillage rendait leur utilisation difficile, voire impossible [1].

Puis l'arrivée des ordinateurs (l'informatique) dans les années 1960 a permis d'imaginer des machines autonomes capables d'opérer sur une zone précise afin de recueillir des informations précieuses. C'est à cette époque qu'apparaissent en France les premiers drones européens, comme le R20 développé par Nord-Aviation et dérivé du dispositif cible CT20 utilisé comme cible pour les avions de combat ou les missiles. Conçu pour la surveillance du champ de bataille, le drone de reconnaissance R20, qui a fonctionné de 1966 à 1976, est doté d'un programme de vol interne, le rendant insensible aux interférences [1].

De plus, des avancées importantes dans des domaines tels que l'informatique, la robotique, l'optoélectronique, les images radar ou encore la transmission de données ont permis d'étendre l'utilisation des drones à des tâches de plus en plus diversifiées. De plus, le concept d'une lutte « zéro mort », d'origine américaine, en fait la volonté de limiter strictement les pertes humaines, ne peut qu'amplifier l'utilisation de ces dispositifs.

Depuis le début des années 2000, le rôle des drones n'a cessé de croître ; Ils occupent désormais une place centrale dans les opérations militaires. En 2003, lors de la deuxième guerre d'Irak, les Américains ont utilisé des drones comme pièges pour découvrir les défenses aériennes de Bagdad. Lors du conflit en Afghanistan (2001-2014), plus de 600 drones de différents types ont été déployés, certains armés de missiles ou de bombes à guidage laser. Depuis 2013, la France déploie des M.A.L.E (Moyenne altitude et Longue Endurance) non armés pour ses opérations [1].

Enfin, Les drones interviennent maintenant dans tous les domaines où l'humanité opère, et avec des progrès continus dans les technologies.

I.2.2.Définition des drones

Le mot "drone" est une extrapolation d'un terme anglais signifiant "un drone". En français, le terme est utilisé pour désigner des véhicules aériens, terrestres, de surface ou sous-marins, une unité d'exploration spatiale peut être classée comme un drone, tandis que la classification anglo-saxonne caractérise chaque type d'appareil.

Cependant, il existe de nombreux termes spécifiques qui définissent les aéronefs télépilotés en fonction de leurs spécificités. Le terme le plus courant est UAV (Unmanned Aerial Vehicle), il désigne un aéronef capable de fonctionner sans pilote à bord, et il regroupe tous les types de drones sans aucune distinction. La définition de l'OACI sert de référence à de nombreux organismes, mais certains pays comme le Royaume-Uni préfèrent utiliser

l'abréviation UA (Unmanned Aircraft). Le mot UAS (Unmanned Aircraft Systems), largement utilisé par les militaires, fait référence au drone lui-même et à tous les éléments sans pilote à bord. Une sous-classe de drones est appelée RPAS (Remote Piloted Aircraft Systems). Il s'agit de drones qui ne sont pas totalement autonomes, c'est-à-dire d'avions qui ont toujours un pilote aux commandes derrière l'électronique. RPAS désigne à la fois l'appareil, les moyens de communication et la ou les stations au sol. [6]

Enfin, on retrouve le terme SUA (en anglais « small unmanned aircraft ») qui est une sous-catégorie de drones dont le poids n'excède pas 20 kg à vide. Autres termes rares tels que RPV (Remotely Piloted Vehicles) ou VTUAV (Vertical Take-off and Landing Tactical UAV), le Bureau du Secrétaire à la Défense fournit une liste de tous ces acronymes. Tous ces termes ne sont pas exclusifs les uns des autres, en effet le drone peut être par exemple un SUA et RPAS au même temps (ce qui sera notre cas dans la suite de ce mémoire). Mais dans ce document, nous désignerons nos avions sans pilote par les termes « drones » et « UAV » pour faciliter la compréhension du lecteur et éviter d'avoir à penser systématiquement à une catégorie particulière. [6]

I.2.3. Différentes types de drone

Tous les drones n'ont pas les mêmes capacités selon les besoins, et ils peuvent avoir n'importe quel type de taille allant de la taille d'un avion à la taille d'un insecte. La classification des drones est basée sur plusieurs critères tels que leurs longueurs, hauteurs, temps de vol, poids, autonomie, portée, altitude, mission, systèmes de contrôle, taille, mode de poussée, etc... Les Australiens, par exemple, les classent selon leur masse, lourde ou légère, et les américains les classent selon leur taille. Il existe donc plusieurs classes de drones. [2]

I.2.3.1. Drones militaires de longue endurance

Les drones militaires sont utilisés pour des missions de reconnaissance et sont généralement très dangereux pour les soldats. Il est très populaire parmi les grandes puissances militaires telles que les États-Unis, la France et l'Angleterre. En effet, des drones patrouillent actuellement au Moyen-Orient pour démanteler des réseaux terroristes. Avec des temps de vol compris entre 12 et 48 heures, on rentre ici dans la catégorie des "gros" drones, dont la taille est principalement déterminée par une charge utile et une quantité importante de carburant nécessaire pour regagner leur lieu de lancement [2]. Cette même catégorie est divisée en deux parties, en fonction de l'altitude de vol, de sorte que plus

l'altitude de vol n'est élevée, plus la vitesse et la distance parcourue sont importantes. On distingue deux types de drones :

‘‘MALE’’ (Longue Endurance à Moyenne Altitude).

‘‘HALE’’ (Longue Endurance pour Haute Altitude).

a) Drones MALE ‘‘le General Atomics MQ-9’’

Ce type de drone de combat Figure 1.1 peut atteindre une vitesse de 480 km/h, et peut être contrôlé jusqu'à 1 850 km par deux contrôleurs au sol ou au moyen d'une liaison satellite. Il pèse un peu plus de 2 tonnes et peut atteindre une hauteur de 15 kilomètres avec une autonomie de 30 heures. Il peut également emporter six missiles et deux bombes, ce type de drone est utilisé en temps de guerre pour l'espionnage mais il peut aussi servir de lance-missiles. La NASA utilise également un modèle non armé mais bourré de capteurs et de caméras et destiné à la recherche scientifique.[3]



Figure 1.1: General Atomics MQ-9

Dès le début, les Américains ont conçu des systèmes M.A.L.E en fonction de la taille de leurs théâtres d'opération dans le but non seulement de tâches de reconnaissance, mais aussi d'identifier et de détruire des cibles au sol.

b) Drones HALE ‘RQ-170 Sentinel’

RQ-170 Sentinel Figure 1.2 est un véhicule aérien sans pilote à haute altitude et longue endurance. C'est un drone furtif développé par Lockheed Martin et exploité par l'United States Air Force (USAF), dans cette catégorie on atteint les dimensions d'un avion civil (Airbus A320 par exemple) pour une autonomie de 10 000 km et plus. La masse des drones HALE dépasse environ 10 tonnes au décollage, dont 10% de charge utile.



Figure 1.2: RQ-170 Sentinel

Environ 90% des avions sont fabriqués en matériaux composites pour réduire leur poids global.

Le RQ-170 peut fournir à ses opérateurs des données de renseignement en temps réel en effectuant une surveillance sur une vaste zone. Ce drone peut prendre des photos en temps réel puis les transmettre à une station de contrôle au sol via des lignes de communication. Le RQ-170 a été déployé dans des zones hostiles pour des missions de surveillance et de renseignement et pour exploiter une liberté durable, les capacités des drones HALE doivent être rapprochées et comparées à celles des avions guidés de type d'un avion espion U2 (fantôme) ou avions de renseignement électronique, et aussi des avions de surveillance ou satellites d'alerte. [2]

I.2.3.2. Drones tactiques (Tactical Unmanned Air Vehicle)

Les drones tactiques **Figure 1.3** sont des drones militaires capables de décoller et d'atterrir sur de courtes distances, propulsés par un moteur bicylindre. Il est propulsé au décollage par une catapulte pneumatique.



Figure 1.3: Drone Tactique RQ-7 Shadow

L'atterrissage s'effectue à l'aide d'un parachute et d'airbags placés sous les ailes. Il peut voler de 5 à 8 heures et à une vitesse d'environ 175 km/h et voler à une altitude de 3 à 5 km, à une portée de 30 à 500 km. Il existe plusieurs classes de drones tactiques tels que : AEROSTAR, AERONAUTICS DEFENSE SYSTEMS, RQ-7 Shadow, Sperwer, Hermes, Watchkeeper.... etc. Ce type de drone comprend un ensemble de caméras gyroscopiques et thermiques qui permettent de prendre des images aériennes en lumière visible et infrarouge, et sont utilisées pour la reconnaissance, la surveillance, l'acquisition de cibles et l'évaluation des dommages au combat. [3]

a) Drone solaire "Aquila"

En juillet 2016, Facebook dévoilait son prototype de drone solaire destiné à diffuser l'internet haut débit dans des zones non desservies ou disposant d'un accès de mauvaise qualité, le réseau social vient d'annoncer avoir accompli avec succès le premier vol d'essai d'un modèle à taille réelle.



Figure 1.4: Drone solaire Facebook « Aquila ».

Baptisé Aquila (nom latin signifiant « aigle ») **Figure 1.4** L'engin se présente comme un drone d'une envergure de 42 mètres, plus grand qu'un Airbus A320 et pèse 1 468 kg. Ce drone photovoltaïque est censé pouvoir voler pendant 90 jours à des altitudes comprises entre 18 et 27 kilomètres en diffusant un accès internet au sol dans un rayon d'un peu moins de 100 kilomètres. [3]

Facebook indique que le drone, qui volait à environ 40 km/h, a dissipé un peu moins de 2 000 watts. Selon l'équipe responsable du projet Aquila, valide les simulations aérodynamiques et ses options techniques pour le système de propulsion. Aquila devrait être utilisé pour fournir une connectivité internet dans des régions reculées du monde, et les ingénieurs de Facebook espèrent que ce type d'avion pourra voler pendant plusieurs mois sans aucun ravitaillement, grâce à sa très faible consommation d'énergie, l'équivalent de trois sèche-cheveux. [3]

I.2.3.3. Drones miniatures

La course à la miniaturisation ne cesse de croître, et la catégorie des mini drones recouvre généralement tous les drones d'une envergure inférieure à 50 cm, dans ce cas on parle des mini-drones.



Figure1. 5: Drone miniature (nano drone UAV).

En général, ils sont peu autonomes, mais jouent souvent le rôle de télescope, Par exemple pour l'observation au-dessus d'un obstacle ou dans une zone dangereuse. Des petits drones de dimensions inférieures à 15 centimètres, pesant environ 50 grammes, une vitesse de croisière d'environ 50 km/h et une autonomie d'une dizaine de kilomètres. [3]

Ces micro-drones sont destinés à transmettre des images de jour comme de nuit. Les tâches envisagées sont, par exemple, l'évaluation des dommages ou l'observation d'une cible fixe, etc.

I.2.3.4. Robot animal volant "BAT BOT B2"

En 2006, une équipe nord-américaine a développé un drone qui imite fidèlement le vol des chauves-souris.

Une avancée qui permettrait d'étudier au plus près le système musculo-squelettique massif de cet animal, mais aussi de concevoir des robots plus sûrs et plus efficaces. Reproduire la cinématique des ailes d'oiseaux en robotique présente un défi technique complexe. Mais ils viennent de présenter la dernière version de leur avion appelée "Bat Bot B2", **Figure1.6.** [3]



Figure 1.6: Robot chauve-souris volante "BAT BOT B2".

Pèse seulement 93 grammes contre 47 centimètres d'envergure, le "Bot Bot" est contrôlé par des moteurs miniatures placés dans la colonne vertébrale. Les ailes sont recouvertes d'une membrane en silicone spécialement développée de 56 microns d'épaisseur qui reproduit la souplesse naturelle des ailes de chauve-souris.

Les chercheurs disent avoir identifié cinq mouvements dominants dans le battement d'aile d'une chauve-souris, qu'ils ont exécutés pour reproduire environ 57% des mouvements originaux. Lors du test, le Bat Bot B2 a volé une trentaine de mètres, effectué des virages et des piqués. Plusieurs mouvements sont censés reproduire partiellement les techniques de chasse aux chauves-souris. [3]

Le but principal de ce drone est de travailler sur l'étude plus précise du vol d'une chauve-souris. Les concepteurs de « Bat Bot » ajoutent que cette configuration offrira également une meilleure sécurité que les drones quadrotor dans des environnements où il existe un risque de collision avec des personnes ou des objets. Le « Bat Bot » continuera à être développé dans le but particulier de reproduire la capacité des chauves-souris à s'asseoir verticalement vers le bas. [3]

I.2.3.5. Birotors

Il existe plusieurs types de configurations à deux rotors comme l'hélicoptère classique qui se compose d'un rotor principal et d'un rotor de queue (Fig. 1.7(a)). Il existe également des appareils à deux rotors sur le même axe tournant en sens opposés, comme le Hover-Eye produit et commercialisé par Bertrin Technology (Fig. 1.7 (b)), et le drone à mécanisme rotatif coaxial à double et variable rotation, développé par l'équipe AURYON (Figure 1.7 (c)). [4]

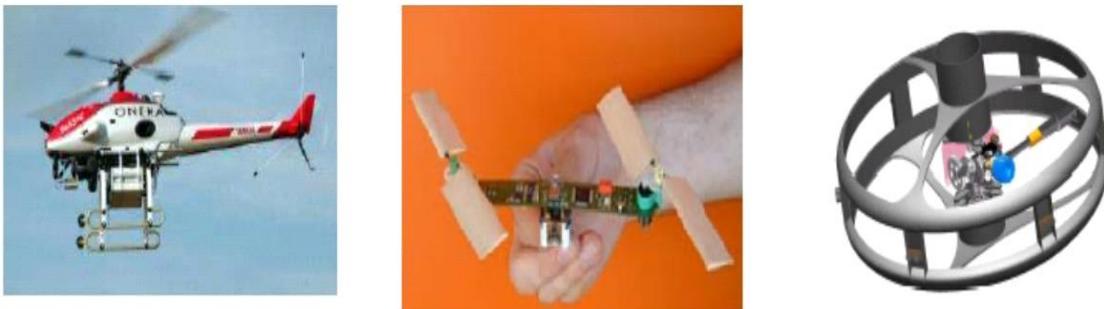


Fig. 1.7: a-Hélicoptère Yamaha air max, b-Hovereye de bertrintechnologie c-Auryon

I.2.3.6. Trirotors

Il existe trois catégories de drones à trois rotors : les trirotors, les Vectrons et les hélicoptères autonomes. Le Trirotor a deux rotors à l'avant, tourne dans des directions opposées, et un rotor à l'arrière, qui peut être orienté. Le fonctionnement est similaire à celui d'un quadcoptère, mais les performances de vol ne sont pas très satisfaisantes (**Figure 1.8(a)**). [4]

Vectron se compose de trois rotors qui tournent dans le même sens, ce qui fait tourner l'appareil dans des sens opposés. Il dispose d'un moteur à vitesse variable très précis pour obtenir un couple de tangage et de roulis (Figure 1.8(b)).

Un hélicoptère auto-stabilisateur, appelé "Blade Runner", se compose de deux rotors à pas fixe montés sur le même axe et tournant dans des directions opposées (Figure 1.8(c)). Le tangage est obtenu grâce au rotor situé à l'arrière de l'appareil. Cet appareil est destiné à une utilisation en intérieur uniquement. [4]



Figure 1.8: a-Trirotor b-Vectron c-Hélicoptère auto stable.

I.2.3.7. Multirotors

Ce type d'avion se compose de plusieurs rotors qui tournent dans une direction, basculés par paires pour compenser le couple de réaction, et les changements de vitesse du moteur assurent un mouvement correct du véhicule. [4]



Figure1. 9: Drone Multirotors

I.2.4. Avantages et Inconvénients

- **Avantage :**
 - 100 % écologique
 - Déploiement facile et rapide : Le décollage s'effectue en quelques minutes.
 - Plusieurs points d'élévation possibles en quelques heures (selon la distance).
 - Qualité d'enregistrement (au moins 4K), stabilité, excellente liquidité
 - Proximité du sujet à filmer ou à photographier (quelques mètres ou moins)
 - La vitesse d'évolution proche des 50 km/h
 - Grâce à sa mobilité et sa réactivité, une large palette de développements thématiques
 - Vol très précis (ou vol retour) du même point de vue, grâce au GPS.

- Autonomie par vol ± 30 minutes selon le drone et les conditions météorologiques et climatiques
- Très large gamme de systèmes de prise de vue
- DJI Mini2 vous permet de faire voler au-dessus des personnes, des animaux et des bâtiments
- Champ d'action variable selon les scénarios
- Accès à distance aux zones dangereuses ou infranchissables

Opérationnel dans toute l'Europe. [5]

- **Inconvénients :**

- Pour de bons résultats dans la séquence, les conditions météorologiques, notamment le vent, doivent être à portée du drone.
- Pluie, les drones n'aiment pas l'eau ! En revanche, ils résistent à la neige, au froid et aux très hautes altitudes (sous certaines conditions)
- Pas de survol direct de personnes ou d'animaux avec des drones autres que le DJI Mini 2 (distance minimale de 3 m en mode lent pour les autres drones plus lourds).
- Les vols de nuit sont limités en fonction des conditions et des machines. (Les vols de nuit sont définis comme ayant lieu 30 minutes avant ou après le lever ou le coucher du soleil.
- Les survols dans les grandes villes sont soumis à des restrictions régionales et nécessitent une autorisation préalable. (Surtout près de l'aéroport). [5]

I.3. QUADCOPTER

I.3.1. Description générale du quadcopter

Un quadcopter est un robot aérien en mouvement avec quatre rotors définis par six degrés de liberté dans l'espace (3 axes X, Y, Z) **Figure. 1.10**. Ces quatre rotors sont généralement placés aux extrémités d'un châssis (croix), et l'électronique de commande est généralement placée au centre du châssis (croix). Afin d'éviter que l'appareil ne s'enroule sur lui-même sur son axe, il faut que deux hélices tournent dans un sens, et que les deux autres dans le même sens soient placées aux extrémités opposées de la branche de châssis.

Piloter un quadcopter très spécial. [7]

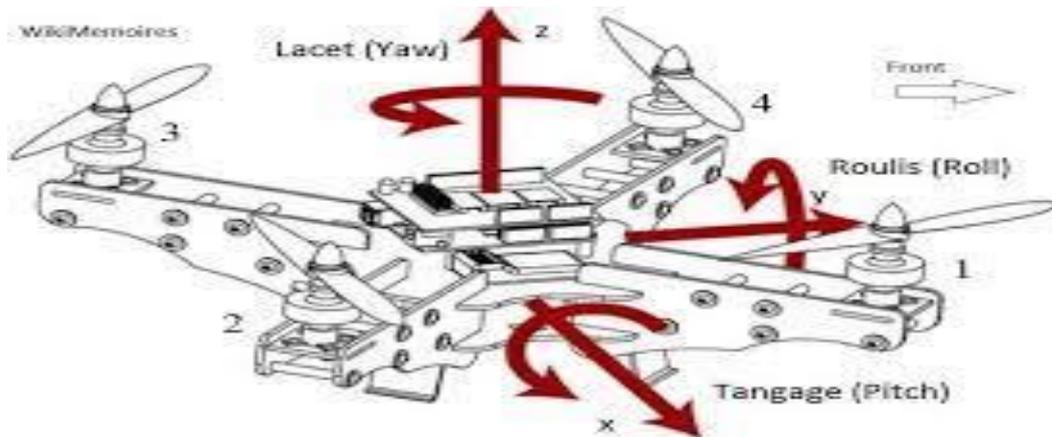


Figure 1.10: Mouvements de bases du quadcopter

En modifiant astucieusement la puissance des moteurs, il est possible de le faire monter/descendre de l'incliner à gauche/droite (roulis) ou en avant/arrière (tangage) ou encore de la faire pivoter sur lui-même (lacet). Le quadcopter a six degrés de liberté, trois mouvement de rotation et trois mouvement de translation, ces six degrés doivent être contrôlés à l'aide de seulement quatre actionneurs, donc c'est un système passif (le nombre des entrées inférieure au nombre des sorties).

I.3.2. Mouvements du quadcopter

Dans les hélicoptères conventionnels, lorsque le rotor principal tourne, il produit un couple réactif qui ferait tourner le corps de l'hélicoptère dans le sens opposé si ce couple n'était pas opposé, généralement en ajoutant un rotor arrière qui produit une poussée latérale. Cependant, ce rotor avec son alimentation électrique associée ne contribue pas à la poussée. En revanche, dans le cas d'un quadricoptère. Le rotor droit et le rotor gauche tournent dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens opposé des rotors avant et arrière, ce qui neutralise efficacement le couple réactif indésirable et permet à la véhicule de planer sans perdre le contrôle. De plus, contrairement aux hélicoptères conventionnels, toute l'énergie dépensée pour contrer le mouvement de rotation contribue à la poussée. [8.11]

Les mouvements de base du quadricoptère sont obtenus en modifiant la vitesse de chaque rotor et en modifiant ainsi la poussée résultante, en inclinant le quadricoptère vers la direction du rotor le plus lent. Qui prend alors en compte la translation selon cet axe, ainsi, comme avec un hélicoptère classique, les mouvements sont couplés, ce qui signifie qu'un quadricoptère ne peut pas réaliser de translation sans roulement ou tangage, ce qui signifie que changer la vitesse du rotor se traduit par un mouvement de trois degrés Au moins de la liberté. Par exemple. L'augmentation de la vitesse du propulseur gauche entraînera un mouvement de roulis (le quadcopter incline vers le rotor plus lent, vers la droite).

Mouvement de lacet (l'équilibre entre les rotors dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre est perturbé, ce qui entraîne un mouvement de rotation horizontal). Et la translation (le mouvement de rotation tend le moteur et avec lui la direction de la poussée). Ce couplage est la raison pour laquelle nous pouvons contrôler six degrés de liberté avec seulement quatre commandes (couple appliqué par les actionneurs à chaque propulseur) [8.11]. Le quadcopter à cinq mouvements principaux :

Mouvement vertical (THROTTLE). Mouvement de roulis (ROLL). Mouvement de tangage (PITCH). Mouvement de lacet (YAW). Et translations horizontales.

I.3.2.1. Mouvement vertical (throttle)

Afin de planer. Toutes les forces de portance doivent être le long de l'axe Z uniquement avec une grandeur exactement opposée à la force de gravité. De plus, la force de portance générée par chaque rotor doit être égale pour empêcher le véhicule de rouler plus loin, donc la poussée de chaque rotor doit être identique.

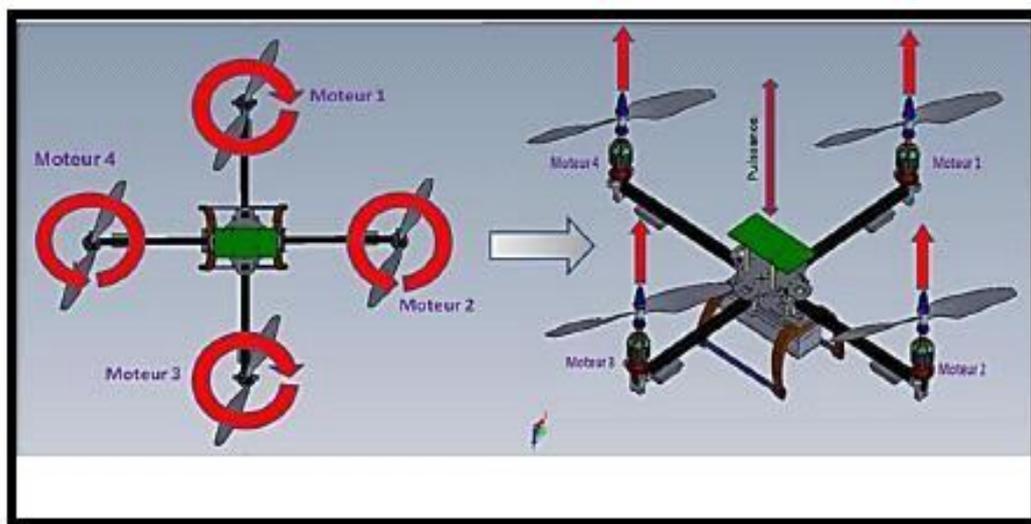


Figure 1.11: Illustration du mouvement vertical

Le mouvement de montée et de descente est obtenu en modifiant la vitesse de rotation des moteurs (et produit ainsi une poussée). Si la force de portance est supérieure au poids du quadcopter, le mouvement est vers le haut, et si la force de portance est inférieure au poids du quadcopter, le mouvement est vers le bas.

I.3.2. 2. Mouvement de roulis (roll)

La **figure1.12** montre bien comment un mouvement de roulis est obtenu. Dans ce cas, on applique un couple autour de l'axe X, c'est-à-dire en appliquant une différence de poussée entre les rotors (1,2) et le rotor (3,4). Ce mouvement (rotation autour de l'axe X) est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe Y

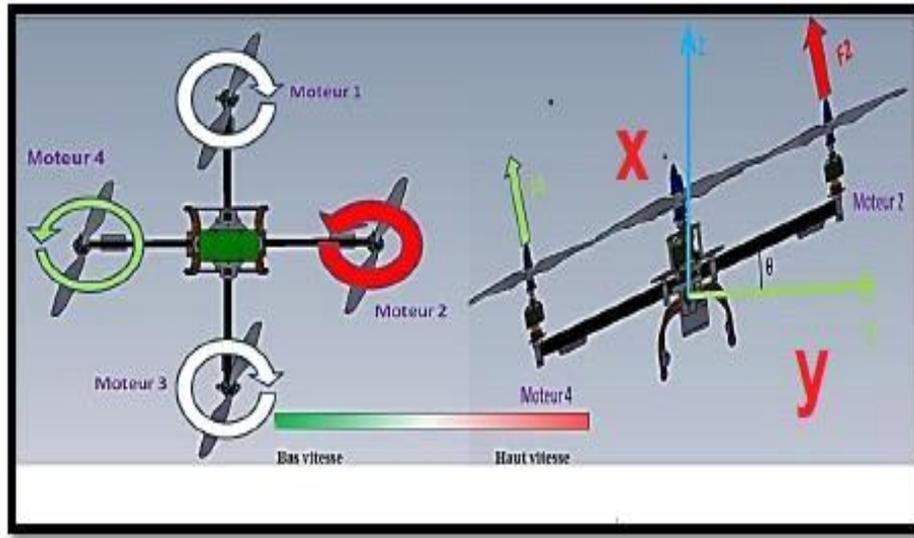


Figure 1.12: Illustration du mouvement de roulis

I.3.2. 3. Mouvement de tangage (pitch)

La figure 1.13 montre comment un mouvement de tangage est obtenu. Dans ce cas, on applique un couple autour de l'axe Y, c'est-à-dire en appliquant une différence de poussée entre le rotor (1.4) et les rotors (2.3). Ce mouvement (rotation autour de l'axe Y) est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe X

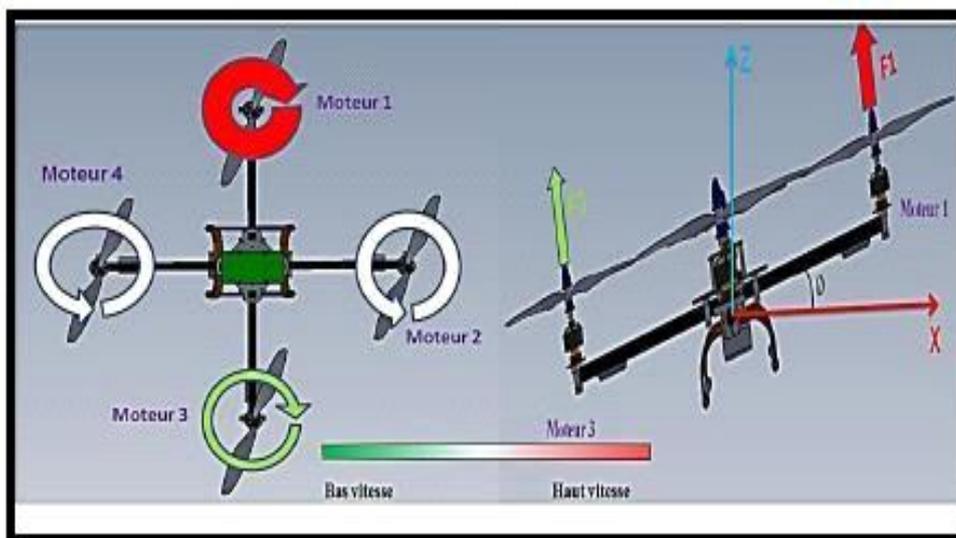


Figure 1.13: Illustration du mouvement de tangage

I.3.2.4. Mouvement de lacet (Yaw)

La figure 1.14 montre comment le mouvement de lacet est obtenu. Dans ce cas, nous voulons application un couple autour de l'axe Z, qui est fait en appliquant une différence de vitesse entre les rotors (1.3) et (2.4). Ce mouvement n'est pas un résultat direct de la poussée produit par les propulseurs mais par les couples réactifs produits par la rotation des rotors

La direction de la force de poussée ne décale pas pendant le mouvement, mais l'augmentation de la force de portance dans une paire de rotors doit être égale à la diminution des autres paires pour garantir que tous les forces de poussée restent la même.

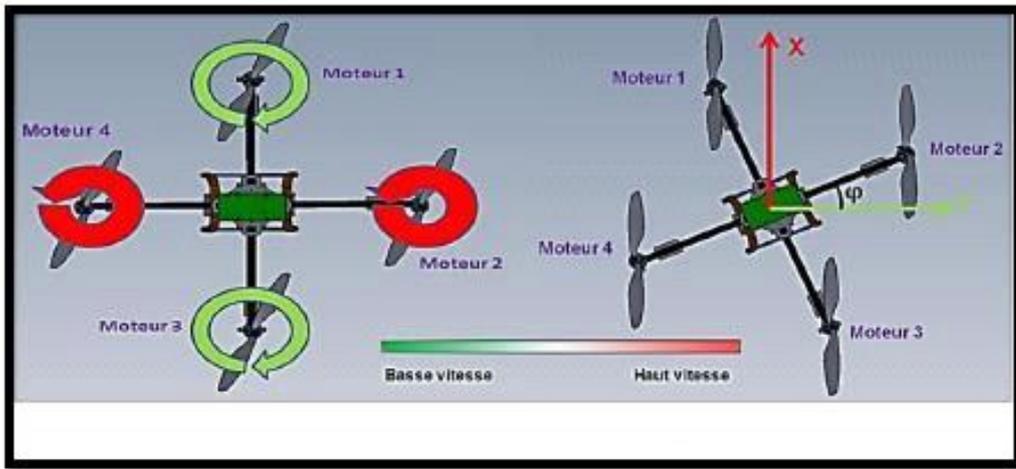


Figure 1.14: Illustration du mouvement lacet

I.3.2.5. Mouvement de translation horizontale

La **Figure 1.15** montre comment la translation horizontale est réalisée. Dans ce cas, nous voulons appliquer une force le long de X ou de Y qui est fait en inclinant le corps (par le tangage ou le roulement) et en augmentant toute la poussée produit pour grader l'importance du composant de Z de la poussée égale à la force de pesanteur

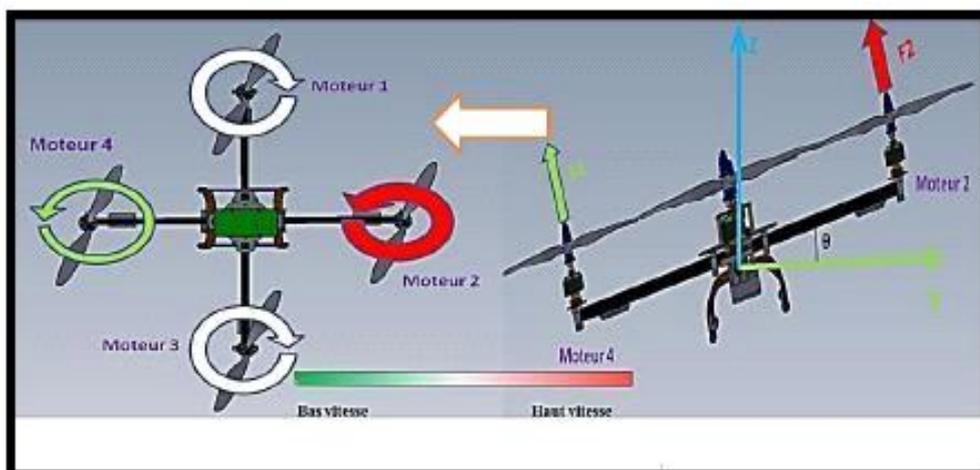


Figure 1.15: Illustration du mouvement de translation horizontal

I.3.3. Domaine d'application du quadcoptère

I.3.3.1. Domaine militaire

- Les quadcoptères sont utilisés par les services de secours (police, pompiers et gendarmerie) pour évaluer les dégâts en cas de catastrophe naturelle.
- Inspection des ouvrages d'art tels les ponts, les barrages.

- Contrôle maritime (les frontières, voies maritimes et trafic de drogue).
- Effectuer des missions de reconnaissance dans des zones hostiles et support combat. [9]

I.3.3.2. Domaine civil

L'utilisation des drones ne se limite pas au monde militaire. Au contraire, ils servent une partie importante de l'économie avec des mécanismes développés et des capacités remarquables.

La technologie étant en constante évolution, de nombreux nouveaux capteurs sont ajoutés aux drones afin que leur fonctionnement puisse être grandement amélioré et qu'ils puissent fonctionner avec des applications personnalisées performantes.

Vous pouvez le trouver dans l'industrie agricole ainsi que dans le monde Internet. Ici, nous allons parler des 8 applications de drones les plus étonnantes qui peuvent vous aider à connaître leurs incroyables capacités [13].

- **Photographie aérienne**



Figure 1.16: Drone pour la photographie

L'une des utilisations les plus courantes des drones à caméras consiste à assurer la couverture médiatique de sites inaccessibles. Auparavant, seules les grandes entreprises de presse pouvaient prendre des photos intéressantes du fait qu'elles pouvaient se permettre d'envoyer des hélicoptères. Mais aujourd'hui, presque toutes les organisations médiatiques à petite échelle et les journalistes locaux peuvent capturer des images aériennes d'une couverture médiatique impressionnante. Les drones peuvent également se déplacer facilement dans des zones plus étroites en raison de leur petite taille, de sorte qu'ils gèrent également l'enregistrement d'entretiens en face à face [13].

- **Peuvent être implémentés pour les opérations de recherche et de sauvetage**



Figure 1.17: Drone pour la recherche

De nos jours, les drones sont équipés de capteurs thermiques qui leur permettent de localiser les personnes disparues. Il est également capable de fonctionner dans l'obscurité et sur des terrains difficiles. Les opérations de recherche et de sauvetage ont beaucoup souffert pendant longtemps du manque de technologie, mais maintenant les drones peuvent faire tout leur possible en quelques minutes. Ils peuvent être utilisés pour le déploiement ainsi que pour des missions de recherche et de sauvetage lors de combats critiques. Ils sont également capables de lancer des munitions dans des endroits difficiles d'accès [13].

- **Dans le domaine de l'agriculture**



Figure 1.18: Drone pour l'agriculture

Chapitre I : état de l'art

Il s'agit de la plus grande réussite de la technologie des drones, car elle profite désormais aux agriculteurs à bien des égards. Le drone peut aider les agriculteurs à économiser de l'argent et des récoltes en surveillant le flétrissement des plantes. Ils peuvent inspecter de vastes terres agricoles avec une surveillance appropriée des systèmes d'irrigation. Les agriculteurs peuvent désormais s'attendre à ce que toutes les informations soient mises à jour rapidement et les drones peuvent également les aider à pulvériser des engrais, des pesticides et de l'eau sur les cultures en temps opportun [13].

- **Drones pour l'expédition et la livraison**



Figure 1.19: Drone pour livraison et expédition

Étant donné que les modèles d'UAV avancés sont capables de transporter des charges utiles suffisamment lourdes, ils peuvent être utiles pour les applications de fret et de livraison. Cela aidera les gens à obtenir un service rapide de leurs produits requis à leur porte. Et le grand avantage est qu'ils ne resteront pas coincés dans les embouteillages. Vous pouvez maintenant obtenir votre commande de nourriture instantanément en quelques minutes [13].

- **Utilisation des drones dans l'ingénierie**



Figure 1.20: Drone pour l'ingénierie

Chapitre I : état de l'art

La plupart des sociétés d'ingénierie utilisent actuellement la technologie des drones pour surveiller leurs projets en profondeur, tels que les câbles de transmission, les pipelines d'hydrocarbures et les contrôles de maintenance...etc. [13]

- **Cartographie 3D avec les drones**



Figure 1.21: Drone pour la cartographie 3D

L'industrie de l'ingénierie s'occupe des projets d'infrastructure, des tâches de planification des aéroports et des activités de maintenance et de construction avec une efficacité croissante.

- **Drones pour la surveillance et de sécurisation des biens et des personnes :**



Figure 1.22: Drone pour la sécurité

Ces petits appareils peuvent aider les gens à réussir dans la sécurité publique et le contrôle des foules. Les drones sont capables de signaler des activités criminelles lors de

grands rassemblements. Ils trouvent également une utilité dans la surveillance étroite des zones frontalières afin que les trafiquants de drogue et les migrants puissent être facilement arrêtés. Les drones agissent comme une armée intelligente qui peut protéger la nation de nombreux problèmes et c'est pourquoi la plupart des pays développent de nos jours des modèles de drones très avancés [13].

- **Applications dans le domaine de la recherche et des sciences naturelles**



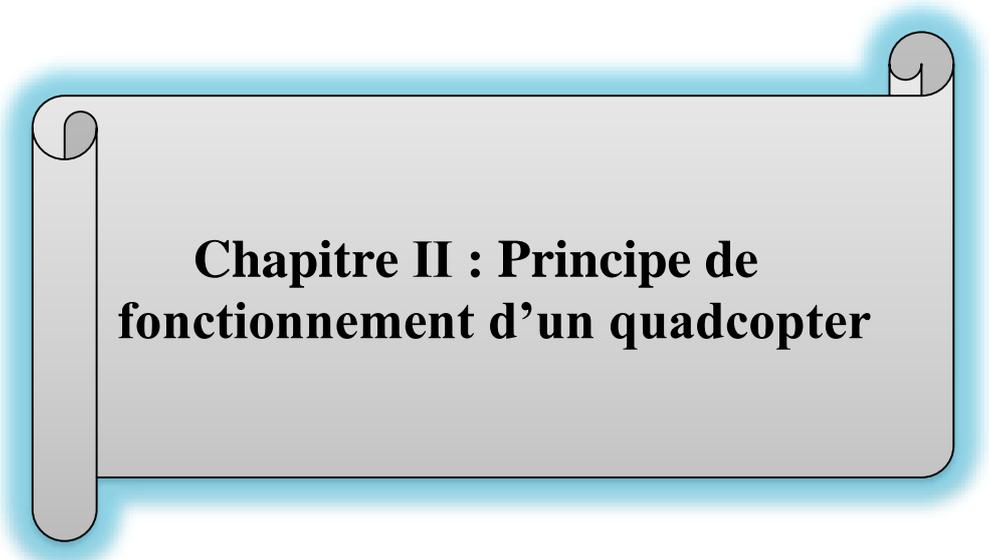
Figure 1.23: Drone pour la recherche des sciences naturelles

L'une des principales caractéristiques des drones est leur maniabilité. Puisqu'il peut être conçu dans une très petite taille, il aura toujours de grandes capacités. L'espace n'est tout simplement pas un problème pour les drones, et ils peuvent donc facilement se rendre dans des endroits difficiles d'accès ou inaccessibles. Il vous suffit d'attacher une caméra de haute qualité à votre drone et de le laisser voler dans les airs pour capturer l'espace cible [13].

I.4. Conclusion

Chapitre I : état de l'art

Ce chapitre englobe des généralités sur les drones ainsi que les quadcopters dans lequel il permet au lecteur d'avoir des concepts préliminaires sur les différentes catégories des drones, leur avantages et inconvénients, les mouvements de quadcopter et ses domaines d'applications. Dans le chapitre suivant on va parler sur le principe d'un quadcopter (fonctionnement, mécanique de vol...).



**Chapitre II : Principe de
fonctionnement d'un quadcopter**

II.1. Introduction

Tous les systèmes physiques et électroniques ont un principe qui montre comment ils fonctionnent. Le système qu'on va traiter dans ce chapitre est un drone quadcopter. Nous aborderons donc sur le fonctionnement et la mécanique de vol, ainsi que la commande PID pour notre quadcopter.

II.2. Fonctionnement du quadcopter

Un quadcopter possède 4 moteurs brushless contenant des rotors qui les propulsent et les maintiennent en air et sont définis dans l'espace avec six (06) degrés de liberté (DDL), trois mouvements de rotation et trois mouvements de translation. Les quatre rotors sont placés évidemment aux extrémités de la croix (qui représente le châssis), et l'électronique de commande qui est placée au centre du châssis. Les hélices opposées tournent dans un sens, et les deux autres tournent dans le sens opposé pour empêcher l'appareil de tourner sur lui-même [10] (mouvement de lacet). En fait, de plus en plus de drones utilisent l'intelligence artificielle (IA) pour naviguer automatiquement dans leur environnement, atteindre leur destination et exercer leurs tâches. Selon la trajectoire de vol, parfois certains objets peuvent entraîner un obstacle et parfois non (un exemple d'un arbre qui peut être à la fois un obstacle, d'autres fois non), les drones déploient donc une logique floue pour déterminer s'il faut éviter un objet ou non.

Le concept de "logique floue" est difficile à comprendre, mais il s'agit essentiellement de donner plusieurs "étiquettes" à un objet, puis de le catégoriser à l'aide de l'IA. L'étiquette « gagnant » est celle qui a le meilleur classement. Par exemple, une ligne électrique peut être classée comme "éloignée", "proche" ou "à risque". Ensuite, le drone utilise sa caméra pour mesurer sa taille et sa position par rapport à son corps, et classe chaque étiquette de 0 à 1 (0 signifie « aucun risque de collision » et 1 signifie « 100 % de risque de collision »). Ainsi, le drone peut évaluer ce qui pourrait être un danger et l'éviter de manière proactive, ce qui est beaucoup plus sûr que de voler effrontément en attendant d'être sûr à 100% que quelque chose est dangereux [15].

Enfin, un quadcopter est un système qui possède un nombre d'actionneurs inférieur au nombre des DDL pouvant être atteint.

II.3. Mécanique de vol

La modélisation des robots volants est une tâche délicate car la dynamique du système est fortement non linéaire et entièrement couplée. En revanche, il apparaît que l'analyse du vol du quadcopter a des tentations plus directes.

II.3.1. Schématisation des axes du quadcopter

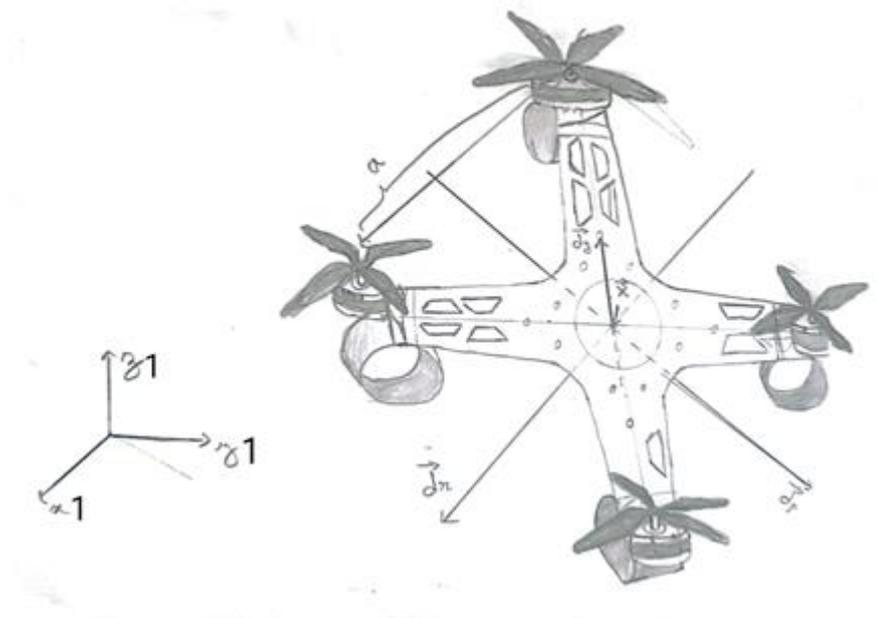


Figure 2.1: Schéma explicatif des axes

le repère du drone est $(\vec{x}, \vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$, où $(\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$ sont des vecteurs d'une base orthonormée.

Les vecteurs $\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y$ sont nommés car ce sont des axes de : roulis (roll), tangage (pitch), lacet (yaw). (Nous supposons que le mouvement « normal » du drone est une translation en \vec{d}_r).

II.3.2. Mouvement du drone en l'absence de dissipation

Le but de cette partie est d'exprimer les équations de mouvement du drone sans tenir compte de la dissipation.

- **Forces produites par les propulseurs**

Les axes des moteurs sont dirigés selon \vec{d}_y et en référence $(\vec{X}, \vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$ passent par les positions ('f', 'b', 'r', 'l' pour front, back, left, right)

$$\begin{cases} \vec{X}_{fl} = a \frac{\vec{d}_r + \vec{d}_p}{2} \\ \vec{X}_{fr} = a \frac{\vec{d}_r - \vec{d}_p}{2} \\ \vec{X}_{bl} = -\vec{X}_{fr} \\ \vec{X}_{br} = -\vec{X}_{fl} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Les hélices génèrent des poussées (Thrusts)

$$\begin{cases} \vec{f}_{fl} = f_{fl} \vec{d}_y \\ \vec{f}_{fr} = f_{fr} \vec{d}_y \\ \vec{f}_{bl} = f_{bl} \vec{d}_y \\ \vec{f}_{br} = f_{br} \vec{d}_y \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Dont les points d'applications situés aux points de fixation des hélices sur les axes, c'est-à-dire dans les positions précédentes augmentées de $d_h \vec{d}_y$ (ce déplacement ne sera pas significatif).

Ainsi, la force totale agissant sur le centre de masse \vec{X} est :

$$\vec{F} = (f_{fl} + f_{fr} + f_{bl} + f_{br}) \vec{d}_y \quad (\text{II.3})$$

$f_{fl} ; f_{fr} ; f_{bl} ; f_{br}$ Sont des coefficients stœchiométrie pour les poussées qui se génèrent par les hélices

• Couples des propulseurs

Les forces ci-dessus génèrent également des couples (torques) tels que :

$$\begin{cases} \vec{C}_{fl} = \vec{X}_{fl} \times \vec{f}_{fl} \\ \vec{C}_{fr} = \vec{X}_{fr} \times \vec{f}_{fr} \\ \vec{C}_{bl} = \vec{X}_{bl} \times \vec{f}_{bl} \\ \vec{C}_{br} = \vec{X}_{br} \times \vec{f}_{br} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Soit

$$\begin{cases} \vec{C}_{fl} = f_{fl} \vec{X}_{fr} \\ \vec{C}_{fr} = -f_{fr} \vec{X}_{fl} \\ \vec{C}_{bl} = f_{bl} \vec{X}_{fl} \\ \vec{C}_{br} = -f_{br} \vec{X}_{fr} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Mais les hélices produisent aussi des couples :

$$\begin{cases} \vec{c}_{fl} = c_{fl} \vec{d}_y \\ \vec{c}_{fr} = c_{fr} \vec{d}_y \\ \vec{c}_{bl} = c_{bl} \vec{d}_y \\ \vec{c}_{br} = c_{br} \vec{d}_y \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

les valeurs c_{fl} , c_{fr} , c_{bl} , c_{br} ne sont pas indépendantes des valeurs f_{fl} , f_{fr} , f_{bl} , f_{br} des forces mais s'ajoutent aux couples précédents.

Alors le couple total est :

$$\begin{aligned} \vec{C} &= \vec{c}_{fl} + \vec{c}_{fr} + \vec{c}_{bl} + \vec{c}_{br} + \vec{C}_{fl} + \vec{C}_{fr} + \vec{C}_{bl} + \vec{C}_{br} \\ &= (c_{fl} + c_{fr} + c_{bl} + c_{br}) \vec{d}_y + (f_{bl} - f_{fr}) \vec{X}_{fl} + (f_{fl} - f_{br}) \vec{X}_{fr} \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

• Relation entre les forces et les couples propulseurs

Le moteur est entraîné par un couple moteur c_m qui s'équilibre à une certaine vitesse Ω avec le couple résistant c de l'hélice, lequel provenant d'effets aérodynamiques assez complexes. Et ces effets produisent une poussée f sur l'hélice.

Sans étudier ces effets, il est possible de confirmer que f et c sont des variables dépendantes de Ω et en tant que telles sont également des variables dépendantes l'une de l'autre.

Les variables à constater sont les vitesses angulaires $\Omega_{fl}, \Omega_{fr}, \Omega_{bl}, \Omega_{br}$ pour les quatre moteurs dont le modèle mécanique permet de déduire les valeurs des f_{fl} , f_{fr} , f_{bl} , f_{br} et des c_{fl} , c_{fr} , c_{bl} , c_{br} .

• Approche pragmatique de la relation

Les moteurs d'UAV sont de deux types : C (dans le sens des aiguilles d'une montre) et A (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre) ; les moteurs C sont placés en fl et br, et A en fr et bl.

De plus, les hélices fl et fr sont identiques, comme fr et bl. Mais fl et bl sont inséparables l'une de l'autre.



Figure 2.2: Type des hélices

Ces résultats indiquent que lors d'un vol de drone, toutes les forces f_{fl} , f_{fr} , f_{bl} , f_{br} sont positives, si les c_{fl} et c_{br} sont positives, les c_{fr} et c_{bl} sont négatives ou vice-versa.

- **Vol stationnaire**

Les forces et couples générés par les propulseurs sont :

$$\vec{F} = (f_{fl} + f_{fr} + f_{bl} + f_{br}) \vec{d}_y \quad (\text{II.8})$$

$$\vec{C} = (c_{fl} + c_{fr} + c_{bl} + c_{br}) \vec{d}_y + (f_{bl} - f_{fr}) \vec{X}_{fl} + (f_{fl} - f_{br}) \vec{X}_{fr} \quad (\text{II.9})$$

Nous voyons que si la seule autre force est la force gravitationnelle $-m g \vec{k}_z$ le vol stationnaire est possible pour :

$$\begin{cases} \vec{d}_y = \vec{k}_z \\ f_{fl} + f_{fr} + f_{bl} + f_{br} = m g \\ c_{fl} + c_{fr} + c_{bl} + c_{br} = 0 \\ f_{bl} = f_{fr} ; f_{fl} = f_{br} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Cela suppose que les moteurs tournent tous à la même vitesse en valeur absolue (mais en sens inverse entre fr, bl d'une part et fl, br d'autre part). Donc on trouve :

$$\begin{cases} f_{fl} = f_{fr} = f_{bl} = f_{br} = \frac{mg}{4} \\ c_{fl} = c_{br} = -c_{bl} = -c_{fr} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

- **Vecteur instantané de rotation**

Formellement le vecteur instantané de rotation est : (du côté droit en notation matricielle)

$$\vec{\Omega} = \omega_r \vec{d}_r + \omega_p \vec{d}_p + \omega_y \vec{d}_y = (\vec{d}_r \vec{d}_p \vec{d}_y) \begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_p \\ \omega_y \end{pmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Chapitre II : Principe de fonctionnement d'un quadcopter

Où les ω_r , ω_p , ω_y sont des variables dépendant du temps à calculer.

Ce vecteur $\vec{\Omega}$ permet d'exprimer la variation temporelle des \vec{d}_r , \vec{d}_p , \vec{d}_y comme :

$$\begin{cases} \dot{\vec{d}}_r = \vec{\Omega} \times \vec{d}_r \\ \dot{\vec{d}}_p = \vec{\Omega} \times \vec{d}_p \\ \dot{\vec{d}}_y = \vec{\Omega} \times \vec{d}_y \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Ou encore

$$\begin{pmatrix} \dot{\vec{d}}_r \\ \dot{\vec{d}}_p \\ \dot{\vec{d}}_y \end{pmatrix} = \underline{\underline{\Omega}} \begin{pmatrix} \vec{d}_r \\ \vec{d}_p \\ \vec{d}_y \end{pmatrix} ; \text{ avec } \underline{\underline{\Omega}} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_y & -\omega_p \\ -\omega_y & 0 & \omega_r \\ \omega_p & -\omega_r & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

• Théorème du moment cinétique

Le moment cinétique lié au vecteur de rotation est :

$$\vec{J} = (\vec{d}_r \quad \vec{d}_p \quad \vec{d}_y) \underline{\underline{I}} \begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_p \\ \omega_y \end{pmatrix} ; \text{ avec } \underline{\underline{I}} = \begin{pmatrix} I_{rr} & I_{rp} & I_{ry} \\ I_{rp} & I_{pp} & I_{py} \\ I_{ry} & I_{py} & I_{yy} \end{pmatrix} \quad (\text{II.15})$$

où $\underline{\underline{I}}$ est la matrice inertielle des axes de référence $(\vec{X}, \vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$. Elle n'est diagonale que si ces axes sont aussi des axes d'inertie, ce qui n'est pas forcément le cas.

La variation temporelle du moment cinétique est équilibrée avec les couples appliqués, en utilisant la notation matricielle suivante :

$$t_{\underline{\underline{d}}} \left(t_{\underline{\underline{\Omega}}} \underline{\underline{I}} \begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_p \\ \omega_y \end{pmatrix} + \underline{\underline{I}} \begin{pmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_p \\ \dot{\omega}_y \end{pmatrix} \right) = t_{\underline{\underline{d}}} \begin{pmatrix} \frac{a}{2} (f_{fl} + f_{bl} - f_{fr} - f_{br}) \\ \frac{a}{2} (f_{fl} + f_{fr} - f_{br} - f_{bl}) \\ c_{fl} + c_{fr} + c_{bl} + c_{br} \end{pmatrix} \quad (\text{II.16})$$

• Système dynamique du vecteur de rotation

On obtient donc $(t_{\underline{\underline{\Omega}}} = -\underline{\underline{\Omega}})$.

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_p \\ \dot{\omega}_y \end{pmatrix} = \underline{\underline{I}}^{-1} \left(\underline{\underline{\Omega}} \underline{\underline{I}} \begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_p \\ \omega_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{a}{2} (f_{fl} + f_{bl} - f_{fr} - f_{br}) \\ \frac{a}{2} (f_{fl} + f_{fr} - f_{br} - f_{bl}) \\ c_{fl} + c_{fr} + c_{bl} + c_{br} \end{pmatrix} \right) \quad (\text{II.17})$$

Chapitre II : Principe de fonctionnement d'un quadcopter

qui est le système dynamique des composantes dans la base $(\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$ du vecteur instantané $\vec{\Omega}$.

Comme les couples dus aux propulseurs étant liés à la référence $(\vec{X}, \vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$ il est normal que ce système soit exprimé sans avoir à indiquer les relations entre les bases $(\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$ et $(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$.

• Cas symétrique du système dynamique du vecteur de rotation

Les équations du système dynamique du vecteur de rotation ne sont rien d'autre que les formules d'Euler pour le mouvement de rotation libre d'un solide où le couple exercé par les propulseurs est introduit ; ce qui peut se voir dans le cas où les directions $(\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$ sont les directions principales d'inertie. Dans ce cas la matrice « I » est diagonale et on trouve :

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_p \\ \dot{\omega}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{I_{pp} - I_{yy}}{I_{rr}} \omega_p \omega_y \\ \frac{I_{yy} - I_{rr}}{I_{pp}} \omega_y \omega_r \\ \frac{I_{rr} - I_{pp}}{I_{yy}} \omega_r \omega_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{a}{2I_{rr}} (f_{fl} + f_{bl} - f_{fr} - f_{br}) \\ \frac{a}{2I_{pp}} (f_{fl} + f_{fr} - f_{br} - f_{bl}) \\ \frac{c_{fl} + c_{fr} + c_{bl} + c_{br}}{I_{yy}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Cela nous permet de voir que : la somme des couples « c » qui crée le mouvement de lacet; la différence entre les forces « f » à gauche et à droite qui créent le mouvement de roulis ; la différence entre les force « f » avant et arrière qui créent le mouvement de tangage.

L'utilité de ces équations c'est pour créer les différents mouvements du quadcopter

• Equations du système dynamique de la base $(\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$

Ce système s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\underline{d}} = \underline{\underline{\Omega}} \underline{d} \\ \dot{\underline{\omega}} = \underline{\underline{I}}^{-1}; (\underline{\underline{\Omega}} \underline{\underline{I}} \underline{\underline{\omega}} + \underline{c}) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Où

$$\underline{c} = \begin{pmatrix} \frac{a}{2} (f_{fl} + f_{bl} - f_{fr} - f_{br}) \\ \frac{a}{2} (f_{fl} + f_{fr} - f_{br} - f_{bl}) \\ c_{fl} + c_{fr} + c_{bl} + c_{br} \end{pmatrix}; \quad \underline{\omega} = \begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_p \\ \omega_y \end{pmatrix}; \quad \underline{d} = \begin{pmatrix} \vec{d}_r \\ \vec{d}_p \\ \vec{d}_y \end{pmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\underline{\underline{\Omega}} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_y & -\omega_p \\ -\omega_y & 0 & \omega_r \\ \omega_p & -\omega_r & 0 \end{pmatrix} ; \underline{\underline{I}} = \begin{pmatrix} I_{rr} & I_{rp} & I_{ry} \\ I_{rp} & I_{pp} & I_{py} \\ I_{ry} & I_{py} & I_{yy} \end{pmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Il comporte 3×3 (les composantes des $\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y$ dans la base $(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ + (les $\omega_r, \omega_p, \omega_p$) donc 12 variables. Ce qui est un peu excessif puisque les $\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y$ forment un trièdre orthogonal.

- **Angles d'Euler**

Si on paramètre les $\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y$ au moyen des angles d'Euler (ψ précession, θ nutation, ϕ rotation propre) on trouve :

$$\begin{cases} X' = \cos \psi \vec{x}_1 + \sin \psi \vec{y}_1 ; \vec{y}'_1 = -\sin \psi \vec{x}_1 + \cos \psi \vec{y}_1 ; \vec{z}'_1 = \vec{z}_1 \\ Y'' = \cos \theta \vec{y}'_1 + \sin \theta \vec{z}'_1 ; \vec{z}''_1 = -\sin \theta \vec{y}'_1 + \cos \theta \vec{z}'_1 ; \vec{x}''_1 = \vec{x}'_1 \\ \vec{d}_r = \cos \phi \vec{x}''_1 + \sin \phi \vec{y}''_1 ; \vec{d}_p = -\sin \phi \vec{x}''_1 + \cos \phi \vec{y}''_1 ; \vec{d}_y = \vec{z}'' \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

On peut résoudre les équations $\dot{\vec{d}} = \underline{\underline{\Omega}} \vec{d}$ par rapport aux dérivées temporelles $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\phi}$ et obtient que :

$$\dot{\theta} = \omega_r \cos \phi - \omega_p \sin \phi \quad (\text{II.23})$$

$$\dot{\psi} = \frac{\omega_r \sin \phi + \omega_p \cos \phi}{\sin \theta} ; \dot{\phi} = \frac{\omega_y \sin \theta - (\omega_r \sin \phi + \omega_p \cos \phi) \cos \theta}{\sin \theta} \quad (\text{II.24})$$

Ceci n'est pas satisfaisant car θ ne peut pas être nul ; alors que c'est forcément le cas en vol stationnaire. Cela est dû au fait que lorsque la nutation est nulle les angles de précession et de rotation ont la même action. Ces paramètres ne sont pas très adaptés au cas du drone.

- **Système dynamique de la base $(\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$ en composantes**

L'expression des vecteurs $\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y$ dans la base $(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ se fait en posant :

$$\vec{d} = \underline{\underline{d}} \vec{k} ; \text{ avec } \underline{\underline{d}} = \begin{pmatrix} d_r^x & d_r^y & d_r^z \\ d_p^x & d_p^y & d_p^z \\ d_y^x & d_y^y & d_y^z \end{pmatrix} ; \vec{k} = \begin{pmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{y}_1 \\ \vec{z}_1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Le système dynamique de cette base $(\vec{d}_r, \vec{d}_p, \vec{d}_y)$ s'exprime alors en composantes comme :

$$\begin{cases} \underline{\dot{d}} = \underline{\underline{\Omega}} \underline{d} \\ \underline{\dot{\omega}} = \underline{I}^{-1} (\underline{\underline{\Omega}} \underline{I} \underline{\omega} + \underline{c}) \end{cases} ; \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$\underline{c} = \begin{pmatrix} \frac{a}{2} (f_{fl} + f_{bl} - f_{fr} - f_{br}) \\ \frac{a}{2} (f_{fl} + f_{fr} - f_{br} - f_{bl}) \\ c_{fl} + c_{fr} + c_{bl} + c_{br} \end{pmatrix} ; \quad \underline{\omega} = \begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_p \\ \omega_y \end{pmatrix} ; \quad \underline{\underline{\Omega}} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_y & -\omega_p \\ -\omega_y & 0 & \omega_r \\ \omega_p & -\omega_r & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$$\underline{I} = \begin{pmatrix} I_{rr} & I_{rp} & I_{ry} \\ I_{rp} & I_{pp} & I_{py} \\ I_{ry} & I_{py} & I_{yy} \end{pmatrix} \quad (\text{II.28})$$

• Système dynamique du centre de gravité

La deuxième loi de Newton permet d'écrire la loi du mouvement du centre de gravité \vec{X} pour le drone comme suit :

$$m \ddot{\vec{X}} = (f_{fl} + f_{fr} + f_{bl} + f_{br}) \vec{d}_y - m \mathbf{g} \vec{z} \quad (\text{II.29})$$

Soit en composantes :

$$\underline{\ddot{X}} = \frac{f}{m} \underline{d}_y - \underline{g} ; \quad \text{avec :} \quad f = (f_{fl} + f_{fr} + f_{bl} + f_{br}) \quad (\text{II.30})$$

$$\underline{d}_y = \begin{pmatrix} d_y^x \\ d_y^y \\ d_y^z \end{pmatrix} ; \quad \vec{X} = t_{\underline{X}} \vec{k} ; \quad \underline{X} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} ; \quad \underline{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Ces précédentes équations forment le système dynamique du mouvement des drones. Mais ce système n'est pas complet pour obtenir des simulations réalistes. Il manque les forces dissipatives dont l'apport est nécessaire.

II.3.3 Paramétrage des forces et couples des propulseurs

Cette partie est destinée à déterminer la forme des forces de couple et de propulseur.

Cependant, cela ne se fera qu'avec une approche pragmatique utilisant des formulaires personnalisés.

- **Poussée de l'hélice**

Le problème initial à résoudre est celui d'une hélice seule, tournant à une vitesse angulaire Ω autour de son axe \vec{d} dans un espace vide rempli d'air

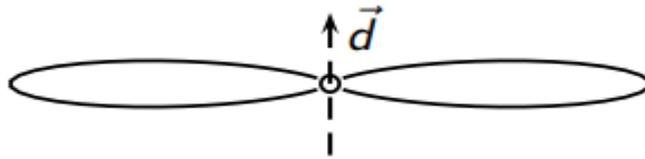


Figure 2.3 : Schéma d'une hélice avec l'axe de rotation \vec{d}

Pendant la rotation, l'hélice pousse l'air ; cela crée donc un champ de vitesse dans l'air ; ce champ de vitesse s'accompagne d'un champ de pression ; les champs de pression et de vitesse se combinent pour créer une densité de force à la surface de l'hélice ; les agrégats à la surface de cette densité de force et de son produit vectoriel avec la position sont les force et couple nécessaires à chercher.

Pour obtenir des éléments de modélisation, des approximations peuvent être utilisées comme la technique de Foudre suivant :

a) Approche dite de Froude de la poussée de l'hélice basée sur le principe de Bernoulli

L'idée est en fait d'implémenter une version personnalisée du principe de Bernoulli ; voici en coupe la géométrie de la situation (dans le plan \vec{z}_1, \vec{x}_1 et pour $\vec{d}_y = \vec{z}_1$).

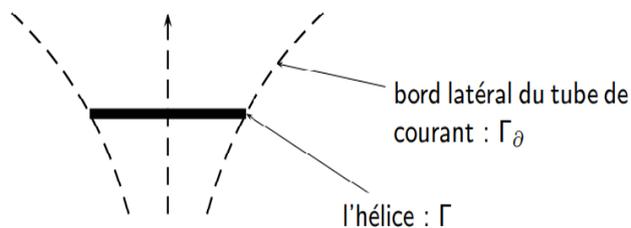


Figure 2.4: Géométrie d'une hélice avec le principe de Bernoulli

On se place dans le tube de courant. Supposons que la vitesse de l'air directement au-dessus de l'hélice est $-\dot{z} \vec{k}_z$ où \dot{z} est la vitesse ascensionnelle de l'hélice et que la pression

Chapitre II : Principe de fonctionnement d'un quadcopter

est p ; qu'elle est $-v_\infty \vec{k}_z$ juste en dessous avec la pression P ; le théorème de Bernoulli dans le tube de courant fournit :

$$p + \frac{\rho^2}{2} = P + \rho \frac{-v_\infty}{2} \quad ; \quad \text{avec : } \rho \text{ est la masse volumique de l'air} \quad (\text{II.32})$$

D'où vient que le saut de pression dû au mouvement de l'hélice est :

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} (v_\infty^2 - \dot{z}^2) \quad (\text{II.33})$$

On introduit ensuite la vitesse $-v \vec{k}_z$ dans l'hélice et on a affirmé que celle-ci est la moyenne de \dot{z} et v_∞ , soit :

$$v = \dot{z} + \frac{v_\infty}{2} \quad (\text{II.34})$$

b) Approche dite de Froude de la poussée de l'hélice

L'approche de froude s'intéresse aux phénomènes moyens autour d'une hélice

Cette vitesse de l'hélice est utilisée pour s'affranchir la vitesse v_∞ dans l'expression du saut de pression, de sorte que :

$$\Delta P = 2 \rho v (v - \dot{z}) \quad (\text{II.35})$$

Elle permet également d'exprimer le débit d'air dans l'hélice qui est $d = \pi R^2 v$ où R est le rayon de l'hélice ; et avec le débit on a la puissance nécessaire pour entraîner l'hélice, c'est-à-dire qu'on trouve :

$$P = \Delta P d = 2 \pi R^2 \rho v^2 (v - \dot{z}) \quad (\text{II.36})$$

On relie maintenant la vitesse v à la fréquence de rotation N de l'hélice par :

$$v = \delta N$$

Où δ est le pas de l'hélice. L'image mentale est qu'une hélice est un type de vis qui avance dans l'espace d'une certaine quantité « δ » lorsque l'hélice fait un tour.

Ensuite, l'analyse est presque terminée. Le saut de pression et puissance en fonction de N s'exprime par :

$$\Delta P = 2 \rho \delta^2 N (N - \frac{\dot{z}}{\delta}) ; P = 2 \pi \rho \delta^3 R^2 N^2 (N - \frac{\dot{z}}{\delta}) \quad (\text{II.37})$$

c) Approche dite de Froude de la poussée de l'hélice

L'expression du saut de pression ΔP se rapporte à la force exercée vers le haut sur l'hélice par le mouvement de l'air, qui est la force de portance, tels que :

Chapitre II : Principe de fonctionnement d'un quadcopter

$$F = \Delta P \pi R^2 = 2 \pi \rho \delta^2 R^2 N \left(N - \frac{z}{\delta}\right) \quad (\text{II.38})$$

La puissance P est la force que doit fournir le moteur qui génère la rotation, le couple correspondant est :

$$\Gamma = \frac{P}{\Omega} = \rho \delta^3 R^2 N \left(N - \frac{z}{\delta}\right) \quad (\text{II.39})$$

Par contre, l'hypothèse faite sur la relation entre vitesse de rotation et l'avancement de l'hélice ($v = \delta N$), on obtient donc :

$$\Gamma = \frac{\delta}{2 \pi} F \quad (\text{II.40})$$

• Approche alternative et synthèse

On peut tout ne pas être convaincu de l'approche précédente qui possède au moins deux faiblesses liées : les pales de l'hélice sont arrondies avec un disque continu sur lequel la pression est intermittente ; la géométrie réelle de ces pales est prise en compte par le paramètre δ , le pas de l'hélice, et ce pas permet d'écrire la relation très stricte sur la relation entre la vitesse de rotation et la progression de l'hélice ($v = \delta / 2 \pi \Omega$)

Il existe une approche moins primitive, appelée l'approche des éléments de pale (balade éléments).

Ainsi, La faiblesse de l'approche qui a conduit aux expressions de la portance et du couple moteur fait qu'il vaut mieux de laisser seulement la forme de la dépendance en Ω et pas la signification des coefficients, c'est-à-dire que la portance et couple dans la suite seront :

$$\begin{cases} F = k N \left(N - \frac{z}{\delta}\right) \\ \Gamma = k' N \left(N - \frac{z}{\delta}\right) \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Où k , k' et δ sont vus comme des coefficients phénoménologiques à déterminer (en particulier, $k' = k \delta / 2 \pi$ n'est pas supposé).

II.4. COMMANDE PID

La commande PID sert à réguler l'équilibrage du quadcopter. Le régulateur PID (proportionnel-Intégral-Dérivé) est largement utilisé dans l'industrie. Dans le domaine des UAV's, ce contrôleur est très utilisé et sa mise en œuvre peut être contrôlée.

Chapitre II : Principe de fonctionnement d'un quadcopter

Un régulateur PID est un dispositif de contrôle qui permet d'effectuer une régulation ou un suivi d'une quantité physique d'un processus. Le choix du PID se justifie, d'une part, par sa simplicité algorithmique, d'autre part, le modèle mathématique du système à contrôler n'est pas requis. Il existe de nombreuses architectures combinant les trois actions d'un régulateur PID (série, parallèle ou mixte). Pour l'architecture parallèle, l'équation de contrôle PID est la suivante:

$$\text{Commande} = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{II.42})$$

Le réglage d'un PID sert à spécifier les paramètres k_p , k_i et k_d , afin de répondre au cahier des charges prédéfinies des performances (stabilité, rapidité et précision).

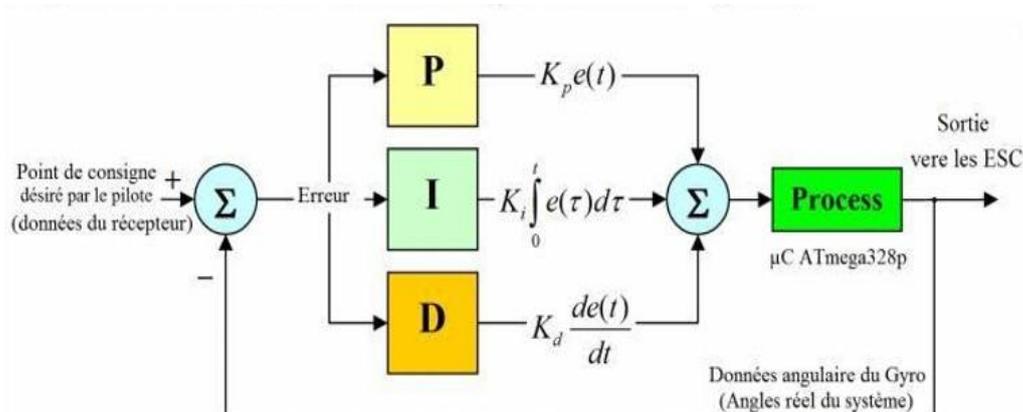
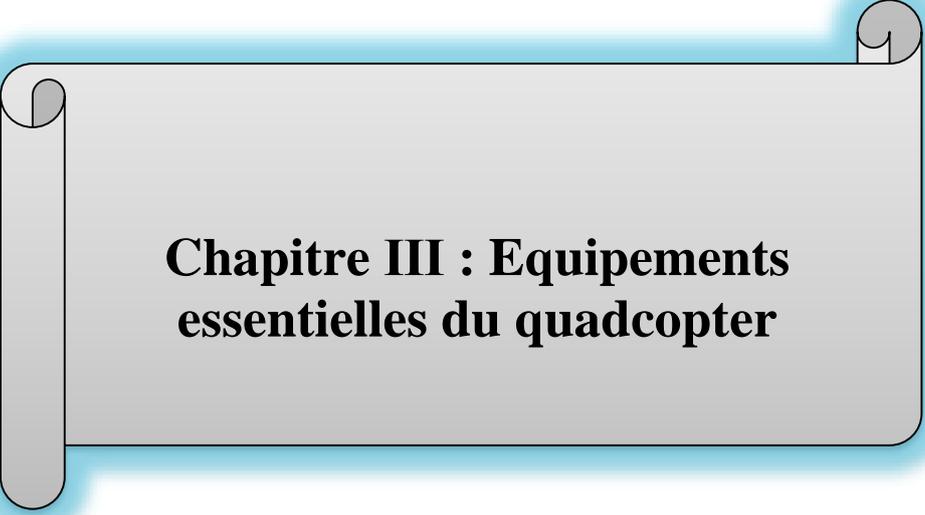


Figure 2.5: Architecture parallèle d'un correcteur PID

II.5. Conclusion

Le contenu de ce chapitre collecte la plupart des concepts qui régissent sur la mécanique de vol d'un quadcopter, dans lequel il permet au lecteur de comprendre les bases physiques utilisées pour déterminer les équations de la dynamique ainsi que les forces et les moments qui agissent sur notre quadcopter. Enfin, on a pu expliquer la commande PID qui sert à effectuer une régulation ou une poursuite d'une grandeur physique d'un processus.



**Chapitre III : Equipements
essentiels du quadcopter**

III.1. Introduction

Les quadcopters sont des systèmes complexes qui nécessitent divers composants et instrumentation qui doivent être performants et légers. Ainsi, dans ce chapitre, nous traiterons des équipements les plus importants

III.2. Arduino Nano

L'Arduino Nano est une carte petite et facile à utiliser basée sur l'Atmega 328 **Figure 3.1**. Il a plus ou moins la même fonctionnalité de l'Arduino Uno, mais dans un package différent. Il ne dispose que d'une prise d'alimentation DC et fonctionne avec un câble USB Mini-B au lieu d'un câble standard pour se connecter au PC. L'Arduino Nano peut être alimenté via une alimentation externe non régulée 6-20V (broche 30) ou l'alimentation externe régulée à 5V (broche 27) [14].

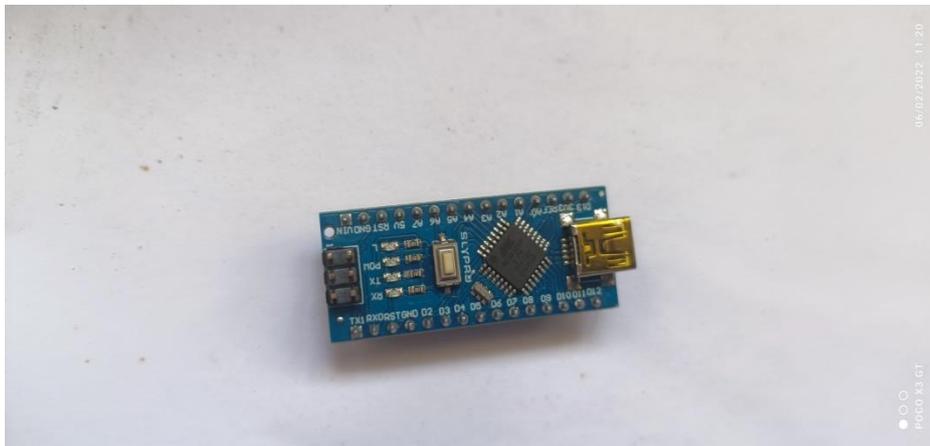


Figure 3.1: Arduino Nano

La source d'alimentation est automatiquement sélectionnée pour la source de tension la plus élevée. Il est généralement destiné à des performances nécessitant une miniaturisation et une installation semi-permanente sur des objets ou des expositions couramment utilisés pour mettre en œuvre des émetteurs RF. Le choix de ce type c'est surtout son poids qui est léger, ce qui est un paramètre important dans notre cas.

III.3. MPU-6050

Tout ce qu'il y a à faire est de corriger les mouvements indésirables du quadcopter. Le gyroscope est le capteur idéal pour notre projet. Nous avons choisi le MPU-6050 **Figure 3.2**, car il est très facile à obtenir, très bon marché et comprend à la fois un accéléromètre et un gyroscope. Ceci est très utile lors de la programmation de l'IMU. Une unité de mesure inertielle (IMU) est un ensemble de capteurs qui peuvent être attachés au bord d'un corps

Chapitre III : Equipements essentielles du quadcopter

pour lire les données des mouvements de ce corps. Ce type de puce est en fait ce qu'on appelle un système micro électromécanique, ou MEMS en abrégé. Ce ne sont rien d'autre que la possibilité de changer en fonction des accéléromètres et des vitesses angulaires. Par conséquent, dans notre cas, nous pouvons déterminer et traiter le mouvement du quadcopter dans l'espace. Le module MPU-6050 s'interface avec l'Arduino sur broches (SCL et SDA) via une liaison I2C.

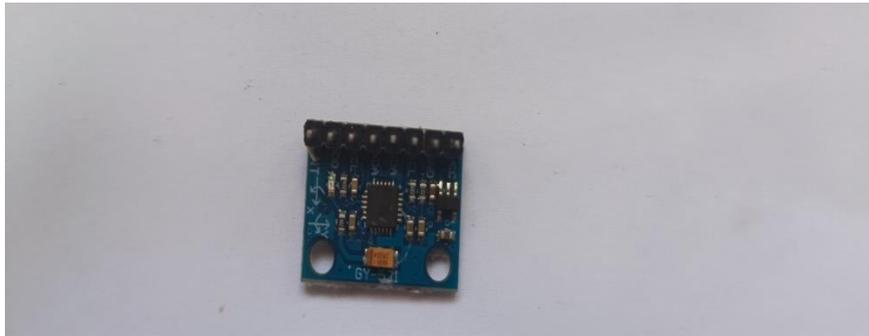


Figure 3.2: MPU-6050

Le mouvement angulaire du quadcopter est le même partout. Par conséquent, peu importe où se trouve le gyroscope. Cependant, c'est toujours une bonne idée d'attacher le gyroscope au centre de gravité du quadcopter, qui a le moins de vibrations.

III.4. Moteurs sans balais « brushless »

Dans le cadre de ce projet, nous avons besoin des moteurs à faible masse et en même temps à très grande vitesse avec un rapport couple-masse élevé et une grande précision. Pour cela, nous devons travailler avec des moteurs sans balais ou « brushless motor » comme indiqué sur la **Figure 3.3**.

Les moteurs sans balais sont en fait des moteurs synchrones triphasés à aimants permanents. Ils présentent plusieurs avantages par rapport aux moteurs DC conventionnels à savoir, leurs longues durées de fonctionnement et leurs insensibilités aux interférences en plus leurs réponses dynamiques élevées. Ce type de moteur, tourne tout en générant une poussée vers le haut pour maintenir le drone en vol. En termes simples, un moteur sans balai contient un groupe d'électroaimants (bobines) reliées entre elles par paires spécifiques. Ces électroaimants sont câblés en trois sections principales, de sorte que le moteur sans balais contient trois fils sortants. **Figure3.4.** [12]

Cette technologie tend à réduire de manière importante les risques de panne



Figure3. 3: Moteur brushless A2212/13T et Structure interne d'un BLDC

Le moteur brushless se compose de deux sections principales :

- Rotor : la partie qui tourne et les aimants montés sur un motif radial.
- Stator : la partie fixe, et contient les électroaimants.

Nous avons utilisé pour ce projet quatre moteurs de marque A2212/13T 1000KV. Ces moteurs ont un diamètre de 27.9 mm et 37.5 mm de longueur, ils pèsent chacun 52.7g et ils consomment chacun 150Watts de puissance avec un courant max de 16.4A, le KV veut dire la vitesse de rotation de moteur pour 1 volt. Il indique le nombre de tour par minute par volt du moteur à vide. Dans notre cas, le circuit de puissance contenant les moteurs fonctionne à une tension nominale de 11.1V, donc avec 1000KV sous 11.1V chaque moteur peut effectuer jusqu'à 11100 tr/min s'il est à vide c'est ce qu'on appelle RPM (rotation par minute).

III.4.1. Modèle mathématique d'un moteur brushless

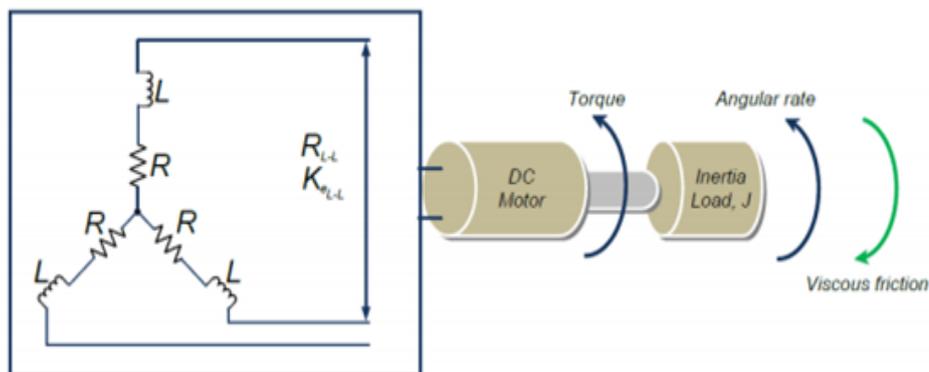


Figure 3.4 : Schéma d'un moteur brushless

Chapitre III : Equipements essentielles du quadcopter

La constante mécanique : $\tau_m = \sum \frac{RJ}{K_e K_t} = \frac{J \sum R}{K_e K_t}$

La constante électrique : $\tau_e = \sum \frac{L}{R} = \frac{L}{\sum R}$

Le moteur brushless comporte 3 phases, alors les constantes mécaniques et électriques s'écrivent sous la forme suivante :

$$\tau_m = \frac{3RJ}{K_e K_t}, \quad \tau_e = \frac{L}{3R}$$

S'il y a des effets de phase la constante mécanique devient alors:

$$\tau_m = \frac{3R \phi J}{K_e K_t}; \quad K_e = K_{e(L-L)}/\sqrt{3}$$

Donc l'équation de moteur brushless est obtenue comme suit :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1}$$

Tels que :

K_e : La fem entre phase en volt.

J : l'inertie du rotor.

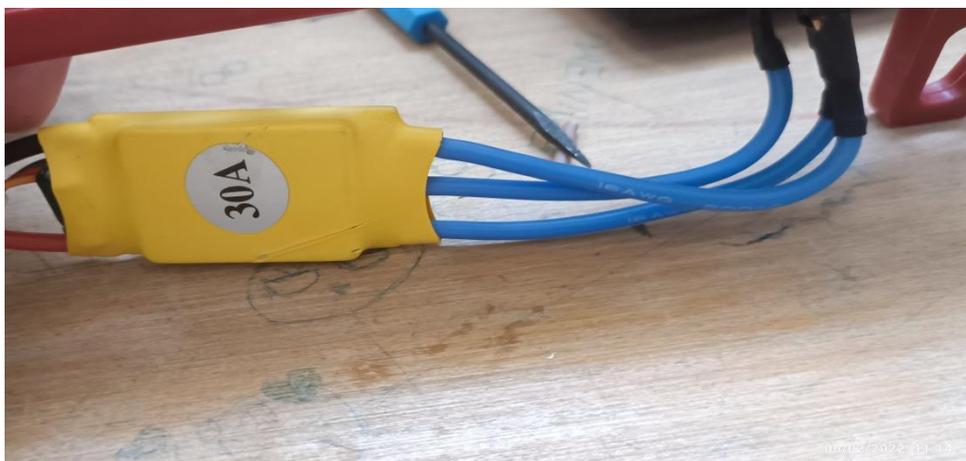
K_t : La constante de couple.

R : la résistance de l'enroulement.

L : l'inductance de l'enroulement

III.5.ESC « Electronique Speed Controller »

ESC donné par **Figure 3.5**, est un circuit électronique qui gère la vitesse des moteur brushless. Sur le multi-rotor, on a son propre ESC, chacun se connecte au contrôleur de vol. Les ESC convertissent les séquences des signaux de commande PWM (Pulse Width Modulation) provenant du contrôleur de vol ou du récepteur radio en un signal alternatif triphasé, et entraîne le moteur sans balais en fournissant le niveau approprié de puissance électrique [12].



Chapitre III : Equipements essentielles du quadcopter

Figure 3. 4: Electronique Speed Controller

Les contrôleurs que nous avons choisi pour notre application sont du type FLYCOLOR 30A conçus spécifiquement pour les multicopters, et disposent d'un large éventail de fonctions de programmation ainsi que d'une courbe d'accélération linéaire. L'ESC doit supporter un courant au moins égal au courant max des moteurs. En général, les moteurs brushless consomment 16.4A pour une poussée max. « Thrust ». Nous avons donc choisi un ESC de 30A pour élargir la marge de sécurité.

III.6. Batterie LIPO

Notre système quadcopter nécessite beaucoup d'énergie et a besoin d'une source d'alimentation puissante et plus légère. Pour cela nous sommes obligés de travailler avec la batterie du lithium-polymère **Figure 3.6**. Les batteries au lithium-polymère sont des batteries chimiques très puissantes et qui sont suffisamment légères pour un bon vol du quadcopter, et elles ont un circuit de protection (PCM) qui protégé la batterie contre les surcharges, les décharges, les court-circuits ou les explosions [12].



Figure 3. 5: Batterie LIPO

Dans ce projet nous avons utilisés une batterie LIPO de 3 cellules et d'une capacité de 2200 mAh à 11.1 Volts avec un taux de décharge « C rating » de 70 C et pesant 225g le Taux de décharge est une manière informelle de décrire la quantité de courant qu'une batterie peut fournir en toute sécurité. Le C indique la capacité de la batterie et l'amplitude des heures. Dans notre cas cette batterie de 70 C peut délivrer jusqu'à $70 \times 2.2 \text{Ah} = 154$ ampères en une heure.

III.7. Hélices

Concernant les hélices, elles doivent être choisies en fonction de la taille des moteurs et du châssis du quadcopter utilisé. Nous avons choisi DJI 8045 comme le montre la **Figure 3.7**. Ces hélices sont fabriquées en fibre de carbone qui est un matériau solide et

Chapitre III : Equipements essentielles du quadcopter

léger, elles ont 8 pouces (20cm) de diamètre et ont un pas de tangage de 4.5 pouces (le pas de tangage signifie jusqu'où le quadcopter ira de l'avant pour révolutionner l'hélice à 360°) [12].



Figure 3. 6: Hélice DJI 8045

Comme mentionné précédemment dans le premier chapitre, nous en prendrons deux hélices dans le sens des aiguilles d'une montre et deux dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en direction de la dérive, ces hélices seront fixées aux moteurs et leur rôle sera de brasser l'air pour générer la poussée. La taille de l'hélice varie avec la puissance du moteur, et pour mieux comprendre voici quelques règles à suivre afin de faire le bon choix des différents accessoires :

Plus l'hélice est petite, plus elle doit tourner vite pour être efficace, plus elle est grande, plus elle doit tourner lentement. Dans un gros modèle d'avion par exemple, même une petite hélice qui tourne très vite (nécessite beaucoup de KV), ne suffira pas à le faire voler correctement (pas assez de puissance). Il doit donc être équipé d'une grande hélice, qui devra tourner moins vite (moins de KV). Les grandes hélices consommant plus que les petites hélices, une grande hélice doit être installée sur un moteur puissant (beaucoup de watt) et vice versa. **$P \text{ (watt)} = U \text{ (volt)} \times I \text{ (A)}$** .

I(A) : le courant max qui doit être fourni par l'ESC au moteur brushless.

U(Volt) : la tension continue de la batterie LIPO.

W(Watt) : la puissance maximale du moteur brushless.

En général : un moteur à haut KV, destiné à une petite hélice qui consomme quelques Watts ; A l'inverse, un moteur à faible KV, conçu pour les grandes hélices qui consomment beaucoup de Watts.

III.8. Module radio NRF24L01

Notre système quadcopter reçoit des données de contrôle en temps réel, il est donc essentiel d'avoir un système radio de haute qualité. L'émetteur RF a besoin d'un module puissant pour pouvoir transmettre le signal assez loin, Mais l'antenne PCB peut être un contenue en ce récepteur. Le module radio que nous avons utilisé est celui d'une antenne de puissance amplifiée, **Figure 3.8.**



Figure 3.7: Antenne radio NRF24L01 PA et NRF24L01

L’NRF24L01 est un module émetteur-récepteur qui utilise la bande de 2,4 GHz et peut fonctionner avec un débit de données de 250 Kbps dans un espace vide. La consommation électrique de cet appareil est d’environ 12 mA pendant le transport des données, et la tension de fonctionnement est de 1,9 Volts à 3,3 Volts. Le module NRF24L01 transmet et reçoit des données par « paquets » de plusieurs octets simultanément et le microcontrôleur est communiqué via le protocole de communication SPI. L’NRF24L01 peut utiliser jusqu’à 125 canaux différents, ce qui permet d’avoir un réseau de 125 modems indépendants dans une seule unité. Ces modules ont une grande complexité intrinsèque, mais certaines personnes génies ont écrit des bibliothèques Arduino qui nous facilitent la tâche et nous donnent une grande liberté en programmation [17].

III.9. Joysticks

Les parties les plus importantes d’une radiocommande sont les joysticks, mieux dits, les potentiomètres. Un joystick **Figure 3.9**, est un contrôleur de pointeur utilisé dans les jeux informatiques et la technologie d’assistance basée sur des potentiomètres. Le joystick qui tire son nom du bâton de contrôle utilisé par un pilote pour contrôler les ailerons et les ascenseurs d’un avion, est un levier manuel qui tourne sur une extrémité et transmet ses coordonnées via un microcontrôleur [16].

Chapitre III : Equipements essentielles du quadcopter

Les émetteurs radiocommandés des quadcopters ont deux potentiomètres sur chaque joystick, la valeur de résistance varie en fonction de la portée de contrôle des mouvements Pitch, Roll, Yaw et Throttle

Les sorties de joystick: **VCC ; GND ; VRY ; VRX**



Figure 3. 8: Joystick

Dans ce cadre, nous utilisons un Arduino Nano pour convertir le signal d'entrée de chaque potentiomètre en un signal numérique, puis le module radio NRF2401 envoie les différences de ces valeurs au récepteur du drone. En outre, ces valeurs numériques correspondent à la position du bâton de contrôle de chaque joystick.

III.10. Châssis

Le châssis **Figure 3.10**, est l'élément central du drone qui détermine la longueur totale de son envergure. La réalisation d'un petit quadcopter nécessite l'utilisation d'un cadre léger, rigide et consistant.

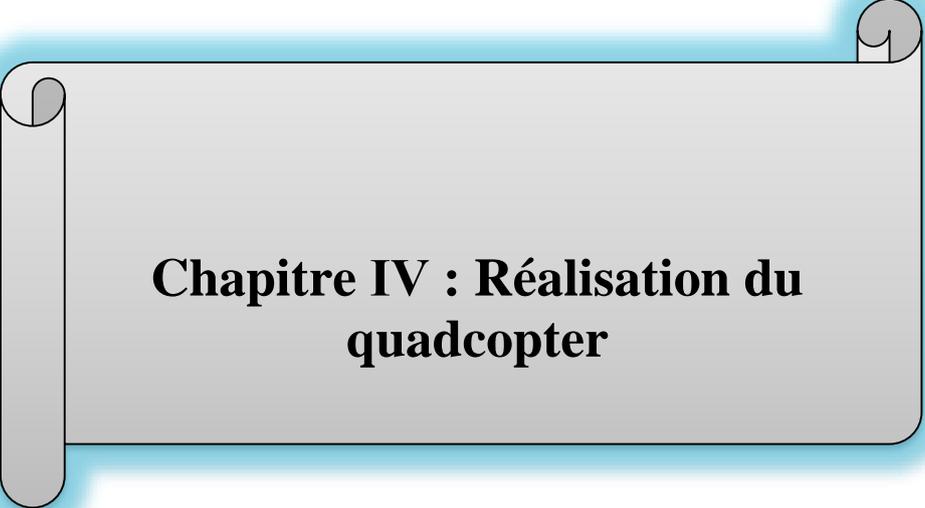
La structure du châssis du quadcopter a été améliorée, Afin de fournir assez d'espace pour installer des composants sans difficulté.



Figure 3. 9: Châssis du drone

III.11. Conclusion

Le contenu de ce chapitre sert à expliquer les différents équipements de base qui entrent dans la structure externe du drone, afin que le lecteur puisse comprendre le fonctionnement de chaque équipement, ainsi que de donner quelques règles pour le bon choix de différents accessoires pour réaliser un drone à haute gamme.



**Chapitre IV : Réalisation du
quadcopter**

Chapitre IV : Réalisation du quadcopter

IV.1.Introduction

On s'intéresse dans ce chapitre à expliquer notre réalisation du drone qui inclut : l'émetteur RF, récepteur et contrôleur de vol, dans lequel on va mettre les schémas électroniques de ces trois matériels réalisés, ensuite on donnera un schéma qui montre le câblage complet du quadcopter.

IV.2. Réalisation du l'émetteur RF

Voici notre émetteur RF :

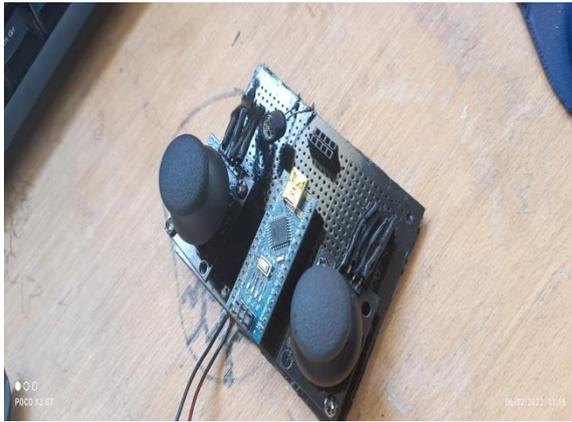


Figure 4. 1: émetteur RF

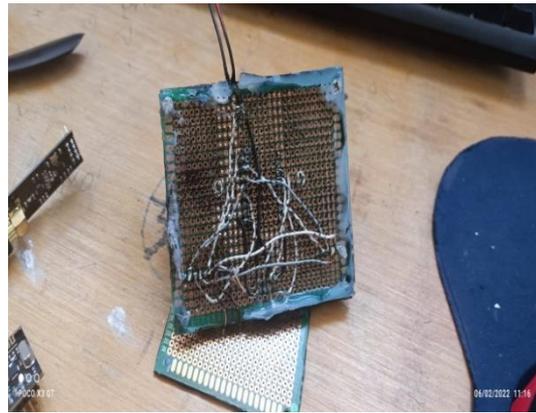


Figure 4. 2: câblage de l'émetteur RF

IV.2.1. Schéma électronique

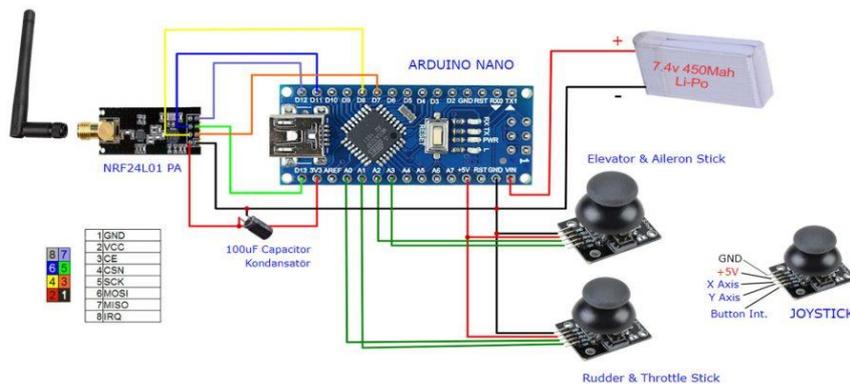


Figure 4. 3: schéma électronique de l'émetteur RF 2.4 GHz

Concernant l'alimentation nous devons fournir 7.4v de la batterie à l'entrée de l'Arduino Nano et au broche 3v3 qui sert à baisser la tension jusqu'à 3.3v parce que l'NRF24L01 ne supporte pas au-dessus de cette tension. La sortie négative de batterie est branchée au GND de l'Arduino. Les broches CE et CSN de l'NRF24L01 sont connectés aux

Chapitre IV : Réalisation du quadcopter

pins numérique de l'Arduino Nano. La même chose pour les broches MISO, MOSI et CLK qui sont assigné pour la communication SPI.

Pour le condensateur qui a comme rôle de filtrer le signal doit brancher aux pins Vcc et GND de l'NRF24L01.

IV.2.2. Calibrage des joysticks de l'émetteur RF

Dans cette partie on va calibrer les joysticks en utilisant l'ADC de l'Arduino Nano. Par la fonction AnalogRead qui sert à lire les valeurs analogiques de chaque potentiomètre des deux joysticks concernant les commandes envoyées, ces valeurs qui sont affichés sur le moniteur série de l'Arduino IDE sont codées sur 10 bits.

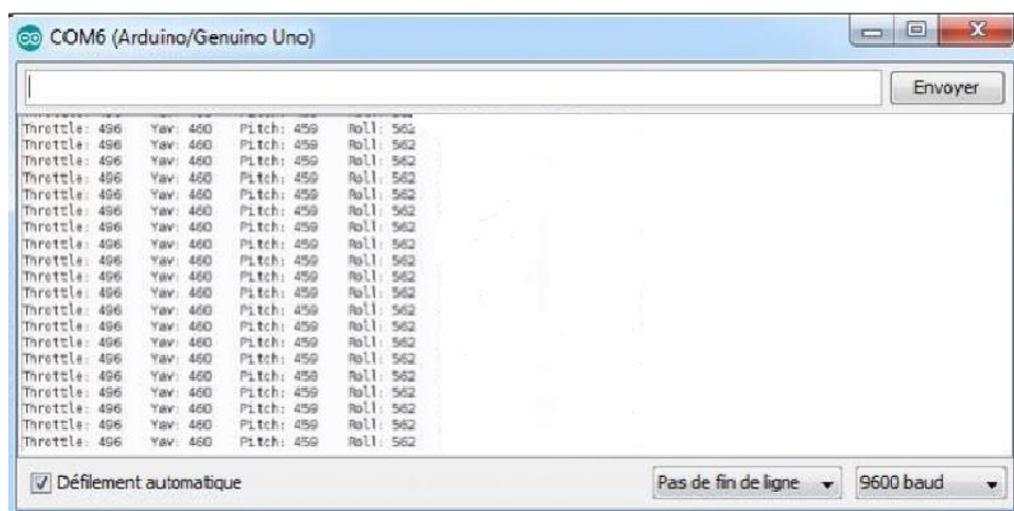


Figure 4.4: capture d'écran des valeurs analogiques affichées sur le moniteur série de l'Arduino IDE.

On note les valeurs correspondantes aux positions (min, centre et max) des joysticks qu'on va utiliser dans le programme du l'émetteur RF, on trouve :

Mouvement vertical : min = 112 centre = 552 max = 991
Lacet : min = 60 centre = 525 max = 978
Tangage : min = 27 centre = 480 max = 930
Roulet : min = 78 centre = 527 max = 974



Chapitre IV : Réalisation du quadcopter

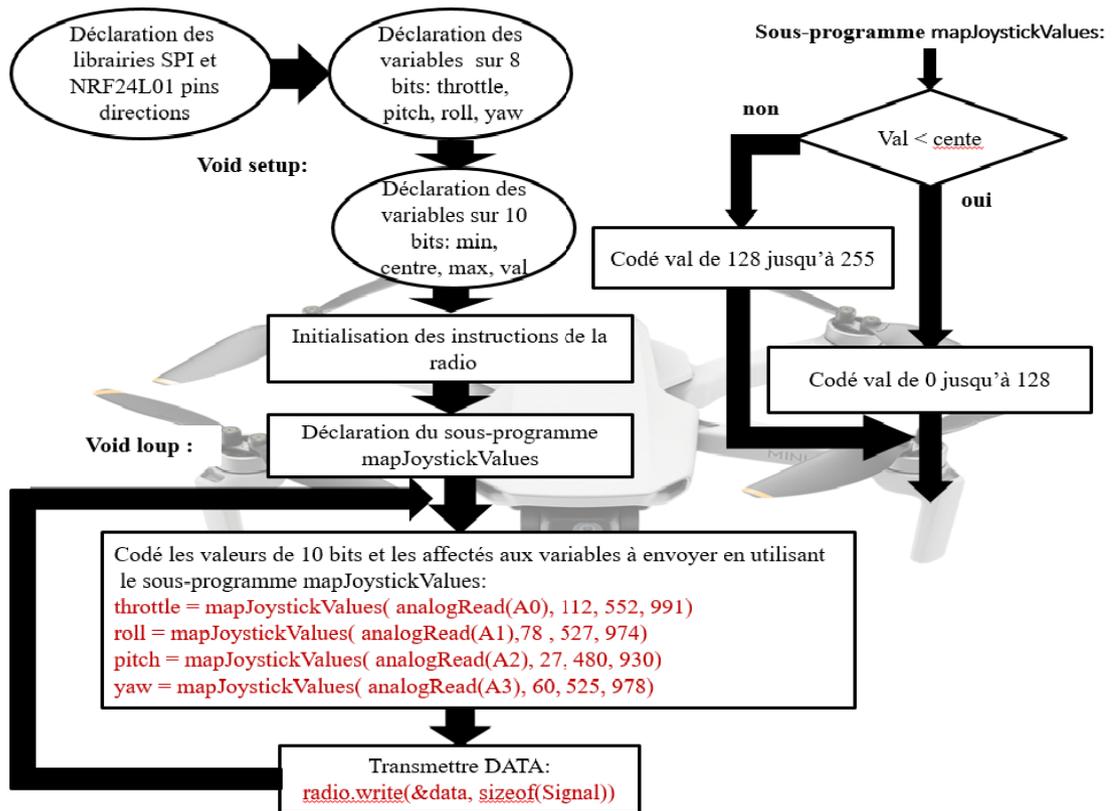


Figure 4.5 : algorithme de transmetteur RF

IV. 3. Réalisation du récepteur RF 2.4 GHz

Voici notre récepteur RF :

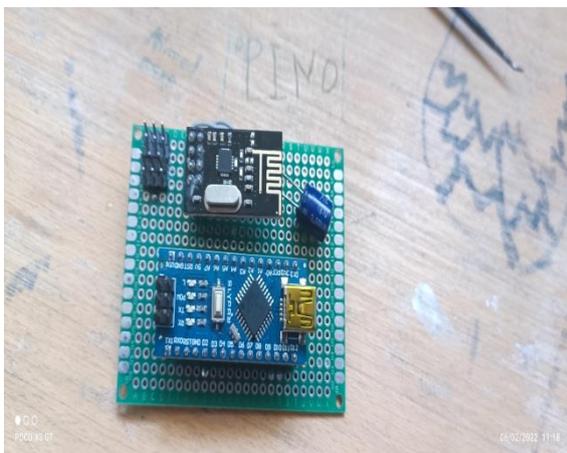


Figure 4. 6: récepteur RF

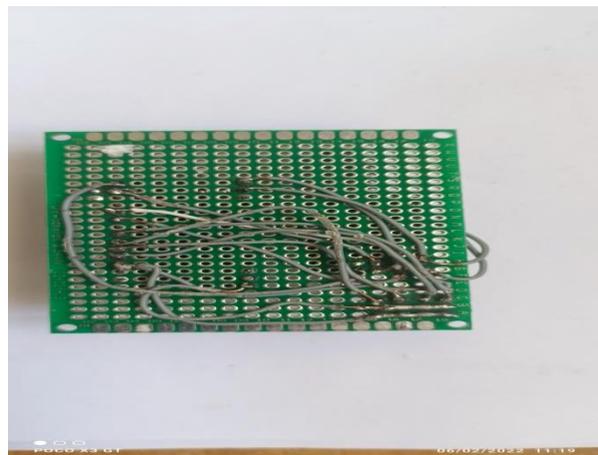


Figure 4. 7: câblage de récepteur RF

Chapitre IV : Réalisation du quadcopter

Un récepteur qui se compose d'un Arduino Nano et un NRF24L01 est nécessaire pour chaque émetteur pour lire les signaux émis et lui transmettre au contrôleur de vol, dans lequel les récepteurs radio génèrent des signaux de 1000 à 2000 microsecondes de sortie PWM, car il s'agit des largeurs d'impulsion nécessaire pour faire fonctionner les ESC's.

IV.3.1. Schéma électronique

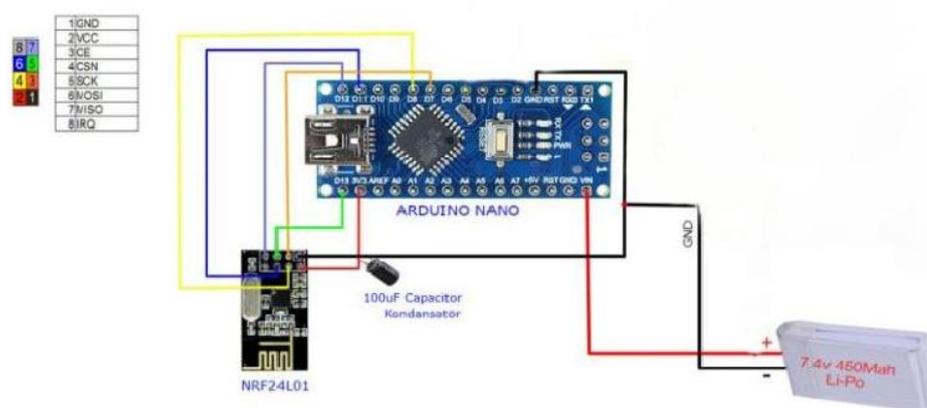


Figure 4. 8: schéma électronique de récepteur RF 2.4 GHz

Concernant notre schéma on a besoin de 4 « headers » avec trois sorties qui représentent successivement une ligne de Vcc, une ligne de GND et la dernière ligne pour le signal, dans lequel les connexions de l'Arduino Nano au NRF24L01 sont les mêmes que dans l'émetteur radio, comme il est schématisé ci-dessus **Figure 4.6**.

Pour l'alimentation de notre récepteur nous pourrions utiliser directement les 11.1 volts de la batterie LIPO du drone.

IV.3.2. Test du récepteur RF

Après avoir terminé la réalisation de l'émetteur et de récepteur RF, nous devons ensuite tester les signaux de contrôle PWM sortant du récepteur parce que ce sont les impulsions de commande qui doivent être transmises au contrôleur de vol. Nous pouvons connecter les broches de sortie numériques du récepteur RF au canal d'entrée de l'oscilloscope afin de pouvoir visualiser un seul signal PWM, puis modifier les positions des joysticks.

Chapitre IV : Réalisation du quadcopter

Pour connaître la variance des 4 signaux à la fois, nous avons utilisé un petit programme de test qui apporte les valeurs des signaux de commande PWM sur le moniteur série de l'Arduino IDE, ces valeurs vont de 1000 microsecondes à 2000 microsecondes avec une centrale impulsion de 1500 microsecondes.

```

COM6 (Arduino/Genuino Uno)
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1496 Throttle:^^2000 Yaw:++1500
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1496 Throttle:^^2000 Yaw:++1500
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1500 Throttle:^^1995 Yaw:++1500
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1496 Throttle:^^1995 Yaw:++1500
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1496 Throttle:^^2000 Yaw:++1504
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1500 Throttle:^^1995 Yaw:++1500
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1500 Throttle:^^1995 Yaw:++1504
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1500 Throttle:^^1995 Yaw:++1500
Start:0 Roll:++1496 Pitch:++1500 Throttle:^^2000 Yaw:++1504
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1496 Throttle:^^2000 Yaw:++1504
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1500 Throttle:^^1995 Yaw:++1504
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1500 Throttle:^^2000 Yaw:++1504
Start:0 Roll:++1500 Pitch:++1496 Throttle:^^2000 Yaw:++1500
  
```

Figure 4. 9: valeurs afficher sur le moniteur série de l'Arduino IDE des signaux PWM

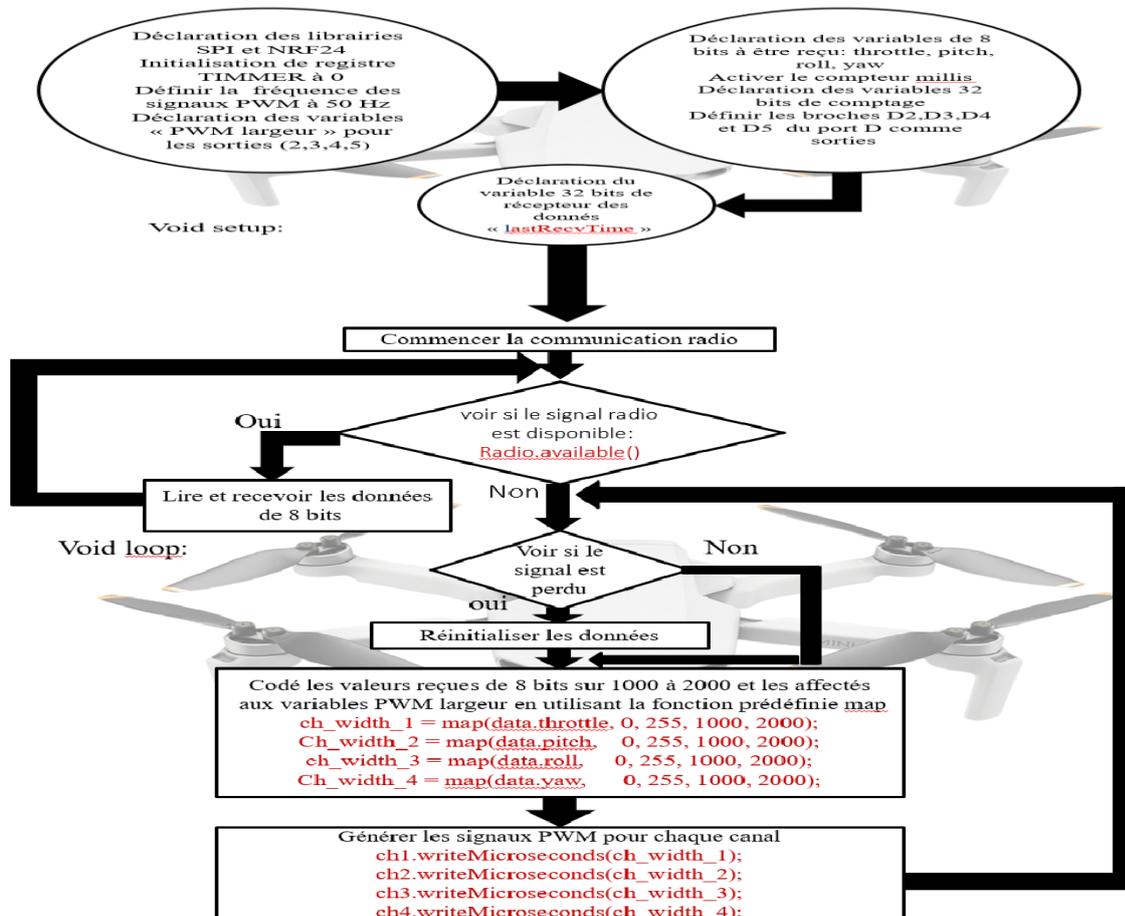


Figure 4.10 : algorithme de récepteur

IV.4. Contrôleur de vol du quadcopter

Le contrôleur de vol réalisé dans notre projet se compose d'un Arduino Nano et un MPU-6050 qui contient lui-même un gyroscope et un accéléromètre.

Le rôle de contrôleur de vol est de gérer la stabilité du drone et de donner des consignes de puissance aux ESC.

Il sert aussi à lire et calculer les largeurs des impulsions PWM venant du récepteur RF afin qu'ils puissent être utilisés pour contrôler le mouvement du quadcopter.

La sortie de gyro à n'importe quel moment si par exemple le quadcopter fait tourner autour de son axe de lacet avec 360° pendant 10 seconde est : $36^\circ/\text{sec} \times 65,5 = 2358$ Car à chaque seconde le gyro tourne 36°

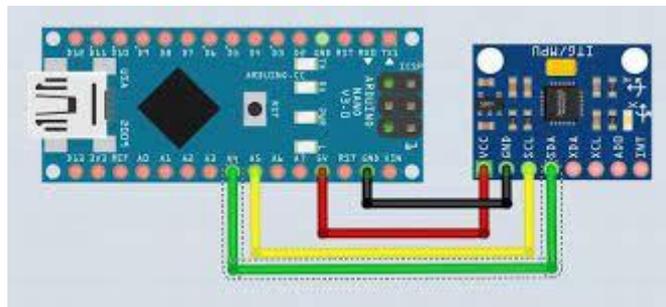


Figure 4. 11: Câblage de contrôleur de vol du quadcopter.

Remarque : Avant de faire voler notre drone il faut placer le MPU-6050 au centre de châssis pour le faire calibrer à l'aide d'un logiciel Multiwii.

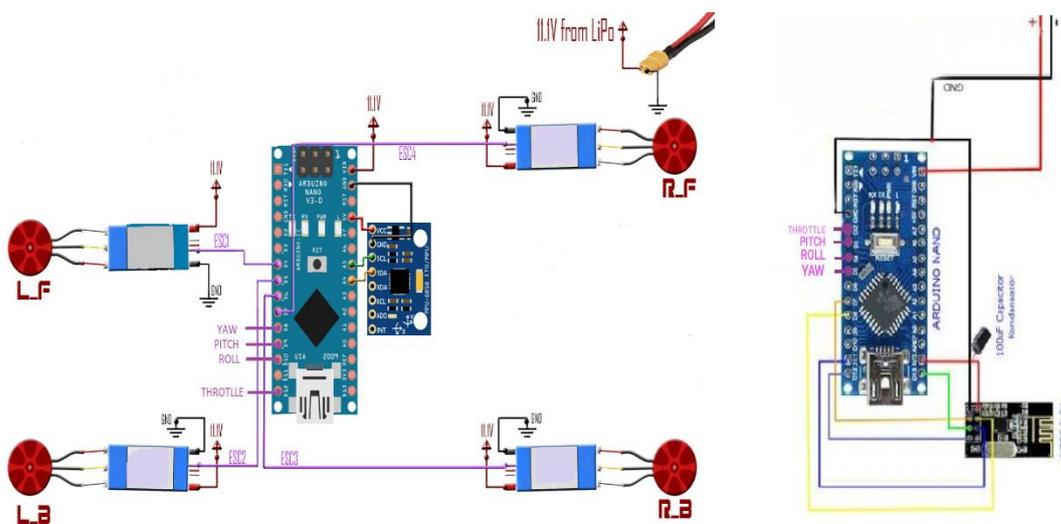


Figure 4.12: Câblage complet du quadcopter

IV.5. Conclusion

On a vu dans le contenu de ce chapitre les différents éléments qui composent notre drone quadcopter tels que : l'émetteur RF, récepteur RF ainsi le contrôleur de vol, dans lequel on a pu expliquer le rôle de chaque élément réaliser pour bien transmettre l'information réelle aux lectures.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce chapitre nous avons présenté l'ensemble des drones existants aussi bien dans le domaine civil que dans le domaine militaire ou recherche. Dans chacune des catégories nous avons donné des photos réelles avec un descriptif et avantage ou inconvénient de chaque type. Cette présentation est faite de sorte à situer l'objectif de notre travail.

Dans notre projet de fin d'étude intitulé "étude et réalisation d'un drone" nous nous intéressons à l'étude et la réalisation d'un quadcopter. Ce choix n'était pas fortuit. Mais au contraire, il est basé sur une réflexion mûrie et des objectifs bien définis. Alors, nous avons voulu que ce travail soit avant tout un complément à notre stage. Donc ça devrait être essentiellement orienté vers l'électronique embarquée mais aussi un projet interdisciplinaire afin de nous permettre de comprendre et de maîtriser les intersections possibles entre notre spécialisation avec diverses autres spécialités techniques. A cet effet, les systèmes quadcopters ont besoin de beaucoup de connaissances dans une variété de domaines tels que : mécanique, aéronautique, informatique, automatisme, électronique et aussi télécommunications. Le premier chapitre que nous voulions de la manière la plus succincte possible, il présente l'état de l'art et les généralités des drones. Le deuxième chapitre est consacré au principe et fonctionnement d'un quadcopter. Le troisième chapitre est consacré aux équipements essentiels du quadcopter. Le quatrième chapitre est le cœur de notre projet, il est dédié à la réalisation du quadcopter.

Sur cette base, nous avons conclu notre mémoire et espérons transmettre la plupart de nos idées et informations aux lecteurs.

Références et Bibliographie :

- [1] (s.d.). Récupéré sur <https://www.universalis.fr/encyclopedie/drones/2-histoire-des-drones/>.
- [2] (s.d.). Récupéré sur <https://wikimemoires.net/2021/02/drones-historique-differentes-categories/>.
- [3] Zitouni, A. A. (s.d.). mémoire fin d'études master en électronique. conception et réalisation d'un quadcopter UAV références[9.10].
- [4] R. Lozano, P. C. (s.d.). stabilisation de véhicules aériens à décollage vertical: théorie et application. rapport heudiasyc UMR CNRS 6599-UTC compieg.
- [5] (s.d.). Récupéré sur <https://altitude-drones.be/>.
- [6] OLIVIER, (s.d.). Mémoire présenté à l'école de technologie supérieure. CONCEPTION D'UNE INFRASTRUCTURE DE PILOTAGE ROBUSTE DE DRONES QUADRICOPTÈRES AVEC INTÉGRATION D'AVIONIQUE TYPE G-1000 POUR DES MISSIONS STRATÉGIQUES ÉLOIGNÉES, référence[3].
- [7] I, G. B. (2008). pilotage d'un quadri-rotor via un FPGA. Tuteur ESIEE engineerig.journées pédagogique.
- [8] (s.d.). Récupéré sur <https://www.paperblog.fr/5374003/quadricoptere-fonctionnement-configuration-et-pilotage-rc/>.
- [9] (s.d.). Récupéré sur <https://wikimemoires.net/2021/02/domaines-application-mouvements-du-quadrotor/>.
- [10] H, K. (2012). Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes. Thèse de magister. Université de sétif.
- [11] (s.d.). Récupéré sur http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/projects/tb_2014/Rapport%20Final_Vuille.pdf.
- [12] (s.d.). Récupéré sur http://www.afcadillac.net/_serveurs/drone/composition_dun_drone.html.
- [13] (s.d.). Récupéré sur <https://filmora.wondershare.fr/drones/drone-applications-and-uses-in-future.html>.
- [14] (s.d.). Récupéré sur <https://www.journaldunet.fr/guides-d-achat/guide-d-achat-informatique/1501405-arduino/>.

Références et bibliographies

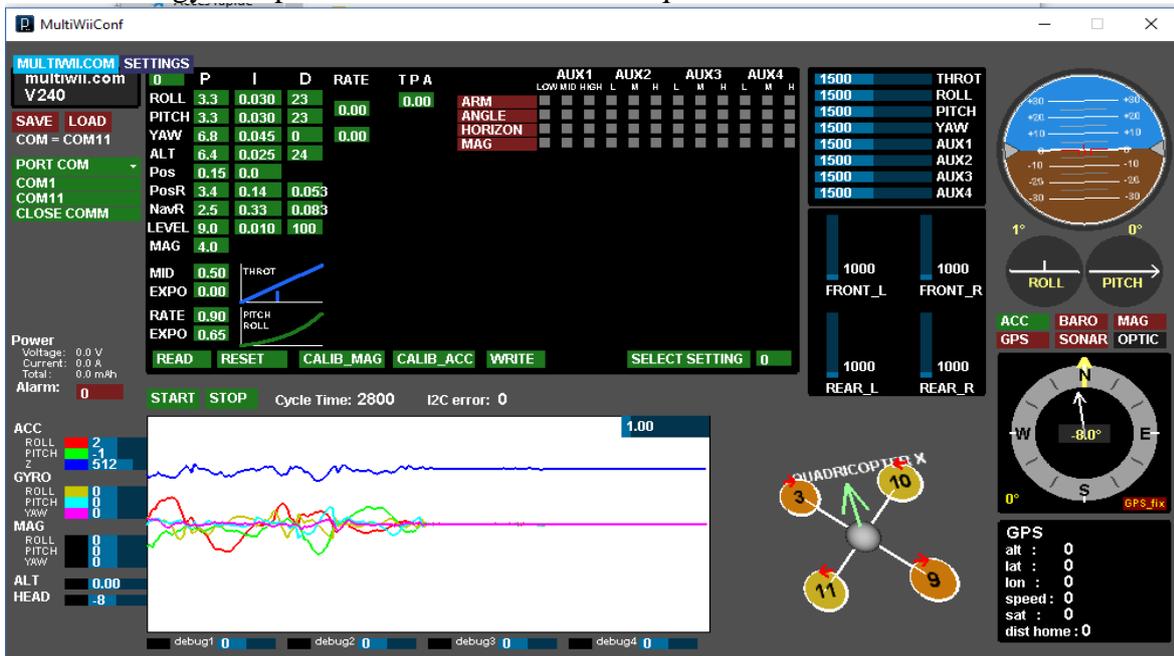
- [15] (s.d.). Récupéré sur <https://www.avg.com/fr/signal/the-ups-and-downs-of-drones#topic-1>.
- [16] (s.d.). Récupéré sur <https://www.informatique-mania.com/materiel/joystick-arduino/>.
- [17] (s.d.). Récupéré sur <https://www.aranacorp.com/fr/utilisation-dun-radio-module-nrf24l01-avec-arduino/>.



Annexe

1. programme MultiWii

MultiWii est un logiciel à usage général sert à contrôler un modèle RC multimoteur. Il peut maintenant utiliser différents capteurs, mais a été développé à l'origine pour calibrer et contrôler les gyroscopes et les accéléromètres tels que MPU-6050.

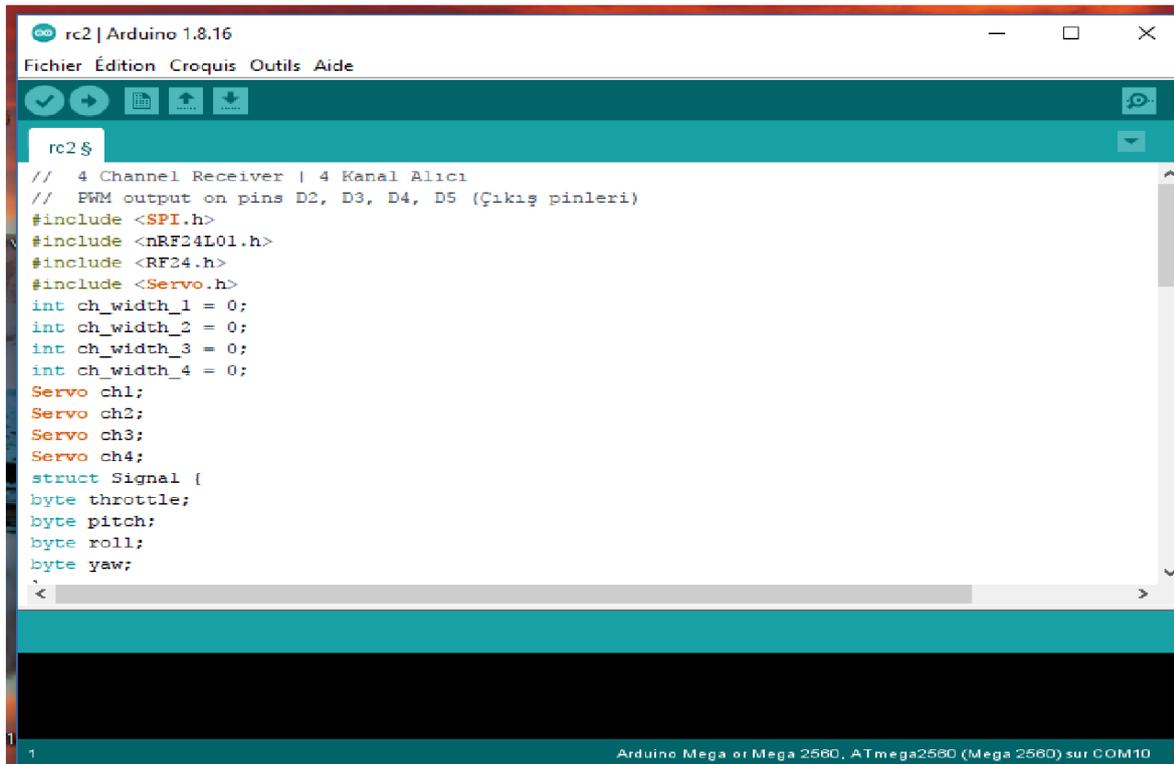


2. programme arduino pour controleur de vol

```

f1i_controler | Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
File Edit Sketch Tools Help
f1i_controler
/* http://www.youtube.com/c/electrionoobs
 *
 * This is an example where we control two axis drone with PID
 * and data from the radio receiver and the MPU6050 module
 *
 * Arduino pin | MPU6050
 * 5V | Vcc
 * GND | GND
 * A4 | SDA
 * A5 | SCL
 *
 * F_Left_motor | D4
 * F_Right_motor | D7
 * B_Left_motor | D5
 * B_Right_motor | D6
 */
#include <Wire.h>
#include <Servo.h>
    
```

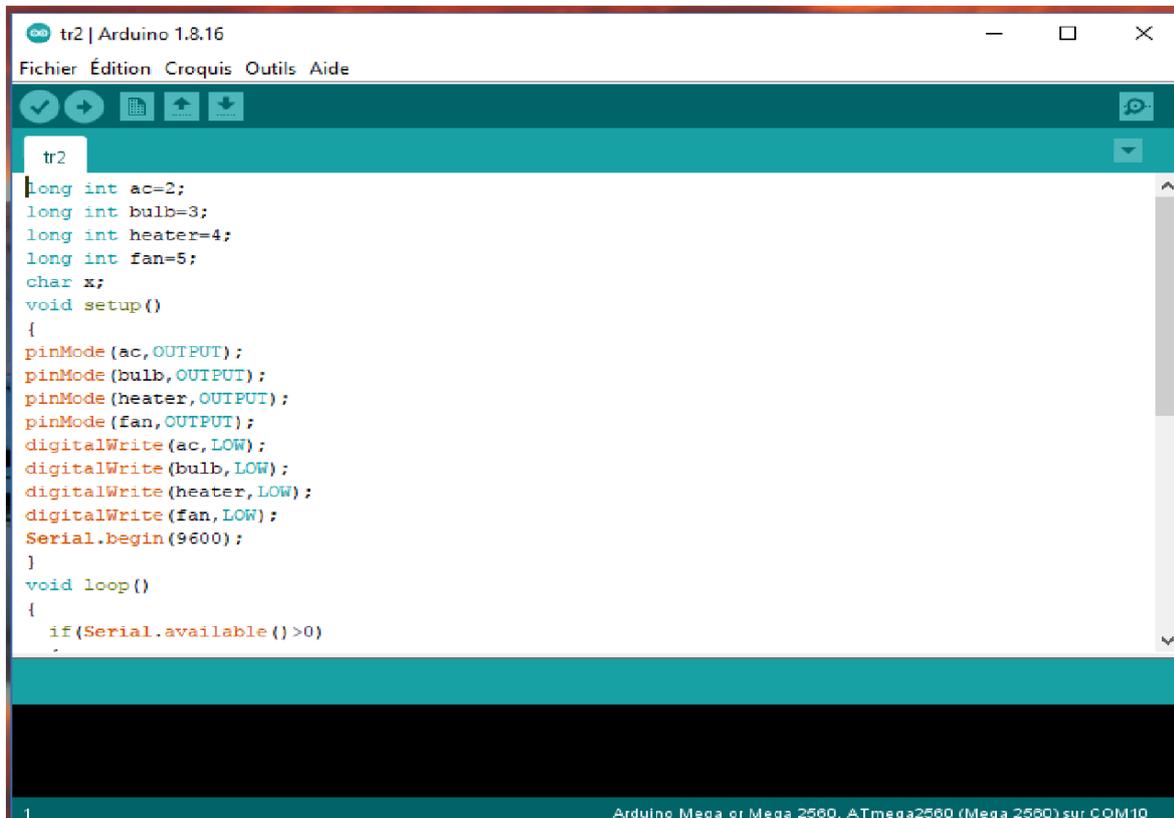
3. programme arduino pour recepteur



The screenshot shows the Arduino IDE interface with a program titled "rc2". The code is for a 4-channel receiver. It includes libraries for SPI, nRF24L01, RF24, and Servo. It defines four channel widths and four Servo objects. A Signal struct is defined with fields for throttle, pitch, roll, and yaw. The code is ready to be compiled for an Arduino Mega or Mega 2560.

```
rc2 $
// 4 Channel Receiver | 4 Kanal Alıcı
// PWM output on pins D2, D3, D4, D5 (Çıkış pinleri)
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <Servo.h>
int ch_width_1 = 0;
int ch_width_2 = 0;
int ch_width_3 = 0;
int ch_width_4 = 0;
Servo ch1;
Servo ch2;
Servo ch3;
Servo ch4;
struct Signal {
byte throttle;
byte pitch;
byte roll;
byte yaw;
};
<
1 Arduino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) sur COM10
```

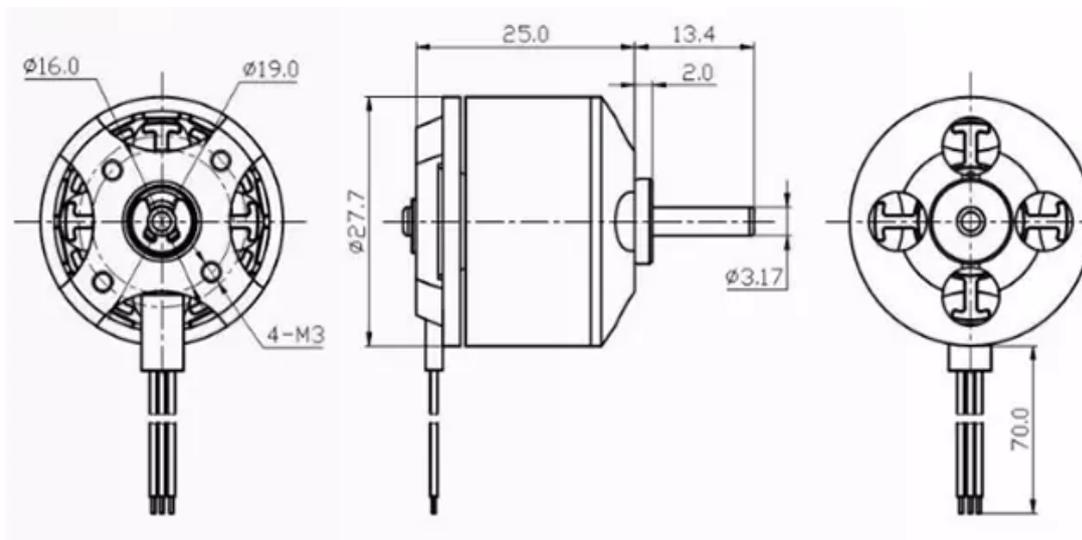
4. programme arduino pour l'emeteur



The screenshot shows the Arduino IDE interface with a program titled "tr2". The code defines four long integers (ac=2, bulb=3, heater=4, fan=5) and a char variable x. The setup function configures the pins for output and sets the initial state to LOW. The loop function checks for serial input. The code is ready to be compiled for an Arduino Mega or Mega 2560.

```
tr2
long int ac=2;
long int bulb=3;
long int heater=4;
long int fan=5;
char x;
void setup()
{
pinMode (ac, OUTPUT);
pinMode (bulb, OUTPUT);
pinMode (heater, OUTPUT);
pinMode (fan, OUTPUT);
digitalWrite (ac, LOW);
digitalWrite (bulb, LOW);
digitalWrite (heater, LOW);
digitalWrite (fan, LOW);
Serial.begin (9600);
}
void loop()
{
if (Serial.available () > 0)
.
1 Arduino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) sur COM10
```

5. caractéristiques d'un moteur brushless A2212-13T



No. of Cells:	2 - 3 Li-Poly 6 - 10 NiCd/NiMH
Kv:	1000 RPM/V
Max Efficiency:	80%
Max Efficiency Current:	4 - 10A (>75%)
No Load Current:	0.5A @10V
Resistance:	0.090 ohms
Max Current:	13A for 60S
Max Watts:	150W
Weight:	52.7 g / 1.86 oz
Size:	28 mm dia x 28 mm bell length
Shaft Diameter:	3.2 mm
Poles:	14
Model Weight:	300 - 800g / 10.5 - 28.2 oz