

N° Ordre...../Faculté/UMBB/2021

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



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

**Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme**

**MASTER 2**

Présenté par

**LEULMI Abderrahmane**

Filière : Automatisation des procédés industriels

Option : Commande automatique

**Thème**

---

**Modélisation, commande et réalisation d'un drone  
quadrirotor avec un contrôleur PID**

---

**Devant jury :**

Mme ACHELI Dalila	Pr	FT	Président
Mr HAMADACHE Mohamed	MCB	FHC	Examineur
Mme. KAHOUL Fadhila	MCB	FHC	Encadreur

2021/2022

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



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**  
Département : Automatisation  
Filière : Automatisation des procédés industriels  
Option : Commande automatique

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme**

**MASTER 2**

**Thème**

---

**Modélisation, commande et réalisation d'un drone  
quadrirotor avec un contrôleur PID**

---

**Présenté par :**  
LEULMI Abderrahmane

**Avis favorable de l'encadreur :**  
F. KAHOUL signature

**Avis favorable du Président du jury**

**Nom Prénom**  
Mme ACHELI Dalila

**Signature**

**Cachet et signature**

## **Remerciements**

*Tout d'abord, je remercie le Dieu de nous avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier mon encadreur, madame « KAHOUL. F », pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.*

*Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, ainsi que le personnel et les enseignants du département de d'automatisation et électrification industrielles.*

*Un grand merci à mes parents et mes amis et collègues pour leur soutien moral et matériel.*

*J'exprime toute ma gratitude au club « AEPI New Vision » qui m'a acquis des connaissances sur le côté professionnel et pratique hautement dévouer.*

*A tous mes enseignants qui m'ont initié aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect et d'un profond amour.*

***Merci à vous tous***

## *Dédicace :*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Que Dieu vous garde et vous protège.*

*A ma chère sœur Kater Elnada, et mon cher frère Ahmad Yacine pour leurs soutien moral et matériel. Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère pour vous.*

*A mes chers grands-parents.*

*A mon oncle, ma tante, mes cousins, tantes paternelles que Maternelles.*

*A tous mes chers amis : Lounes, Youness, Aymen, Youcef, Abdelkader, Achraf, Hamza, Chamse Elddine, Mohammed, Hichem.*

*A tous la famille Leulmi, Djaafarou, Hedna.*

*A tous mes nouveaux amis que j'ai rencontrés durant mon stage à  
Bejaya*

*A tous mes camarades de groupe MACA17 et tous les membres de club scientifique AEPI New Vision.*

*A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.*

*A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.*

## Table des matières

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I Généralités sur les drones</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Définition d'un drone .....	3
I.3. Évolution des drones .....	4
I.3.1. Prémisses des premiers drones.....	4
I.3.2. Période de la Première Guerre mondiale .....	4
I.3.3. Milieu de la 1 <sup>ère</sup> guerre mondiale .....	4
I.4. Classification des drones .....	5
I.4.1. Selon La mission.....	5
I.4.1.1. Combat .....	5
I.4.1.2. Logistique.....	5
I.4.1.3. Civile .....	6
I.4.1.4. Reconnaissance .....	6
I.4.1.5. Recherche et développement.....	7
I.4.2 Selon la propulsion .....	7
I.4.2.1 Les drones à voilure fixe .....	7
I.4.2.2 Les drones à voilure tournante .....	8
I.4.2.3 Les drones à ailes battantes .....	9
I.4.3. Selon le nombre de rotors .....	9
I.4.3.1 bi-rotors .....	10
I.4.3.2 Tri-rotors .....	11
I.4.3.3 Quadro-rotors .....	12
1.4.4. Classification en fonction de R.E.A .....	13
I.5 Application récente des drone (Lutte contre la pandémie COVID-19).....	14
I.6. Avantages et inconvénients des drones .....	15
I.7. Conclusion .....	16
<b>Chapitre II Les composants d'un quadricoptère</b>	
II.1. Introduction .....	17
II.2. Conception générale.....	17

II.2.1 Description générale du quadcoptère .....	17
II.2.2 Mouvements du quadcoptère.....	18
II.2.2.1. Mouvement de roulis .....	19
II.2.2.2. Mouvement de tangage .....	19
II.2.2.3. Mouvement de lacet.....	20
II.2.2.4. Mouvement vertical .....	21
II.2.2.5. Mouvements de translation .....	21
II.3. Description générale sur Les composants utilisés.....	22
II.3.1. Moteurs.....	22
II.3.2. Contrôleurs de vitesse électroniques .....	23
II.3.2.1. Fonctionnement.....	24
II.3.3. Batterie.....	25
II.3.3 Hélices .....	27
II.3.4 Chargeur les batteries Li-po .....	28
II.3.5 Châssis .....	29
II.3.6. Contrôleur de vol .....	30
II.3.6.1. Arduino .....	30
II.3.6.2. Module ESP8266 .....	32
II.3.7 Module MPU- 6050.....	32
II.3.8 Télécommande.....	34
II.3.8.1 Module nRF24L01 .....	34
II.4. Conclusion.....	35
<b>Chapitre III: Modélisation &amp; commande du quadricoptère</b>	
III.1 Introduction.....	36
III.2 Six degrés de liberté.....	36
a) Système de coordonnées lié à la terre .....	37
b) Système de coordonnées attaché aux corps.....	37
III.3 Fonctionnement d'un quadcoptère.....	38
III.4 Modèle mathématique d'un quadricoptère .....	39
III.4.1 Systèmes de coordonnées et matrices de transformation .....	40
III.4.2 Forces et couple agissant sur le quadcoptère .....	42
a) Force de poussée .....	42

b) Les intensités des moments .....	42
c) La force gravitationnelle <b><i>F<sub>g</sub></i></b> .....	44
d) Les forces de résistance aérodynamique .....	44
III.4.3 Modèle de quadcoptère dynamique non linéaire .....	45
III.5 Modèle de simulation et test de modèle.....	48
III.5.1 Test de modèle en boucle ouverte .....	50
III.5.2 Test de modèle en boucle fermée.....	52
III.5.2.1 Réglage du contrôleur.....	52
III.5.2.2 Processus de réglage.....	53
III.6 Conclusion .....	57
<b>Chapitre IV Tests réels &amp; discussions des résultats</b>	
IV.1 Introduction.....	58
IV.2 Principaux composants nécessaire à la réalisation .....	58
IV.3 Tests des composants utilisés .....	60
IV.3.1 Première expérience.....	60
IV.3.1.1 Branchement des ESC avec le moteur et la carte Arduino.....	61
IV.3.1.2 Communication entre deux Arduino via module NRF24 L01 .....	63
IV.3.1.3 L'utilisation d'un joystick avec la carte Arduino .....	65
IV.3.1.4 Résultats obtenus.....	66
IV.3.2 Deuxième expérience.....	66
IV.3.2.1 Branchement des composants .....	67
IV.3.2.2. Les tests sur le bicoptère.....	73
IV.3.3 Troisième expérience .....	80
IV.4 Conclusion .....	81
Conclusion générale.....	84

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau III.1 : Les paramètre de modèle de simulation.....	49
Tableau IV.1 Brochage des modules NRF24L01 .....	63
Tableau IV.2 Broches de communication à l'Arduino .....	63

# LISTE DES FIGURE

## Chapitre I

Figure I.1: General Atomics MQ-9 Reaper .....	5
Figure I.2: Drone logistique .....	6
Figure I.3: Drone de photographie .....	6
Figure I.4: Drone de reconnaissance .....	7
Figure I.5: Drone à voilure fixe .....	8
Figure I.6: Drone à voilure tournante .....	8
Figure I.7: Drone à ailes battantes .....	9
Figure I.8: L'hélicoptère thermique .....	10
Figure I.9: Hélicoptère classique .....	10
Figure I.10 : Hélicoptère en tandem .....	11
Figure I.11 : Hélicoptère coaxial .....	11
Figure I.12: Drone Tri-rotors .....	12
Figure I.13: Quadricoptère .....	12
Figure II.1 : Quadricoptère .....	18
Figure II.2 : Illustration du mouvement de roulis [11] .....	19
Figure II.3 : Illustration du mouvement de tangage [11] .....	20
Figure II.4 : Illustration du mouvement de lace [11] .....	20
Figure II.5 : Illustration du mouvement vertical [11] .....	21
Figure II.6 : Illustration du mouvement de translation [11] .....	21
Figure II.7 : Moteur Brushless .....	23
Figure II.8 : Contrôleurs de vitesse électroniques .....	25
Figure II.9: Batterie Li Po .....	27
Figure II.10 : Différents types d'Hélices .....	28
Figure II.11 : Lipro balance charger .....	29
Figure II.12 : Châssis .....	30
Figure II.13 : Arduino uno .....	31
Figure II.14 : Arduino mega .....	31
Figure II.15 : Module ESP826 .....	32
Figure II.16 : Module MPU- 6050 .....	33
Figure II.17 : Module émetteur-récepteur sans fil nRF24L01+ PA + LNA avec antenne externe .....	34
Figure III.1: Six degrés de liberté .....	36
Figure III.2 : Système de coordonnées .....	37
Figure III.3 : Mode de contrôle d'un quadricoptère .....	39
.....	49
Figure III.4: Modèle de simulation de quadcoptère .....	49
Figure III.5 : La structure du modèle de test en boucle ouvert .....	50
Figure III.6 : Résultats des tests de simulation en boucle ouverte .....	51

Figure III.7 : Structure du modèle de test en boucle fermie .....	52
Figure III.8 : Résultats des tests de simulation en boucle fermi (correcteur p) .....	53
Figure III.9 : Résultats des tests de simulation en boucle fermi (correcteur p et d) .....	54
Figure III.10 : Résultats des tests de simulation en boucle fermi (correcteur PID).....	55
Figure III.11 : Résultats des tests de simulation en boucle fermi (correcteur PID).....	56
Figure IV.1 : Conception général du quadcoptère à réaliser. ....	59
Figure IV.2 : Le branchement de la première expérience.....	60
Figure IV.3 : Branchement des ESC avec le moteur et la carte Arduino .....	61
Figure IV.4 : Le code Arduino pour calibrer les ESC : .....	62
Figure IV.5 : Sésultat obtenue du calibrage des ESC .....	62
Figure IV.6 : Montage d'un Arduino et deux NRF .....	64
Figure IV.7 : Code de la réalisation de l'envoi d'un message « Hello World » d'un Arduino à l'autre .....	64
Figure IV.8 : Branchement d'un joystick avec la carte Arduino .....	65
Figure IV.9: Le code Arduino de Branchement d'un joystick avec la carte Arduino .....	66
Figure IV.10: Le branchement de la deuxième expérience. ....	67
Figure IV.11: Schéma de câblage pour relier le capteur à l'Arduino .....	69
Figure IV.13: Schéma synoptique de régulation PID .....	70
Figure IV.14: Schéma fonctionnel du bicoptère avec un régulateur proportionnel $k_p = 5$ . ....	73
Figure IV.15: La variation de l'angle $\theta$ en fonction du temps avec $k_p = 5$ .....	74
Figure IV.16: La variation de la vitesse des moteurs en fonction du temps avec $k_p = 5$ . ....	75
Figure IV.17: Schéma fonctionnel du bicoptère avec un régulateur $k_p = 5, k_d = 0.001$ . ....	75
Figure IV.18: La variation de l'angle $\theta$ en fonction du temps avec $k_p = 5$ et $k_d = 0.001$ .....	76
Figure IV.19: La variation de l'angle $\theta$ en fonction du temps avec $k_p = 5$ $k_d = 0.01$ $k_i = 0$ . ....	76
Figure IV.20: La variation de la vitesse des moteurs en fonction du temps avec $k_p = 5$ , $k_d = 0.01$ et $k_i = 0$ . ....	77
Figure IV.21: Schéma fonctionnel montrant les paramètres du régulateur PID.....	78
Figure IV.22: La variation de l'angle $\theta$ en fonction du temps avec $k_p = 5$ , $k_d = 0.01$ et $k_i = 0.01$ . ....	78
Figure IV.23: La variation de l'angle $\theta$ en fonction du temps avec $k_p = 3, k_d = 0.8$ et $k_i = 0.001$ . ....	79
Figure IV.24: Partie de la courbe de variation de l'angle $\theta$ en fonction du temps après la stabilité avec $k_p = 5$ , $k_d = 0.8$ $k_i = 0.001$ . ....	79
Figure IV.25: Le montage de la troisième expérience. ....	81

## Liste des acronymes

**U.A.V:** Unmanned Aerial Vehicle

**HALE :** Haute Altitude Longue Endurance

**MALE :** Moyenne Altitude Longue Endurance

**UCAV :** Unmanned Combat Air Vehicles

**TUAV:** Tactical Unmanned Aerial Vehicle

**MAV:** Mini Air Véhicule

**DDL :** Degré de liberté

**BLDC :** Brushless DC motor

**PID:** Proportional, Integral, Derivative

**ESC:** Electronic Speed Controller

**PWM:** Pulse Width Modulation

**PPM:** Pulse Position Modulation

**RPM:** Rotations Per Minute

# *Introduction générale*

## *Introduction générale*

La robotique est présente dans la vie depuis un certain temps, il s'agit d'une science et d'une technologie récentes. Pour le moment, les robots tels que nous les connaissons sont simplement des produits ménagers, (autrement appelés : robots ménagers) tels que le lave-vaisselle, la machine à laver, ... ; ou alors des produits domotiques (par exemple des chauffages, volets roulants, portes de garage, ...). Ils sont également présents dans l'informatique (Des PC, ou des machines plus sophistiquées comme des simulateurs). Mais bientôt, Dans un proche avenir, davantage de robots développés seront introduits sur le marché. Ceux-ci seront de plus en plus performants, autonomes aussi. Comme les drones, ils sont de plus en plus utilisés dans un grand nombre de domaines par exemple la surveillance du trafic routier, l'exploration environnementale, la cartographie et prise de vue aérienne sans compter toutes les utilités militaires.

Récemment, le contrôle des machines volantes a suscité l'intérêt des informaticiens. Diverses approches de contrôle des avions ont été proposées, hélicoptères, fusées, satellites, mini hélicoptères, drones, etc. Chacun de ces appareils ne dispose pas de modèle précis décrivant son comportement.

L'intérêt pour les drones aériens contrôlés à distance semble croître, en particulier pour les applications militaires, (démunage par exemple) et l'intervention dans des milieux hostiles (milieux radioactifs). On peut imaginer qu'un drone explore un bâtiment ou un tunnel contaminé et effectue une première observation avant toute intervention humaine.

Dans ce mémoire, nous mettons l'accent en particulier sur les véhicules aériens miniatures et plus particulièrement sur les quadrirotors, (micro hélicoptère à quatre hélices). Les drones à quatre rotors sont parmi les objets volants les plus complexes, parce que leur dynamique de vol est intrinsèquement non linéaire et que les variables sont fortement couplées. Le quadrirotor peut faire du vol stationnaire, ce qui est nécessaire dans certaines applications.

L'objectif de ce projet est d'élaborer le modèle mathématique d'un quadrirotor et le commander par un contrôleur PID. Pour simuler le modèle obtenu nous allons utiliser le

SIMULINK de MATLAB. Par la suite, Nous visons d'effectuer une implémentation réelle de ce projet, autrement dit la conception d'un drone piloté via une radiocommande (RF).

Notre mémoire est structuré comme suit :

**Chapitre 1** généralités sur les drones : dans ce chapitre, on présente les types de drones existants ainsi que l'historique d'évolution de ces derniers, puis on présente des exemples et les avantages et inconvénients des drones.

**Chapitre 2** les composants d'un quadricoptère : ce chapitre est consacré à la présentation de tous les composants constituant un drone quadrirotor ainsi que les mouvements qui gouvernent le fonctionnement du quadrirotor dans l'aéronautique.

**Chapitre 3** modélisation du quadricoptère : Dans ce chapitre une description du principe de fonctionnement du drone quadrirotor est présentée avec une description détaillée sur ses mouvements possibles ainsi que les modes de vol. En se basant sur les lois de la cinématique (Newton-Euler), ce chapitre présente une modélisation dynamique du drone quadrirotor. Connaissant les relations entre les poussées des différents moteurs et les accélérations angulaires. On peut établir un modèle sous MATLAB Simulink.

**Chapitre 4** tests réels et discussion des résultats : la conception et la réalisation de la partie opérationnelle et de commande seront le sujet de ce chapitre, la mise en place des différents composants qui composent notre drone est expliquée, ainsi que les choix de chaque élément, ce chapitre est dédié aussi aux différents tests de notre réalisation, les premiers tests seront réalisés sur un bicoptère ensuite le quadricoptère.

**Ce travail est clôturé par une conclusion générale.**

# ***CHAPITRE 1***

## ***Généralités sur les drones***

# ***Chapitre 1 Généralités sur les drones***

## **I.1. Introductyion**

Les véhicules aériens sans pilote (UAV), communément appelés drones, sont devenus un outil standard pour la collecte de données, la cartographie et l'inspection visuelle dans l'architecture, l'ingénierie, la construction et la gestion des installations. Les drones puissent ajouter de la valeur grâce à la réduction des coûts et l'amélioration de la précision et de la rapidité de certaines tâches [1].

Dans ce chapitre nous allons exposer des généralités sur les drones. Nous commençons par la définition et l'évolution des drones au fil du temps. Par la suite, nous allons énumérer les différentes classifications des drones et leurs domaines d'utilisation.

## **I.2. Définition d'un drone**

Un drone ou UAV est un aéronef inhabité, inclus dans le domaine de la robotique aérienne, qui peut voler de façon autonome ou être contrôlé à distance depuis le sol [19].

Les principales caractéristiques des drones sont : l'altitude, l'endurance, la vitesse, le rayon d'action, la capacité d'emport de charges utiles, la discrétion et le niveau d'autonomie d'exécution définies par le type de mission à réalise.

Les drones peuvent effectuer des missions variées, pour des usages civils ou militaires selon son genre, ils sont essentiellement utilisés pour faire quelque chose que les êtres humains ne peuvent pas réaliser.

Ils sont principalement utilisés par les militaires, la recherche scientifique, l'agriculture, la surveillance, la livraison de produits, la photographie aérienne, les loisirs, le contrôle du trafic, et bien sûr les attaques terroristes et la contrebande de drogues [20].

## **I.3. Évolution des drones**

### **I.3.1. Prémisses des premiers drones**

La première expérience de pilotage d'un véhicule aérien sans pilote (UAV) a été menée juste après environ une décennie d'expérience réussie de Wright Brother sur (Flying Machine). Depuis la technologie des véhicules aériens sans pilote s'est améliorée [21].

Bien qu'il soit généralement mentionné que la première utilisation d'un véhicule aérien sans pilote a eu lieu vers 1915 des auteurs comme (Wagner et Sloan font) remonter l'histoire des UAV à 2000 ans, lorsqu'un jeune homme en Chine s'est tenu sur une colline solitaire balayée par les vents et a fait voler le premier véhicule piloté à distance (RPV) de l'histoire - un "cerf-volant" avec un morceau de ficelle comme lien descendant avec le contrôleur au sol" [22]. L'utilisation par les Chinois de ces cerfs-volants armés contre l'ennemi a rapidement suivi. Le Dr Christina J. M. Goulter, qui a retracé l'histoire des drones, est du même avis. L'histoire des UAVs [22].

### **I.3.2. Période de la Première Guerre mondiale**

Au cours des deux mille ans suivants, de nombreuses tentatives de planeurs ont été faites, mais le 19<sup>ème</sup> siècle, les ballons ont été le deuxième développement majeur dans ce domaine. Leur utilisation lors le siège de Paris dans les années 1870 a constitué une étape majeure à cet égard. Le développement des aéronefs modernes sans pilote a eu lieu pendant la Première Guerre mondiale. En 1914, l'armée britannique a développé des "cibles aériennes" utilisées pour l'entraînement et les bombardements à longue portée [2] En 1917, deux Américains, Dr Peter Cooper et Elmer A. Sperry " ont effectué des essais avec leurs premières " torpilles aériennes " [3] à Long Island, New York, en décembre 1917... Un avion sans pilote plus sophistiqué a été conçu par le Dr. aéronef sans pilote plus sophistiqué a été conçu par Charles F. Kettering de Delco, plus tard General Motors. Connue sous le nom de "Kettering Bug".

### **I.3.3. Milieu de la 1<sup>ère</sup> guerre mondiale**

En octobre 1939, Argus a proposé un projet plus révolutionnaire utilisant un drone radiocommandé plus grand, baptisé Fernfeuer (feu profond)" [4]. Il s'agissait alors d'une idée révolutionnaire à l'époque, car s'ils étaient achevés, ils pouvaient être réutilisés et renvoyés à la

base après la fin de la mission. Réutilisés et retournés à la base après avoir livré la charge utile - la principale caractéristique des UCAV d'aujourd'hui. Caractéristique des UCAV d'aujourd'hui. Il n'a pas pu obtenir l'approbation des autorités allemandes [27].

## **I.4. Classification des drones**

### **I.4.1. Selon La mission**

Les drones peuvent être classés dans les six types suivants en fonction de leur mission :

#### **I.4.1.1. Combat**

Ils sont également connus sous le nom de Unnamed Combat Aerial Vehicles (UCAV), sont des aéronefs téléopéré. On en distingue différentes catégories mais nous nous limiterons ici aux drones MALE, aéronefs à voilure fixe de 1 à 3 tonnes, d'un plafond de 10 000 à 15 000 mètres et d'une endurance supérieure à 15 heures. Un tel drone dispose d'un système de navigation et d'un pilote automatique qui confèrent à l'aéronef une grande autonomie de navigation. Il est équipé de capteurs opto-électroniques et électromagnétiques et peut être armé de quelques missiles air-sol ou de bombes guidées. On peut citer à titre d'exemple General Atomics MQ-9 Reaper [5].



**Figure I.1:** General Atomics MQ-9 Reaper

#### **I.4.1.2. Logistique**

Les drones logistiques sont utilisés pour la livraison des biens ou de marchandises. Un certain nombre d'entreprises célèbres, comme Amazon et Domino's. Il est plus facile d'expédier des marchandises avec des drones lorsqu'il y a beaucoup de trafic dans les rues ou que l'itinéraire est difficile ou lorsque la route n'est pas facile à conduire. Voir figure ci-dessous [6].



**Figure I.2:** drone logistique

#### **I.4.1.3. Civile**

Les drones civils sont destinés à un usage général, comme la surveillance de l'agriculture. Les champs agricoles, la collecte de données et la photographie aérienne. L'image suivante est celle d'un drone de photographie aérienne [6].



**Figure I.3:** drone de photographie

#### **I.4.1.4. Reconnaissance**

Ces types de drones sont également connus sous le nom de drones de contrôle de mission. Il est assigné à une tâche et il l'accomplit automatiquement, et généralement retourne à la base par lui-même, donc ils sont utilisés pour obtenir des informations de l'ennemi sur le champ de bataille. Ces types de drones sont censés être petits et faciles à cacher. La figure suivante est d'un drone de reconnaissance [6].



**Figure I.4:** drone de reconnaissance

#### **I.4.1.5. Recherche et développement**

Ces types de drones sont utilisés pour collecter des données depuis l'air. Par exemple, certains drones sont utilisés pour collecter des données météorologiques [6].

#### **I.4.2 Selon la propulsion**

Les drones peuvent se décomposer en trois grandes familles :

##### **I.4.2.1 Les drones à voilure fixe**

Un drone à voilure fixe est composé d'ailes planes. Cette voilure permet à ces drones d'être mieux adaptés aux longues distances, qu'ils parcourent en dépensant moins d'énergie que les drones à voilure tournante. Ils restent les mieux placés en termes d'autonomie, qui peut aller jusqu'à 24 heures pour les drones les plus onéreux [7].

De plus, les drones à voilure fixe sont plus rapides que les drones à voilure tournante donc ils peuvent parcourir de plus grandes distances à temps égal. Ils peuvent également voler à plus haute altitude. Toutes ces caractéristiques ont fait des drones les plus adaptés pour collecter le plus possible d'informations en un vol.

Par ailleurs, les drones à voilure fixe permettent de transporter des charges plus lourdes que les drones à voilure tournante. En effet, la voilure fixe procure une stabilité exceptionnelle qui permet au drone de transporter des charges pouvant aller jusqu'à 50 kg [7].



**Figure I.5:** drone à voilure fixe

#### **I.4.2.2 Les drones à voilure tournante**

Les drones à voilure tournante fonctionnent comme des hélicoptères, leurs plus grands avantages sont donc leur capacité de vol vertical qui facilite les décollages et atterrissages, et leur capacité de vol stationnaire qui permet de les faire évoluer dans des espaces étroits et autour d'obstacles. Ils sont donc adaptés aux applications d'inspection, par exemple pour surveiller des machines et installations industrielles.

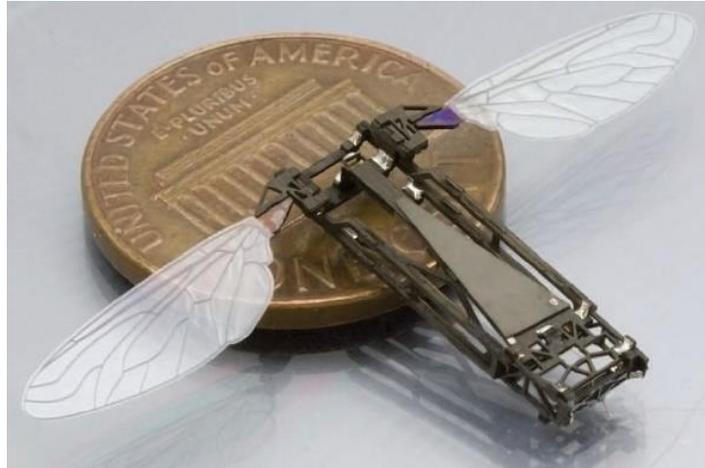
Néanmoins, leur autonomie reste réduite comparativement aux drones à voilure fixe. Leur faible autonomie et leur faible vitesse nous oblige à faire plusieurs vols. Enfin, ces drones nécessitent une maintenance complexe et régulière, due à leur construction élaborée. [8]



**Figure I.6:** drone à voilure tournante

### **I.4.2.3 Les drones à ailes battantes**

La sustentation et le pilotage des drones de cette famille sont assurés par des ailes battantes, menés d'une capacité de vol avec des trajectoires similaires à celles des insectes et de vol stationnaire à basses vitesses, comme les voilures tournantes, ce qui est intéressant pour des missions dans des espaces réduits. Ces engins permettent des manœuvres agiles, ce qui représente un autre avantage, certain pour les missions de reconnaissance ou de surveillance [8].



**Figure I.7:** drone à ailes battantes

### **I.4.3. Selon le nombre de rotors**

La construction la plus courante dans les drones à rotor est généralement celle des modèles de type multi-rotor qui possèdent plusieurs rotors pour maintenir la position de l'appareil, mais dans le cas d'un modèle mono-rotor, on trouve un seul rotor à l'intérieur. On retrouve également un rotor de queue qui aide simplement à contrôler la direction de l'appareil. Dans le cas où nous devons faire face à de hautes altitudes pour un transport de charges lourdes, on a besoin d'un temps de vol plus rapide avec une résistance plus longue [24].

Ce type des drones offrant la possibilité de voler comme un avion normal, donc un déplacement rapide et bien économe en énergie.

On cite comme exemple l'hélicoptère thermique :



**Figure I.8:** l'hélicoptère thermique

#### I.4.3.1 bi-rotors

Cette catégorie est divisée en deux sous catégories :

##### a) Bi-rotors à un ou deux plateaux cycliques

- **Hélicoptère classique** : rotor principal et rotor de queue, ce dernier sert principalement à compenser le couple généré par le rotor principal, et le rotor principal permet la montée et la descente ainsi que la translation avant et arrière et latérale, par contre le rotor de queue permet le contrôle du lacet [22].



**Figure I.9:** Hélicoptère classique

- **Hélicoptère en tandem** : deux rotors tournant en sens inverse autour de deux axes différents.
- **Hélicoptère coaxial** : deux rotors tournant en sens inverse autour du même axe [22].



Figure I.10 : Hélicoptère en tandem



Figure I.11 : Hélicoptère coaxial

#### b) Pales à pas fixe

- **T-wing de l'université de Sydney** : drone bi-rotor, placé sur deux axes différents, tournant en sens opposés ou dans le même sens, et pour la production des moments nécessaires, ce drone est muni d'ailerons.

- **Le Hover eye de Bertin technologie** : C'est un drone dont la configuration est très compacte : deux rotors contrarotatifs sur le même axe et des ailerons dans le flux d'air des rotors.

- **Le Birotan** : drone a configuration compact, possédant deux rotors pivotant sur deux axes, présentant un faible couple de tangage.

#### I.4.3.2 Tri-rotors

Il existe trois différents puissants moteurs à l'intérieur d'un tricoptère, trois contrôleurs, quatre gyros et un seul servo. Les moteurs sont simplement placés à chaque extrémité des trois bras et chacun d'entre eux porte un capteur de localisation. A chaque fois que nous devons soulever notre tricoptère, il est essentiel d'amorcer un mouvement du levier d'accélérateur, le capteur de gyroscope recevra immédiatement son signal et passera directement à la commande qui permet de contrôler la rotation du moteur. Un tricoptère est capable de rester stable sur son chemin car il est équipé de nombreux capteurs classiques et d'éléments électroniques. Nous n'avons pas besoin d'appliquer une quelconque correction manuelle [22].



**Figure I.12:** drone Tri-rotors

### **I.4.3.3 Quadro-rotors**

Lorsqu'un multirotor est conçu avec quatre pales de rotor, alors il devient un quadricoptère. Ces dispositifs sont généralement contrôlés par des moteurs à courant continu de type brushless spécialement conçus pour. Deux des moteurs se déplacent dans le sens des aiguilles d'une montre, tandis que les deux autres fonctionnent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Cela aide à décider d'un atterrissage en toute sécurité pour le quadricoptère. De tels appareils utilisent une batterie au lithium-polymère [26].



**Figure I.13:** Quadricoptère

#### **1.4.4. Classification en fonction de R.E.A**

On a plusieurs types de drones classés comme suit :

- Drones HALE
- Drones MALE
- Drones de combat UCAV
- Drones tactiques TUAV
- Mini drones MAV
- Micro/Nano drones

On classe ces catégories de drones en selon trois fonctions : rayon d'action, Endurance et Altitude [9].

En commençant par la fonction Rayon d'action, on trouve que les drones de type HALE ont un rayon d'action de plusieurs milliers de kilomètres, par contre les Drones MALE n'ont pas de rayons d'action, Drones de combat UCAV ont de 2800 km, Drones tactiques TUAV ont plus de 100 km, Mini drones MAV ont de 30 km et pour les Micro/Nano drones on n'a que dizaine de kilomètres [9].

La deuxième fonction "Endurance", on trouve que les Drones HALE et Drones MALE ont de trentaine d'heures, par contre celles de combat UCAV et les Mini drones MAV n'ont pas d'Endurance. Les Drones tactiques TUAV ont de dizaines d'heures et les Micro/Nano drones ont de vingtaine de minutes [9].

Pour la troisième fonction "Altitude", on remarque que les Drones HALE passent les 20000 mètres, l'Altitude des Drones MALE peut être entre les 5000 et les 15000 mètres. Les Drones de combat UCAV arrive à 12200 mètres, les Drones tactiques TUAV entre 200 et 500 mètres, les Mini drones MAV ne passent pas les 300 mètres et les Micro/Nano drones n'ont pas d'Altitude [9].

## **I.5 Application récente des drone (Lutte contre la pandémie COVID-19)**

En utilisant n'importe quel navigateur, on peut aujourd'hui trouver des centaines d'articles scientifiques portant sur les problèmes causés par le nouveau coronavirus. Les possibilités d'application des drones pour combattre le COVID-19 sont également étudiées dans certains articles. Mbunge et al. [29] ont souligné les capacités significatives des robots et des drones à réduire la charge des professionnels de santé de première ligne, en particulier en Afrique subsaharienne. Miranda et al. [30], ainsi que Cetin-Kaya et al. [31] et Kunovjanek et al. [32], se sont concentrés sur le problème logistique du drone de livraison ; cependant, ces trois recherches ont été motivées par la situation grave causée par la dernière pandémie. Alsarhan et al. [33] ont étudié les possibilités d'utiliser l'apprentissage automatique et le réseau sans fil activé par les drones pour rendre les systèmes de santé plus efficaces. Butt et al. [34], ainsi que Vaishnavi et al. [28], se sont concentrés sur les possibilités d'utiliser l'intelligence artificielle pour rendre l'application des drones plus professionnelle.

Les recherches de Kumar et al. [36] se sont principalement concentrées sur les systèmes en réseau basés sur des drones ; dans un autre travail, son équipe de recherche a préféré étudier l'innovation pendant la surveillance de la zone pour soutenir la lutte contre le COVID [37]. Les travaux d'Alsamhi et al. [38] ont fourni un cadre et proposé un système pour utiliser des multi-drones de manière décentralisée. González Jorge et al. [39] et Restas et al. [40] se sont concentrés sur le problème de la pulvérisation de désinfectants et sur la manière d'optimiser les paramètres liés aux drones.

La plupart des recherches mis en évidence un problème spécifique ou ont essayé de créer des solutions innovantes, et certaines d'entre elles ont même envisagé des expériences pratiques ; cependant, il n'existe pas de travail détaillé se concentrant sur le côté pratique des applications des drones, pour aider les opérateurs de drones à gérer et optimiser la mission donnée. Par conséquent, l'objectif principal de ce travail est de mettre en évidence les difficultés et les opportunités pendant les missions et d'aider à trouver les bonnes ou les meilleures pratiques d'utilisation des drones pour soutenir la lutte contre la pandémie de COVID-19.

## **I.6. Avantages et inconvénients des drones**

On distingue trois familles de drones :

- Drones à voilures fixes
- Drones à voilures tournantes
- Drones à ailes battantes

Chaque famille a de plusieurs avantages et inconvénients.

En commençant par la famille Drones à voilures fixes, on trouve qu'elle a deux avantages qui sont : la capacité de porter plus de poids et de voler avec plus d'autonomie et d'altitude.

Les inconvénients de cette famille c'est qu'elle n'a pas de vol stationnaire, n'a pas de vol à basse vitesse et à basse altitude, et qu'elle a besoin de piste de décollage d'atterrissage.

Les avantages de la famille Drones à voilures tournantes sont nombreux. On remarque qu'elle permet le vol à décollage et à atterrissage verticale, également le vol stationnaire. Elle permet aussi le vol à basse vitesse et à basse altitude. Elle permet le manœuvre en air et elle a plus de stabilité et facile à contrôler [35].

Cette famille a deux inconvénients qui sont : la complexité en maintenance et réparation, et elle a moins d'autonomie, de vitesse et d'altitude en vol.

La troisième et la dernière famille a comme avantages : la permission du vol stationnaire à basse vitesse, la permission de faire des missions dans des espaces réduits et la permission du manœuvre agile en air [35].

Les inconvénients de cette famille sont : la complexité de réalisation, sa mémoire est trop limitée et les ressources d'énergie sont aussi trop limitées [35].

## **I.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons découvert que les drones est un domaine très large basé sur la discipline de la robotique. S'évolue rapidement et les différentes catégories de drones existants prouve cette énorme évolution. Ce chapitre permet donc de bien appréhender les différents types et classes existantes des drones.

Le chapitre suivant est à une présentation des différents composants constituant un quadricoptère.

# **CHAPITRE II**

## **Les composants d'un quadricoptère**

## ***Chapitre II***

### ***Les composants d'un quadricoptère***

#### **II.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous allons voir dans un premier temps une description générale sur le quadrirotor et ses mouvements possibles à les effectuer, Par la suite nous allons exposer les différents composants nécessaires en générale pour la réalisation, puis un montage et réalisation du bicoptère.

#### **II.2. Conception générale**

##### **II.2.1 Description générale du quadcoptère**

Un quadrirotor est un hélicoptère composé de quatre rotors à voilure tournante, définit dans l'espace par 6 DDL, sa structure est constituée d'une partie centrale reliant entre eux quatre bras disposés en forme de croix, et l'électronique de contrôle est habituellement placée au centre de la croix. Les moteurs entraînant les hélices se situent aux extrémités de chaque branche, la plateforme centrale permet également d'accueillir les divers composants nécessaires au vol du drone, les quadrirotors peuvent être constitués de toutes sortes de matériaux : des structures rudimentaires en bois ou en aluminium aux modèles plus élaborés en fibre de carbone ou en plastique. Elle doit être en même temps rigide et légère. Afin d'éviter à l'appareil de tourner sur lui-même sur son axe de lacet, il est nécessaire que deux hélices tournent dans un sens, et les deux autres dans l'autre sens. Pour pouvoir diriger l'appareil, il est nécessaire que chaque couple d'hélice tournant dans le même sens soit placé aux extrémités opposées d'une branche de la croix [10].



**Figure II.1 :** quadricoptère

### **II.2.2 Mouvements du quadcoptère**

Les mouvements de base de quadrirotor sont réalisés en variant la vitesse de chaque rotor changeant de ce fait la poussée produite. Le quadrirotor incline vers la direction du rotor plus lent, qui tient compte alors de la translation le long de cet axe. Par conséquent, comme à un hélicoptère classique, les mouvements sont couplés, signifiant que le quadrirotor ne peut pas réaliser la translation sans roulement ou tangage, ce qui signifie qu'un changement de la vitesse d'un rotor se traduit dans un mouvement en au moins trois degrés de liberté. Par exemple, augmentant la vitesse de propulseur gauche aura comme conséquence un mouvement de roulis (le quadrirotor incline vers le rotor plus lent, vers la droite), un mouvement de lacet (l'équilibre entre les rotors qui tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et les rotors qui tourne dans le sens inverse est perturbé ayant pour résultat un mouvement de rotation horizontal), et une translation (le mouvement de roulis incline l'armature et avec lui, l'orientation de la force de poussée). Cet accouplement est la raison pour laquelle nous pouvons commander les six degrés de liberté de quadrirotor avec seulement quatre commandes (le couple appliqué par les moteurs sur chaque propulseur). Le quadrirotor a cinq mouvements principaux [7] :

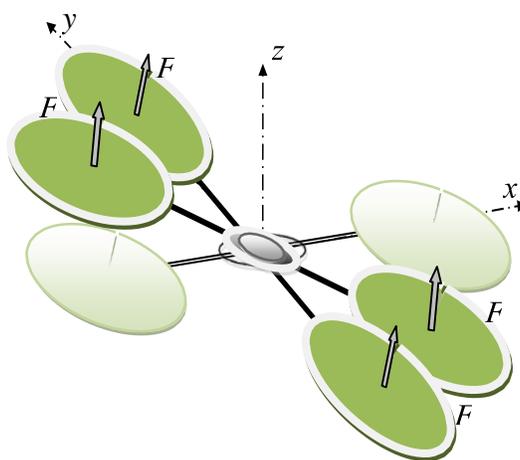
- Mouvement vertical
- Mouvement de roulis
- Mouvement de tangage

- Mouvement de lacet
- Translations horizontales

### II.2.2.1. Mouvement de roulis

Pour réaliser ce mouvement on applique une variance de vitesse entre le rotor 1 et le rotor 3 pour faire une rotation autour de l'axe (x).

Ce mouvement est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe (y)



**Figure II.2 :** Illustration du mouvement de roulis [11]

### II.2.2.2. Mouvement de tangage

Pour réaliser ce mouvement on applique une variance de vitesse entre le rotor 2 et le rotor 4 pour faire une rotation autour de l'axe (y).

Ce mouvement est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe (x)

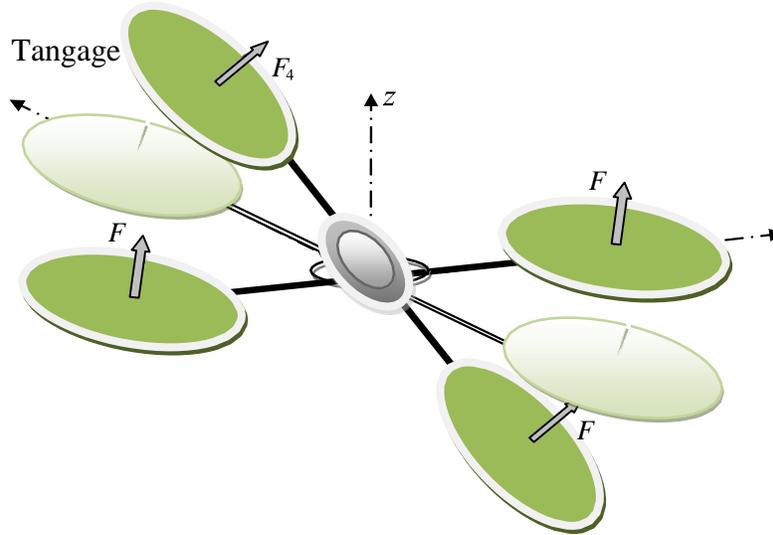


Figure II.3 : Illustration du mouvement de tangage [11]

### II.2.2.3. Mouvement de lacet

Pour réaliser ce mouvement on applique une variance de vitesse entre les rotors {1,3} et les rotors {2,4} faire une rotation autour de l'axe ( $z$ ).

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 s'assurer que toute la force de poussée demeure la même.

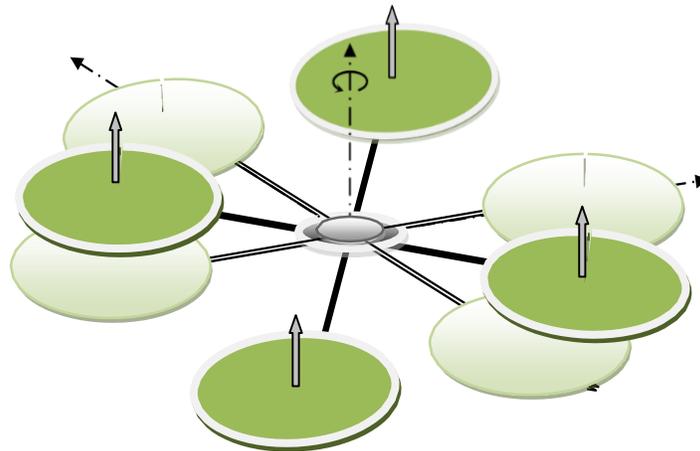


Figure II.4 : Illustration du mouvement de lace [11]

#### II.2.2.4. Mouvement vertical

Un mouvement ascendant ou descendant est réalisé par la variation de vitesse de rotation des quatre rotors en même temps et avec la même force de poussée.

- Pour un mouvement ascendant on applique une grande vitesse de rotation.
- Pour un mouvement descendant on applique une vitesse faible de rotation.
- Pour un vol stationnaire on applique une vitesse moyenne de rotation.

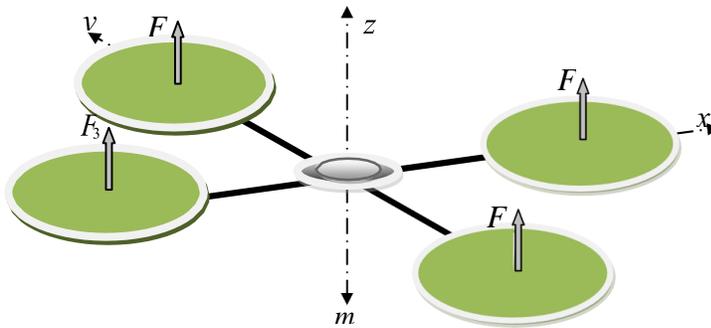


Figure II.5 : Illustration du mouvement vertical [11]

#### II.2.2.5. Mouvements de translation

Pour réaliser cela on applique une variance de vitesse entre 2 rotors opposés et garder une vitesse moyenne pour les deux autres. Dans ce cas la translation sera vers le sens du rotor qui porte la force de poussée la plus faible.

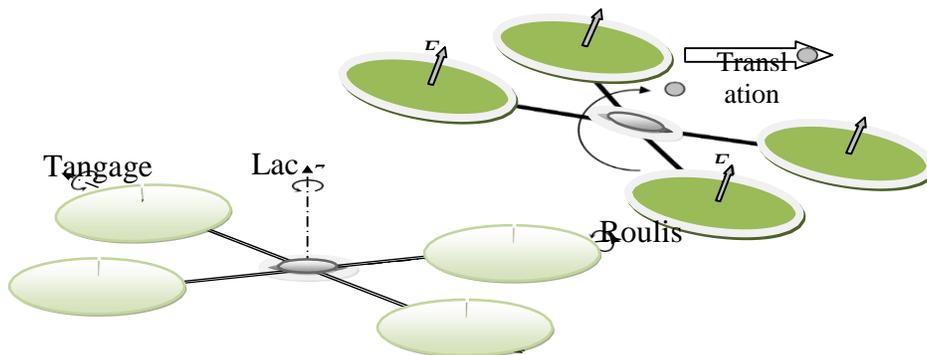


Figure II.6 : Illustration du mouvement de translation [11]

### **II.3. Description générale sur Les composants utilisés**

Dans cette partie nous essayons de décrire les différents composants constituant notre quadricoptère pour mieux comprendre son fonctionnement.

#### **II.3.1. Moteurs**

Il existe quelques types de moteurs qui sont utilisés pour construire des drones. Mais comme le drone doit être poussé dans l'air pour flotter, nous devons utiliser des moteurs puissants, les moteurs bon marché, légers, petits et puissants donc sont les moteurs à courant continu sans balais (BLDC) [12].

Pour les petits drones, nous n'utilisons pas de moteurs BLDC, mais plutôt de petits moteurs à engrenages DC.

Les moteurs brushless (sans balais) présentent de nombreux avantages par rapport aux moteurs à courant continu classique :

- L'entretien est bien moindre puisqu'il n'y a pas d'usure de contacts mobiles (pas de balais).
- Le comportement thermique est le meilleur puisqu'il n'y a pas de frottement et son rotor est externe, donc on aura un fort refroidissement.
- L'inertie du rotor est moindre (pas de collecteur).
- Plus grande durée de vie.
- Pas de vibrations, d'étincelles et de frottement.
- Moins de bruit et de chute de tension.
- Gamme de vitesse plus élevée.
- Couple important.

Leurs inconvénients sont :

- Nécessité d'un bon variateur.
- Risque de mauvais démarrage ou de coupures.
- Plus cher.

Ce type de moteur électrique élimine tous les inconvénients du moteur à courant continu classique problèmes de commutation au niveau du collecteur, défretage, inertie, refroidissement (les pertes joules étant situées au stator elles sont plus faciles à évacuer), puissance massique

nettement plus grande, géométrie, durée de vie ; en particulier l'indice de protection (IP) peut être augmenté par rapport aux machines à courant continu du fait de l'absence de balais [11].

À performances égales, son rendement est toujours meilleur, ceci étant dû en partie à l'absence de pertes mécaniques et électriques liées aux balais (surtout lors de faibles charges). Mais aussi la plupart du temps à son inertie notablement réduite, en particulier pour les modèles utilisant des aimants samarium-cobalt ou néodyme-fer-bore par rapport à une machine équivalente à courant continu, ce paramètre étant prépondérant dans de nombreuses applications, en particulier dans les phases d'accélération [12]

Quatre moteurs brushless sont nécessaires pour le quadrirotor. Ils en existent de différentes taille et puissance. Ils sont caractérisés par le diamètre de leur cage tournante et par le nombre de tours/volt ou KV. Un moteur ayant un KV de 1000 tr/V fonctionnera à 12000 tours/min s'il est alimenté en 12V. Sur les moteurs brushless utilisés en modélisme, les bobinages en cuivre sont montés sur le stator et les aimants sur le rotor, à l'inverse des moteurs électriques conventionnels.

Plus le KV sera élevé plus le moteur sera agressif, donc dur à contrôler. Pour un vol stationnaire il ne faut pas dépasser les 1000kV, et si on veut faire un vol acrobatique on pourra envisager un KV plus élevé, dans les 1500 KV [12].



**Figure II.7 :** Moteur Brushless.

### **II.3.2. Contrôleurs de vitesse électroniques**

Le terme ESC signifie "electronic speed controller" (contrôle électronique de la vitesse). Il s'agit d'un circuit électronique utilisé pour modifier la vitesse d'un moteur électrique. Ils sont

utilisés sur les modèles radiocommandés qui sont alimentés électriquement, le changement le plus utilisé pour les moteurs brushless fournissant une source d'énergie basse tension triphasée produite électroniquement pour le moteur.

Un ESC peut être déroutant de prime abord car plusieurs fils sortent sur deux côtés :

- Alimentation en entrée : Les deux fils épais (normalement noir et rouge) servent à obtenir l'alimentation depuis le faisceau/carte de répartition de l'alimentation, lui-même directement alimenté par la batterie principale.
- 3 connecteurs à cosse : ces broches servent à se relier aux trois broches du moteur sans balais. Il existe quelques tailles standard sur ce marché, mais si vous trouvez que les deux sont incompatibles, vous aurez besoin d'en remplacer un des deux.
- Connecteur de servomoteur RC à 3 broches : ce connecteur accepte des signaux RC mais, plutôt que d'exiger du 5 V sur les broches rouge et noire, la plupart du temps un BEC interne fournit du 5 V pour alimenter les composants électroniques [13]

#### **II.3.2.1. Fonctionnement**

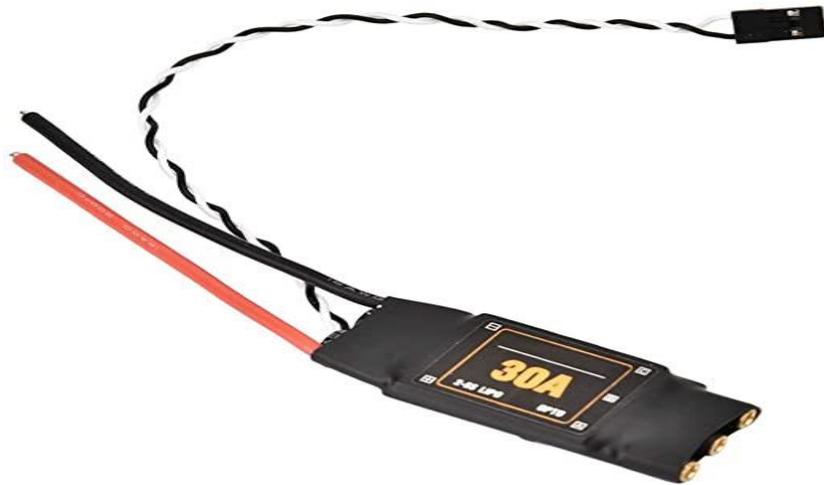
Un ESC ou contrôle électronique de vitesse suit principalement un signal de référence de vitesse pour modifier la vitesse d'un réseau de commutation de transistors à effet de champ. La vitesse du moteur peut être modifiée en changeant la fréquence de commutation ou le rapport cyclique des transistors.

Pour les moteurs BLDC, différents types de contrôles de vitesse sont nécessaires car la vitesse de ce moteur peut être contrôlée en changeant la tension sur son armature. Ce type de moteur a besoin d'une règle de fonctionnement différente, car la vitesse du moteur peut être modifiée en faisant varier la synchronisation des impulsions de courant transmises aux différents enroulements du moteur [14].

En général, les systèmes ESC brushless utilisent un courant alternatif triphasé tel qu'un variateur de fréquence (VFD) pour faire fonctionner les moteurs brushless. Ces types de moteurs sont plus populaires en raison de leur puissance, de leur efficacité, de leur légèreté et de leur longévité par rapport aux moteurs à balais habituels. Les contrôleurs de moteurs BLDC sont très complexes par rapport aux (brushless motors).

La phase change en fonction de la rotation du moteur, ce qui peut être pris en compte par le contrôle électronique de la vitesse. En général, la rotation de ce moteur peut être détectée par la force contre-électromotrice, mais certaines variantes utilisent des détecteurs optiques ou des capteurs à effet Hall séparés.

En général, les contrôleurs de vitesse basés sur la programmation comprennent principalement certaines options spécifiées par l'utilisateur qui permettent le freinage, l'accélération, la synchronisation. L'inversion du sens de rotation du moteur peut être réalisée en commutant n'importe quels 3 fils de l'ESC vers le moteur [14].



**Figure II.8 :** Contrôleurs de vitesse électroniques.

### **II.3.3. Batterie**

Les batteries utilisées sur un drone multi rotor sont essentiellement des « Lithium Polymère ». Elles sont issues d'une technologie qui permet d'avoir un très bon rapport poids/puissance. Un élément LiPo (1S) fournit une tension de 3,7V. Sur un drone, on utilise en général des batteries à 3 ou 4 éléments (3S ou 4S).

L'intensité est aussi un critère de choix. Une batterie de 3000mAH aura une meilleure autonomie qu'une batterie de 2200mAH.

Un chargeur spécifique est à prévoir ainsi que des règles de sécurité très strictes car ces batteries peuvent exploser en cas de mauvaise manipulation [15].

- La tension de la batterie

Exprimée en volts, la tension des accus LiPo dépend du nombre de cellules dont ils sont composés. Généralement, la quantité de cellules d'une batterie de drone varie de 1 à 6, chaque cellule disposant d'un voltage nominal de 3,7 V. Ainsi, une batterie 1S (avec une cellule) a une tension de 3,7 V, une 2S déploie 7,4 V, une 3S 11,1 V, etc. [15].

Du côté des batteries nouvelle génération LiPo HV (High-Voltage), on atteint 3,8 V de tension nominale, ce qui implique qu'elles disposent de meilleures performances. Elles sont toutefois plus onéreuses à l'achat, et nécessitent également l'acquisition d'un chargeur de batterie adapté pour profiter au maximum de leur puissance.

La tension de l'accumulateur est ce qui va permettre d'envoyer un signal « batterie faible » sur l'écran intégré de votre radio commande, pour vous informer qu'il est temps de faire atterrir le drone. En effet, sous un certain voltage, la batterie risque de subir une surchauffe et de se détériorer et il devient préférable de la recharger. De même, le taux de charge de la batterie doit être similaire entre les diverses cellules pour que la batterie fonctionne le plus longtemps possible : c'est pourquoi il est utile d'acheter un chargeur accu qui permet l'équilibrage des cellules [16].

- La capacité de l'accumulateur

La capacité de la batterie est un élément essentiel pour définir son autonomie : il s'agit de la quantité d'énergie qu'elle peut délivrer une fois qu'elle a été complètement rechargée. On l'exprime généralement en mAh (milliampères heures) et plus rarement en ampère-heure : par exemple, une batterie 2200 mAh va restituer 2,2 A pendant une heure.

Les capacités des batteries de drones varient le plus souvent entre 1000 et 8000 mAh, mais peuvent atteindre plus de 20 000 mAh pour des modèles nécessitant une grande autonomie (drone professionnel par exemple), et reste aux alentours des 550 mAh pour un mini drone, voire descend jusqu'à 180 mAh.

- Le taux de décharge

En complément de la capacité de la batterie, il est essentiel de s'intéresser à son taux de décharge, noté « C ». Il correspond à la capacité maximale de votre accumulateur à décharger la batterie de manière continue sans que cela ne représente un risque. Autrement dit, une batterie 30 C de 2200 MAh sera capable de débiter  $30 C \times 2,2 Ah = 66$  ampères [16].

Ce taux aura notamment un impact sur les performances de votre drone et surtout sur la capacité de la batterie à délivrer une certaine quantité d'énergie à un instant précis, pour faire fonctionner le drone au maximum de ses possibilités [16].



**Figure II.9:** Batterie Li Po.

### II.3.3 Hélices

Elles sont souvent en matière plastique mais aussi parfois en matériaux composites (Carbon, fibre de verre). Elles sont identifiées par leur diamètre et leur pas indiqués en pouces (grand pas, petit pas). Sur un drone quadrirotor, il faut 2 hélices à sens horaires et 2 hélices à sens anti-horaire.

Plus l'hélice est grande plus il faudra de puissance pour la faire tourner. Mais plus elle est grande plus elle va générer de la portance et donc un vol plus stationnaire. Au contraire, pour des petites hélices il faudra moins de puissance et on aura donc moins de portance, mais un vol plus agressif [11].

La taille de l'hélice se fait en fonction de la portance (soit la masse à faire voler) dont on a besoin. Pour un quadricoptère par exemple, la taille varie entre 8" et 13" à cela il faut prendre en compte la taille du châssis : Pour un châssis de 30cm on peut monter à 9" max, sur 450cm on peut y aller à 12" max.

- Petit pas = plus grande traction à faible vitesse, mais vitesse maxi limitée.
- Grand pas = plus petite traction à faible vitesse, mais vitesse maxi élevée.

La taille du pas géométrique se fait en fonction de la vitesse que l'on veut atteindre.

Pour un quadricoptère, la moyenne est de 4,5". Il est toutefois possible de descendre à 3,5 (pour du vol lent) ou de monter à 6 (pour du vol rapide).



**Figure II.10** : Différents types d'Hélices

### **II.3.4 Chargeur les batteries Li-po**

Le B6 comporte la fonction automatique qui ajuste le courant d'alimentation pendant le processus de charge ou de décharge. Particulièrement pour des batteries au lithium, il peut empêcher la surcharge qui peut entraîner une explosion due au défaut d'utilisation. Il peut déconnecter le circuit automatiquement et alerter à la détection d'un dysfonctionnement.

Tous les programmes de ce produit ont été contrôlés pour assurer un maximum de sécurité et réduire au minimum les pannes. Tous les paramètres peuvent être configurés par l'utilisateur.

Le B6 utilise un équilibreur de charge individuel par élément. Il n'est pas nécessaire de connecter un équilibreur externe pour le l'équilibrage des charges (LiPro Balance Charger, s.d). [16].



Figure II.11 : LiPro balance charger

- Caractéristiques : (LiPro Balance Charger, s.d).
  - ✓ Tension d'entrée : 10.0 à 20.0 V DC.
  - ✓ Puissance max à charger : 80W.
  - ✓ Puissance max à décharger : 10W.
  - ✓ Rang courant de charge : 0.1 à 6.0 A.
  - ✓ Rang courant de décharge : 0.1 à 2.0 A.
  - ✓ Nombre des cellules Lipo : 1 – 6 cellules.
  - ✓ Tension de batterie : 2 – 20 V

### II.3.5 Châssis

Le châssis (ou frame), c'est un peu comme le squelette du drone. Il peut prendre différentes formes selon les modèles et selon son nombre de bras. Ainsi, il existe des drones tricoptères, quadricoptères, hexacoptères, etc. En aluminium, en plastique, en fibre de carbone ou même en bois, le châssis peut véritablement varier selon les modèles de drones [15].

Les caractéristiques à prendre en compte pour le châssis sont le poids, qui sera lié aux matériaux de construction et sa résistance au choc, plus le châssis est léger plus on conserve de la puissance et on gagne en temps de vol [11].



**Figure II.12 :** Châssis

### **II.3.6. Contrôleur de vol**

Le contrôleur de vol est le cœur du système d'un drone. Il gère de nombreux paramètres pour rendre possible son pilotage. Il est généralement accompagné de capteurs externes comme une ou plusieurs antennes GPS pour offrir une stabilisation ultra-précise en utilisant plusieurs systèmes GPS [15].

Le contrôleur de vol utilisé dans notre projet est basé sur une carte Arduino.

#### **II.3.6.1. Arduino**

Une carte Arduino est une petite (5,33 x 6,85 cm) carte électronique équipée d'un microcontrôleur. Le microcontrôleur permet, à partir d'événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs, la carte Arduino est donc une interface programmable.



Figure II.13 : Arduino uno



Figure II.14 : Arduino mega

L'Arduino Uno peut être alimentée via la connexion USB ou avec une alimentation externe. La source d'alimentation est sélectionnée automatiquement. L'alimentation externe peut provenir d'un adaptateur CA-CC ou d'une batterie. Les fils d'une batterie peuvent être insérés dans les connecteurs à broches GND et Vin du connecteur POWER [11].

La carte peut fonctionner avec une alimentation externe de 6 à 20 volts. Avec une plage recommandée de 7 à 12 volts.

Les broches d'alimentation sont les suivantes :

- VIN : La tension d'entrée sur la carte Arduino lorsqu'elle utilise une source d'alimentation externe.
- 5V : Cette broche génère un 5V régulé du régulateur sur la carte.
- 3.3V : Une alimentation de 3.3 volts générée par le régulateur embarqué. Le courant maximal consommé est de 50 mA.
- GND. Broches de terre [11].

### 1) Les entrées/sorties numériques de D0 à D13

Chacun des connecteurs D0 à D13 peut être configuré par programmation en entrée ou en sortie, nous pouvons donc avoir par exemple les connecteurs 2 et 3 configurés comme des entrées et les connecteurs 7, 8 et 9 configurés comme des sorties. Il est par conséquent possible de connecter côte à côte des capteurs logiques (interrupteurs par exemple) aux connecteurs 2 et 3 et des actionneurs aux connecteurs 7, 8 et 9. Les signaux véhiculés par ces connecteurs sont des signaux logiques, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent prendre que deux états : HAUT (5 Volts) ou BAS

(0 Volt), par rapport au connecteur de masse GND, qui lui est toujours, par définition, à 0 Volt [26].

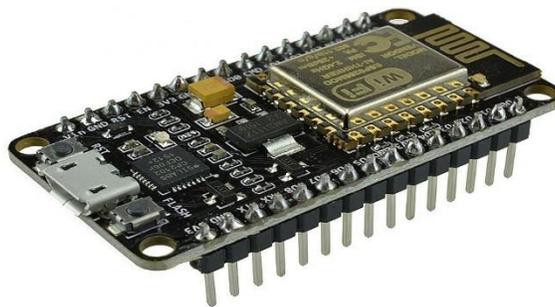
## **2) Les entrées analogiques A0 à A5**

Contrairement aux entrées/sorties numériques qui ne peuvent prendre que deux états HAUT et BAS, ces six entrées peuvent admettre 1024 de valeurs analogiques comprises entre 0 et 5 Volts. Nous pourrions donc avoir des valeurs de tension précises à 5 mV près ( $\approx 5V/1024$ ) [26].

### **II.3.6.2. Module ESP8266**

Le ESP8266 est microcontrôleur doté d'un module de communication WIFI [17].

L'ESP8266 est composé d'un microcontrôleur 32 bits (Tensilica Xtensa LX106) cadencé à 80MHz avec une mémoire Flash de 16 MO et une mémoire RAM de 32K + 80K. Il intègre la norme Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n avec possibilité d'authentification par mot de passe WEP ou WPA/WPA2. Il possède 16 entrées/sorties (GPIO), dont une entrée analogique 10 bits [17].



**Figure II.15 :** Module ESP826

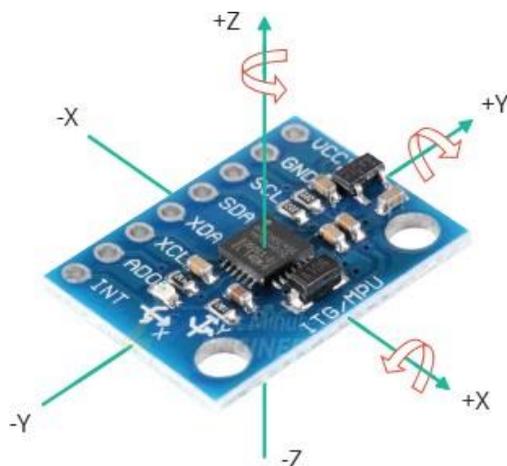
### **II.3.7 Module MPU- 6050**

Le module MPU6050 est une centrale inertielle qui permet de mesurer l'évolution d'un objet dans l'espace. Il permet de mesurer les accélérations linéaires et angulaires dans les trois axes de l'espace. Ce composant se retrouve dans plusieurs applications notamment les manettes de jeux vidéo ou les smartphones. Il peut être utilisé pour faire du contrôle d'assiette sur un drone ou pour équilibrer un robot sur deux roues [18].

Il est constitué d'un capteur de température et de deux capteurs micromécaniques : un gyroscope qui permet de mesurer les rotations et un accéléromètre qui permet de mesurer les accélérations dans l'espace. Ces capteurs sont généralement constitués d'une partie mécanique et d'une partie piézoélectrique. Lorsque l'objet est en mouvement la pièce mécanique se déplace contre la partie piézoélectrique qui envoie un signal électrique [18].

Il est un dispositif intégré de suivi de mouvement à 6 axes, il combine un gyroscope à 3 axes, un accéléromètre à 3 axes et un Processeur de mouvement numérique (DMP), le tout dans un petit boîtier de 4x4x0,9 mm avec une interface de communication I2c . Le MPU-6050 est également conçu pour s'interfacer avec plusieurs capteurs numériques non inertiels, tels que des capteurs de pression, sur son port auxiliaire I2c [19].

Le MPU-6050 comprend trois convertisseurs analogique-numérique (ADC) 16 bits pour numériser les sorties du gyroscope et trois ADC 16 bits pour numériser les sorties de l'accéléromètre. Pour un suivi précis des mouvements rapides et lents, les pièces disposent d'une plage de pleine échelle de gyroscope programmable par l'utilisateur de  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$  et  $\pm 2000^\circ/\text{sec}$  (dps) et d'un accéléromètre à pleine échelle programmable par l'utilisateur plage de  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  et  $\pm 16g$ . Pour la flexibilité de l'alimentation, le MPU-6050 fonctionne à partir de la plage de tension d'alimentation VDD de 2,375V à 3,46V [19].



**Figure II.16 :** Module MPU- 6050

## II.3.8 Télécommande

Les quadricoptère sont des drones civils télécommandés. Ils nécessitent un pilote et donc un moyen de transmettre les commandes de ce dernier au modèle en vol. Une télécommande d'aéromodélisme est le plus souvent utilisée, même si certains modèles utilisent d'autres systèmes tels que des Smartphones ou des ordinateurs. Les directives transmises par la radiocommande correspondent directement aux degrés de libertés du quadricoptère. Deux joysticks de commande à deux axes permettent de diriger l'appareil. Un des joysticks permet de contrôler la poussée (ou gaz) et le lacet. Le deuxième, commande l'avance et la dérive du quadricoptère [11].

### II.3.8.1 Module nRF24L01

Le module sans fil nRF24L01+PA+LNA 2,4 GHz est un module émetteur-récepteur radio fréquence qui peut être utilisé pour les communications sans fil, opérant sur la bande des 2,4 GHz (comme le WiFi, ou le Bluetooth). Un simple petit Arduino permet d'en prendre le contrôle, via le port SPI [24].



**Figure II.17 :** Module émetteur-récepteur sans fil nRF24L01+ PA + LNA avec antenne externe

#### Caractéristiques [24]

- Alimentation du module : de 1,9 V à 3,6 V.
- Distance Max à cas idéal : 1100 m à 250 Kbps, 750 m à 1Mbps, 750 m à 1Mbps.
- Nombre de canaux : 125 Canaux de 1Mhz sachant qu'un nRF24 peut gérer jusqu'à 6 canaux (pipes) de communication simultanément.

- Plage de fréquentielle : 2.400 Ghz à 2.525 Ghz.
- Niveau de signal : Min -6 dBm, Low 0 dBm, High 3 dBm, Max 7 dBm.
- Mémoire : 32 octets en émission et réception.
- Interface de communication : SPI.
- Modulation : GFSK.
- Amplificateur de puissance en transmission PA et sensible aux perturbations environnantes en réception LNA.

#### **II.4. Conclusion**

Ce chapitre a permis d'avoir des concepts préliminaires sur les robots volants et leur principe de fonctionnement. Le quadrirotor est l'un des robots volants qui sont en investigation ces dernières années. Ce système est constitué de quatre rotors, deux de ces rotors tournent dans un sens et les deux autres dans le sens inverse. En variant les vitesses de rotation de ces rotors, le quadrirotor peut faire des mouvements différents aussi bien en translation qu'en rotation.

# ***CHAPITRE III***

## ***Modélisation & commande du quadricoptère***

## Chapitre III :

# Modélisation & commande du quadricoptère

### III.1 Introduction

Afin de comprendre la dynamique d'un quadcoptère et comment il est positionné et orienté, il est essentiel de se familiariser avec certains concepts tels que 6 degrés de liberté, les types de mouvements, Cette compréhension est nécessaire pour assurer que les simulations de l'engin dépeindront un comportement aussi proche que possible de la réalité.

### III.2 Six degrés de liberté

Pour faire simple, les degrés de liberté font référence à la façon dont notre corps et d'autres objets peuvent se déplacer dans l'espace qui nous entoure. Prenons l'exemple de la navette spatiale, elle peut se déplacer le long de trois axes communément appelés plan cartésien ou XYZ. Elle peut avancer ou reculer sur l'axe des x, se déplacer de gauche à droite sur l'axe des y, et monter ou descendre sur l'axe des z. La navette peut cependant effectuer trois autres mouvements : elle peut rouler sur l'axe des x (mouvement de roulis), elle peut tanguer vers l'avant ou l'arrière sur l'axe des y (mouvement de tangage) et elle peut effectuer une rotation ou un mouvement de lacet en cercle sur l'axe des z (mouvement de lacet), ces trois derniers étant également appelés angles d'Euler. Ce sont les six mouvements de base ou degrés de liberté que tout objet peut effectuer [42].

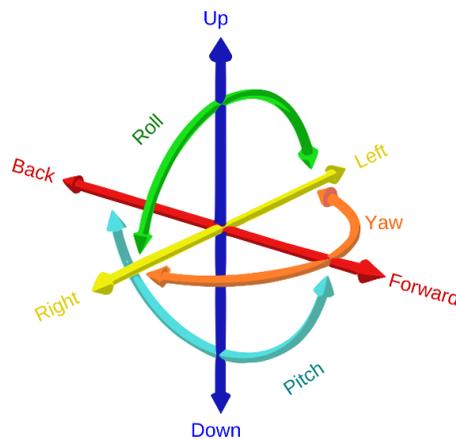


Figure III.1: Six degrés de liberté

Pour comprendre la Position et l'orientation du quadricoptère, nous devons définir deux références qui sont :

a) **Système de coordonnées lié à la terre**

Est un repère fixe de référence à un endroit ou un lieu spécifique au niveau du sol représenté par E:  $(O_E; x_E, y_E, z_E)$  où l'axe  $x_E$  est pointé vers le nord, l'axe  $y_E$  est pointé vers l'est et l'axe  $z_E$  est pointé vers le centre de la terre [42].

b) **Système de coordonnées attaché aux corps**

Est un repère fixe dont l'origine est située au centre de masse du quadricoptère représenté par B :  $(O_B; x_B, y_B, z_B)$  où l'axe  $x_B$  se trouve sur l'hélice 1 tandis que l'axe  $y_B$  se trouve sur l'hélice 4 et l'axe  $z_B$  pointe vers le haut, donc si notre corps tourne ou bouge, il tourne et bouge avec lui [42].

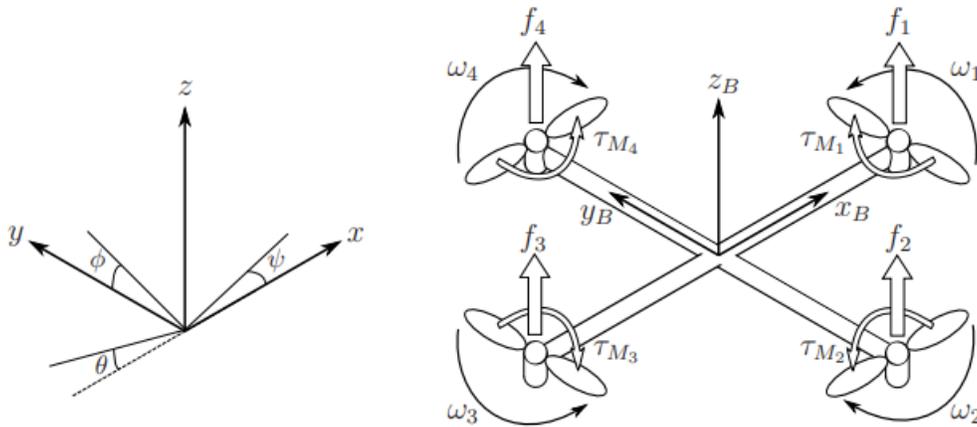


Figure III.2 : Système de coordonnées

En tant que corp rigide un quadricoptère a six degrés de liberté de mouvement, qui sont déterminés par les vecteurs de la position absolue  $\vec{\xi}$  et de la position angulaire absolue ou position  $\vec{\eta}$ , dont les composants sont [43] :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \eta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$$

### III.3 Fonctionnement d'un quadcoptère

Le quadcoptère est équipé de quatre moteurs à courant continu placés aux extrémités de chaque bras et d'une hélice montée sur le dessus pour lui fournir la poussée nécessaire, comme le montre la figure (III.2)

Pendant la rotation, chaque hélice génère une force de poussée aérodynamique  $\vec{F}_{ri}$ ,  $i=1,2,3,4$  dirigée vers le haut, et un couple aérodynamique  $\vec{M}_{ri}$ ,  $i=1,2,3,4$  autour de l'axe de rotation comme le montre la figure (III.2)

La force de poussée aérodynamique totale  $\vec{F}_r$  est égale à la somme des forces de poussée aérodynamique de toutes les hélices [43] :

$$\vec{F}_r = \sum_{i=1}^4 \vec{F}_{ri} \quad (III.1)$$

Et le couple aérodynamique totale  $\vec{M}_r$  est égale à la somme des couples aérodynamique de toutes les hélices :

$$\vec{M}_r = \sum_{i=1}^4 \vec{M}_{ri} \quad (III.2)$$

Les moteurs 1 et 3 tournent dans le sens des aiguilles d'une montre tandis que les moteurs 2 et 4 tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre ou vice versa. Le centre du châssis Ob est le centre de masse et l'origine, qui est attaché au quadcoptère comme le montre la figure III.3, ce que permet une stabilisation angulaire de quadcoptère autour de l'axe z, parce que les couples générés par les paires des moteurs opposés sont équilibrés entre eux.

Le quadcoptère modifie la vitesse de rotation des quatre moteurs de la même quantité pour générer une poussée et accélérer le quadcoptère le long de l'axe z. Pour que le quadcoptère effectue une manœuvre de roulis, la vitesse de rotation de l'hélice 2 est augmentée et la vitesse de rotation de l'hélice 4 est réduite pour générer un couple le long de l'axe x ( $\tau_\phi$ ). Le concept est similaire pour la manœuvre de tangage, où la vitesse de rotation de l'hélice 1 est augmentée et la vitesse de rotation de l'hélice 3 est réduite pour générer un couple le long de l'axe y ( $\tau_\theta$ ). Enfin, en appliquant

une vitesse différente à chaque paire d'hélices tournant dans le même sens, un couple le long de l'axe z ( $\tau_\psi$ ) est généré pour effectuer une manœuvre de lacet.

Le figure (III.3) montre comment contrôler le mouvement de translation et le mouvement angulaire d'un quadcoptère, en modifiant (augmentant ou diminuant) les vitesses angulaires des rotors correspondant [43].

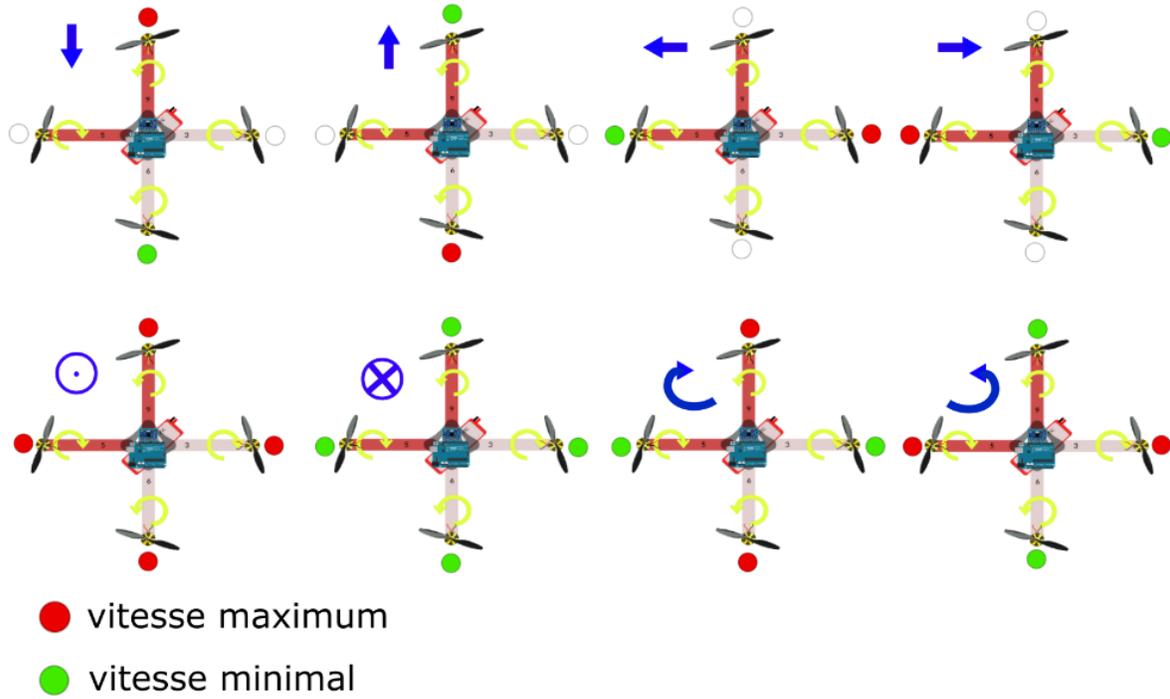


Figure III.3 : Mode de contrôle d'un quadricoptère

### III.4 Modèle mathématique d'un quadricoptère

La modélisation mathématique est la première et la plus importante étape pour comprendre la dynamique du système et contrôler la réponse. Il existe de nombreuses approches pour dériver les équations régissant les corps rigides 6-DOF telles que (Newton-Euler, Euler Lagrange...), pour des raisons de simplicité nous avons choisi l'équation de Newton-Euler, pour la dynamique de translation et de rotation du quadricoptère, dans les systèmes de coordonnées correspondant [44].

Les hypothèses suivantes ont été prises en compte pour calculer la dynamique du quadricoptère [44] :

- La rotation de la terre peut être négligée.
- Un quadricoptère est un corp rigide à répartition de masse symétrique.
- Les hélices sont fixe et rigides.
- L'accélération gravitationnelle de la terre ( $g$ ), la masse ( $m$ ) et le tenseur d'inertie du quadcoptère ( $I$ ) sont constants.
- Les coefficients de poussée ( $K_n$ ) et de couple ( $K_m$ ) du moteur électrique sont constants.
- L'inertie de rotor de moteur électrique peut être négligée.
- La force de trainée aérodynamique est proportionnelle aux vitesses de translation du quadricoptère.

#### **III.4.1 Systèmes de coordonnées et matrices de transformation**

On à deux systèmes de coordonnées (cartésiennes) qui est nécessaire pour réaliser notre modèle mathématique, système de coordonnées lié à la terre  $E:(O_E ; x_E, y_E, z_E)$  et un système de coordonnées attaché aux corps d'un quadricoptère  $B :(O_b ; x_b, y_b, z_b)$  qui sont illustrés à la figure (III.2) [45].

En raison des portes (distances) relativement courtes des voles et la courte durée des missions quadricoptères, le système de coordonnée  $E$  pet être considéré comme inertiel lors de l'exécution du modèle. Le système de coordonnée  $B$  étant lié rigidement au corp de quadricoptère, sa position dans l'espace et la position angulaire par rapport au système de coordonnée  $E$  déterminent la position du quadricoptère dans l'espace et la position angulaire c'est-à-dire l'attitude de quadricoptère.

Etant que corp rigide, les coordonnées des vecteurs de position angulaire  $\vec{k}$  sont les angles d'Euler de la position du quadcoptère [45] :

- L'angle de roulis  $\phi$  (roll)
- L'angle de tangage  $\theta$  (pitch)

- L'angle de virage  $\psi$  (yaw)

La transition à partir du système de coordonnées E dans B s'effectue par trois rotations élémentaires [45] :

- Autour de l'axe  $z_E$  pour l'angle de virage  $\psi$
- Autour de la nouvelle position de l'axe  $y_E$  pour l'angle de tangage  $\theta$
- Autour de la nouvelle position de l'axe  $x_E$  pour l'angle de roulis  $\phi$

De cette façon une matrice de transition formée de E à B :

$$T_{BE} = T_1(\phi) T_2(\theta) T_3(\psi)$$

$$T_{BE} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(\phi) & s(\phi) \\ 0 & -s(\phi) & c(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c(\theta) & 0 & -s(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ s(\theta) & 0 & c(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c(\psi) & s(\psi) & 0 \\ -s(\psi) & c(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

$$T_{BE} = \begin{bmatrix} c(\theta)c(\psi) & c(\theta)s(\psi) & -s(\theta) \\ s(\phi)s(\theta)c(\psi) - c(\phi)s(\psi) & s(\phi)s(\theta)s(\psi) + c(\phi)c(\psi) & s(\phi)c(\theta) \\ c(\phi)s(\theta)c(\psi) - s(\phi)s(\psi) & c(\phi)s(\theta)s(\psi) - s(\phi)c(\psi) & c(\phi)s(\theta) \end{bmatrix}$$

S: sin

C: cos

Et  $T_{BE} = T_{EB}^T$

Le vecteur Vitesse de translation absolue d'un quadricoptère est donnée par [45] :

$$\vec{V} = \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (\text{III.4})$$

Et le vecteur de vitesse angulaire absolue d'un quadricoptère est déterminée par les vitesses angulaires, de roulis, de tangage, et de virage :

$$\ddot{\Omega} = \ddot{\phi} + \ddot{\theta} + \ddot{\psi} \quad (\text{III.5})$$

Dont les composants dans le système de coordonnées B sont déterminés par [45] :

$$\Omega_B = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = T_1(\phi) T_2(\theta) T_3(\psi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + T_1(\phi) T_2(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + T_1(\phi) \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Et qui peut s'écrire sous la forme :

$$\Omega_B = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s(\theta) \\ 0 & c(\phi) & s(\phi)c(\phi) \\ 0 & -s(\phi) & c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T_\Omega \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

### III.4.2 Forces et couple agissant sur le quadcoptère

#### a) Force de poussée

Les forces de poussée aérodynamique et couple générée par les hélices des quadricoptère sont définie par rapport au système de coordonnées B comme le montre la figure III.2 [46].

$$F_{ri} = K_n \Omega_i^2 \text{ [N]} \quad i=1,2,3,4 \quad (\text{III.8})$$

Ou  $K_n \left[ \frac{N}{\frac{rad^2}{s^2}} \right]$  est le coefficient de poussée.

La force de poussée aérodynamique totale  $F_r$  définie par (1) il est réalisé le pilotage du quadricoptère le long de l'axe  $z_B$  du système de coordonnées B [46].

#### b) Les intensités des moments

- En utilisant la différence de force  $F_{r4} - F_{r2}$  le quadricoptère tourne autour de l'axe  $x_B$ , l'angle de roulement change  $\phi$  et le quadcoptère commence à se déplacer le long de l'axe  $y_B$ .

- En utilisant la différence de force  $F_{r3} - F_{r1}$  le quadricoptère tourne autour de l'axe  $y_B$ , l'angle de tangage change  $\theta$  et le quadcoptère commence à se déplacer le long de l'axe  $x_B$ .

Les intensités des moments générées par les hélices sont proportionnelles aux forces de poussée [46] :

$$M_{ri} = K_m F_{ri} \quad i=1,2,3,4 \quad (\text{III.9})$$

Où  $K_m$  [m] : coefficient de couple

- En utilisant le couple total définie par (2) le quadricoptère peut être contrôlé autour de l'axe  $z_B$  ou l'angle de virage change  $\psi$ .

En peut définir quatre entrées de contrôle de quadcoptère à la base de forces et moments aérodynamique que précédemment décrits générés par les hélices [45]:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{r1} + F_{r2} + F_{r3} + F_{r4} \\ F_{r4} - F_{r2} \\ F_{r3} - F_{r1} \\ M_{r2} + M_{r4} - M_{r1} - M_{r3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

- En utilisant  $U_1$  pour contrôler la hauteur
- En utilisant  $U_2, U_3, U_4$  pour contrôler le mouvement angulaire

Les vecteurs de force de contrôle peuvent être définis  $\overline{F}_c$  et les couples  $\overline{M}_c$ , ont les composant dans le système de coordonnées B sont donnée par [46].:

$$F_c^B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

$$M_c^B = \begin{bmatrix} U_2 d \\ U_3 d \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

$d$ [m] la distance entre le centre de masse du quadcoptère et l'axe autour duquel tournent les hélices.

c) **La force gravitationnelle  $\vec{F}_g$**

La force gravitationnelle agissant sur le quadcoptère dans le centre de masse peut être exprimée comme suit [46].:

$$F_g^E = -m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

On suppose que l'accélération gravitationnelle est constant  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

d) **Les forces de résistance aérodynamique**

Les forces de résistance aérodynamique apparaissent comme des forces perturbatrices agissant sur le quadcoptère, dans ce travail seul la force de trainée aérodynamique liée à la dynamique de translation sera considérée  $\vec{F}_d$ , pour les petits quadcoptère et pour des faibles vitesses (5 – 10 m/s) on peut supposer que cette force est proportionnelle à la vitesse de translation du quadcoptère [45].

$$V^E = \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

$$V^B = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = T_{BE} V^E = T_{BE} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Donc par rapport au système de coordonnées B :

$$F_d^B = -K_d V^B = - \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

$K_d$  : la matrice contenant les coefficients des forces de trainée aérodynamique  
 $(K_x, K_y, K_z) \frac{N}{m/s}$

$V^E, V^B$  : les coefficients des vecteurs vitesse [46].

### III.4.3 Modèle de quadcoptère dynamique non linéaire

En supposant que le système de coordonnées E être considérée comme inertiel, et la masse  $m$  et le tenseur d'inertie  $J$  sont constants [47].

On a :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_c + \vec{F}_g + \vec{F}_d \quad (\text{III.17})$$

Et :

$$J \frac{d\vec{\Omega}}{dt} = \vec{M}_c \quad (\text{III.18})$$

L'équation (III.17) peut être représenté sous forme matricielle :

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = F_c^E + F_g^E + F_d^E = T_{BE}^{-1} F_c^B + F_g^E + T_{BE}^{-1} F_d^B$$

$$= T_{BE}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \end{bmatrix} - m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} - T_{BE}^{-1} \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} T_{BE} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

L'expression (III.19) peut être écrite sous la forme [47]:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{s(\phi)s(\psi)+c(\phi)s(\theta)c(\psi)}{m} U_1 - \frac{K_x}{m} \dot{x} \\ \frac{-s(\phi)c(\psi)+c(\phi)s(\theta)s(\psi)}{m} U_1 - \frac{K_y}{m} \dot{y} \\ \frac{c(\phi)c(\theta)}{m} U_1 - \frac{K_z}{m} \dot{z} - g \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

L'équation (III.18) qui décrit la dynamique angulaire d'un quadricoptère est dérivée par rapport au système de coordonnées B, qui n'est pas inertiel, elle peut donc s'écrire sous la forme :

$$J \frac{d\vec{\Omega}}{dt} + \vec{\Omega} * (J \cdot \vec{\Omega}) = \vec{M}_c \quad (\text{III.21})$$

$$M_c^B = J \dot{\Omega}_B + \Omega_B (J \dot{\Omega}_B) \quad (\text{III.22})$$

Le tenseur d'inertie J n'a que des éléments diagonaux :

$$J = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Ou il est  $I_x = I_y$  donc :

$$\begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_2 d \\ U_3 d \\ U_4 d \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(I_y - I_z)qr}{I_x} + \frac{d}{I_x} U_2 \\ \frac{(I_z - I_x)qr}{I_y} + \frac{d}{I_y} U_3 \\ \frac{(I_x - I_y)qr}{I_z} + \frac{d}{I_z} U_4 \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Afin d'obtenir l'orientation angulaire du quadricoptère par rapport au système de coordonnées E, il est nécessaire de calculer les angles de poisson d'Euler

Pour calculer les angles de la position  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  se réduit au calcul préalable des vitesses angulaires p, q, r en intégrant l'expression (III.25) sur la base de (III.7)

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T_{\Omega}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \frac{\sin\phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

Il faut limiter l'angle de tangage à  $-\pi/2 < \theta < \pi/2$  rad par ce que pour les valeurs de  $\theta = \pm \pi/2$  rad les singularités dans la matrice (III.26) sont obtenue.

Pour la conception du contrôleur, il est nécessaire de décrire la dynamique angulaire du quadcoptère à travers les accélérations angulaires des angles de position  $\ddot{\phi}$ ,  $\ddot{\theta}$ ,  $\ddot{\psi}$

$$[\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T = [p \ q \ r]^T \quad (\text{III.27})$$

D'où :

$$[\ddot{\phi} \ \ddot{\theta} \ \ddot{\psi}]^T = [\dot{p} \ \dot{q} \ \dot{r}]^T \quad (\text{III.28})$$

En remplaçant l'expression (III.28) dans (III.25) :

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(I_y - I_z)qr}{I_x} + \frac{d}{I_x} U_2 \\ \frac{(I_z - I_x)qr}{I_y} + \frac{d}{I_y} U_3 \\ \frac{(I_x - I_y)qr}{I_z} + \frac{1}{I_z} U_4 \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

Un vecteur d'états variables d'un quadcoptère  $x = [\phi \ \dot{\phi} \ \theta \ \dot{\theta} \ \psi \ \dot{\psi} \ x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ z \ \dot{z}]^T$ .

Un modèle non linéaire complet d'un quadricoptère dans l'espace d'états peut s'écrire sous la forme [47] :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{(I_y - I_z)}{I_x} x_4 x_6 + \frac{d}{I_x} U_2 \\ x_4 \\ \frac{(I_z - I_x)}{I_y} x_2 x_6 + \frac{d}{I_y} U_3 \\ x_6 \\ \frac{(I_x - I_y)}{I_z} x_4 x_2 + \frac{1}{I_z} U_4 \\ x_8 \\ -\frac{K_x}{m} x_8 + \frac{U_x}{m} U_1 \\ x_{10} \\ -\frac{K_y}{m} x_{10} + \frac{U_y}{m} U_1 \\ x_{12} \\ -\frac{K_z}{m} x_{12} - \frac{g + \cos(x_1) \cos(x_3)}{m} U_1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

Ou les labels suivants ont été introduits :

$$U_x = \cos(x_1) \sin(x_3) \cos(x_5) + \sin(x_1) \sin(x_5)$$

$$U_y = \cos(x_1) \sin(x_3) \sin(x_5) - \sin(x_1) \cos(x_5)$$

### III.5 Modèle de simulation et test de modèle

En utilisant le modèle mathématique non linier complet de quadcoptère, donnée par l'expression (III.30), on a formé un modèle de simulation de quadcoptère, est un petit quadcoptère

(0.65 kg) avec des hélices fixées alimentées par quatre moteurs à courant continue sans balais (brushless motor), de nombreuses valeurs d'autre paramètre de ce quadcoptère sont données dans Tableau III.1

La figure (III.4) montre un modèle de simulation de ce quadcoptère implémenté dans le progiciel MATLAB/Simulink, les entrées du modèle de simulation sont des signaux de contrôle  $U_1 U_2 U_3 U_4$ .

Ix	$7.5 \cdot 10^{-3}$	Moment d'inertie du quadcoptère autour de l'axe X
Iy	$7.5 \cdot 10^{-3}$	Moment d'inertie du quadcoptère autour de l'axe Y
Iz	$1.3 \cdot 10^{-2}$	Moment d'inertie du quadcoptère autour de l'axe Z
Jr	$6.5 \cdot 10^{-5}$	Moment d'inertie rotationnel total autour de l'axe de l'hélice
b	$3.13 \cdot 10^{-5}$	Facteur de poussée
d	$7.5 \cdot 10^{-7}$	Facteur de traînée
i	0.23	Distance au centre du quadcoptère
m	0.65	Masse de quadcoptère en kg
g	9.81	Accélération gravitationnelle

Tableau III.1 : les paramètres de modèle de simulation

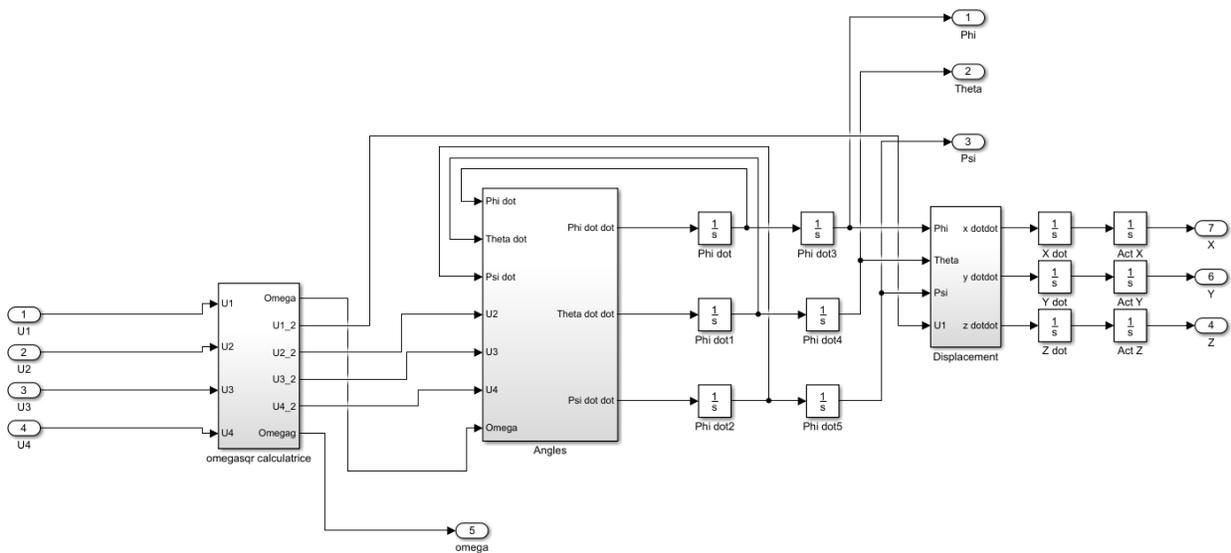


Figure III.4: modèle de simulation de quadcoptère

### III.5.1 Test de modèle en boucle ouverte

Une simulation en boucle ouverte est réalisée afin de vérifier le modèle mathématique en insérant une fonction échelon (step) comme entrée. La structure du modèle de test en boucle ouverte est représentée par la figure suivante :

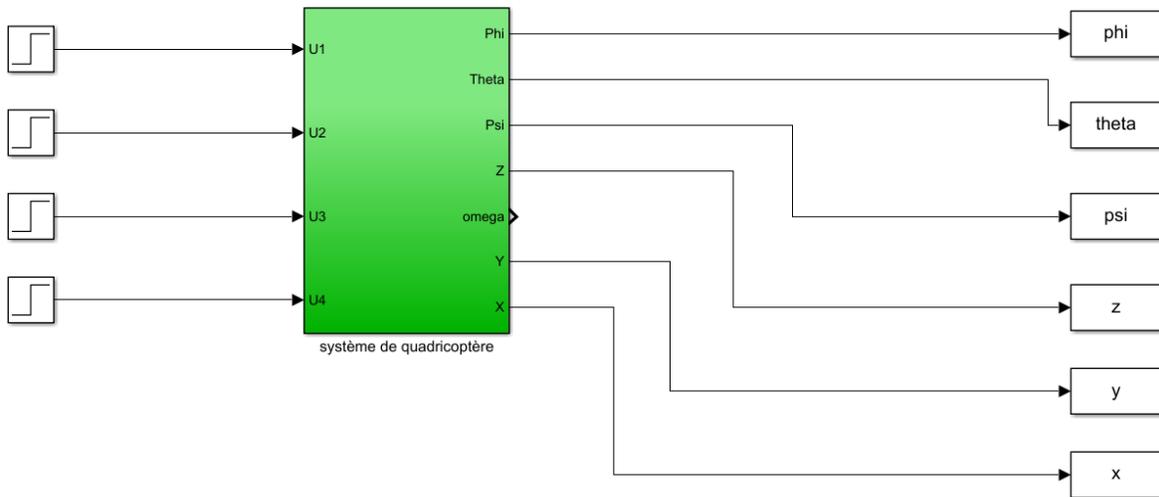


Figure III.5 : La structure du modèle de test en boucle ouverte.

Après avoir simulé le modèle élaboré, les résultats suivants ont été obtenus :

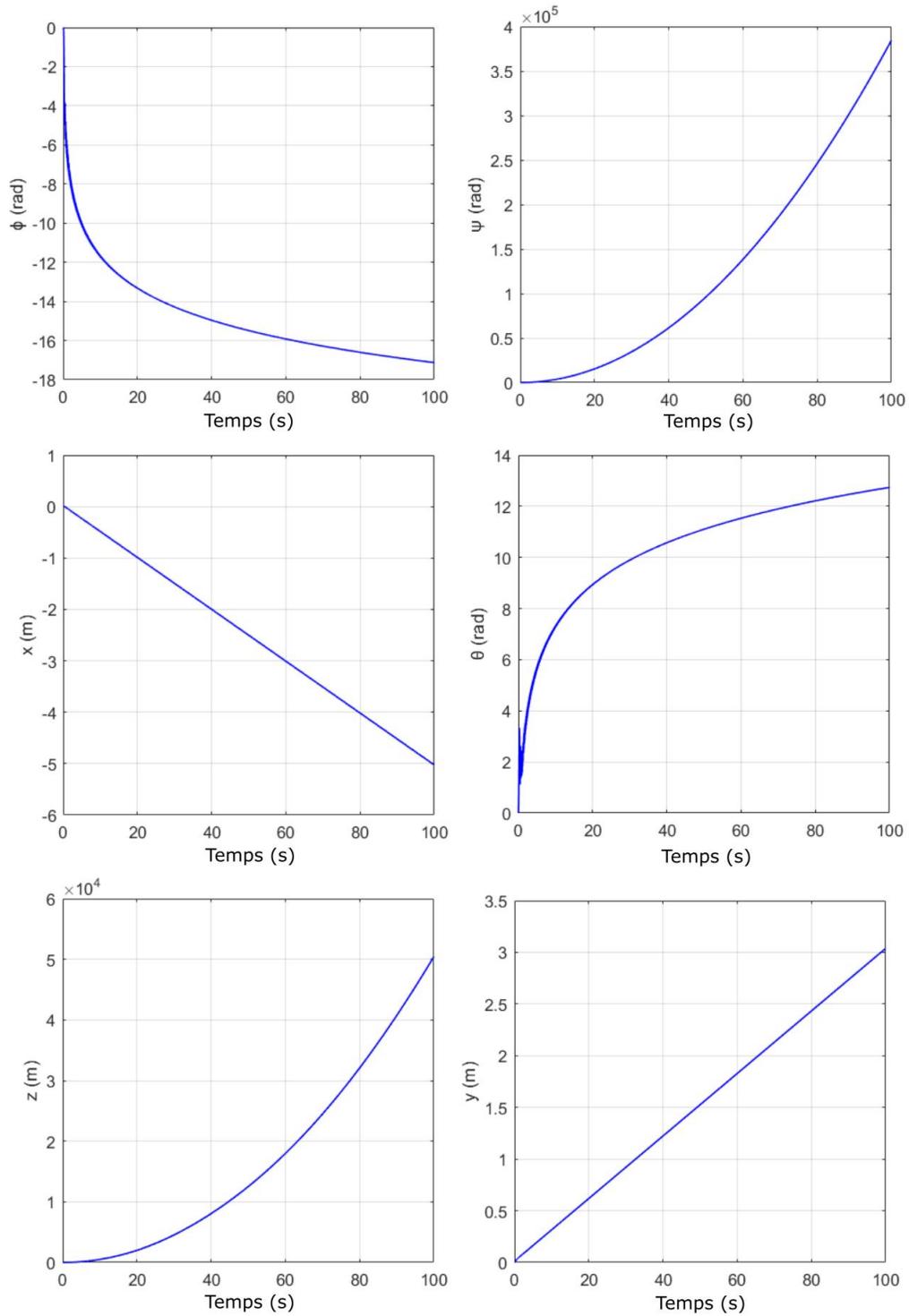


Figure III.6 : Résultats des tests de simulation en boucle ouverte

D'après les graphes de la figure (III.6), il est évident que le système n'a jamais atteint l'état d'équilibre et que toutes les sorties varient infiniment, le système est donc instable. Donc on a besoin de stabiliser le système avec des contrôleurs, et dans notre cas on utilise le PID.

### III.5.2 Test de modèle en boucle fermée

La structure du modèle de test en boucle fermée est représentée par la figure suivante :

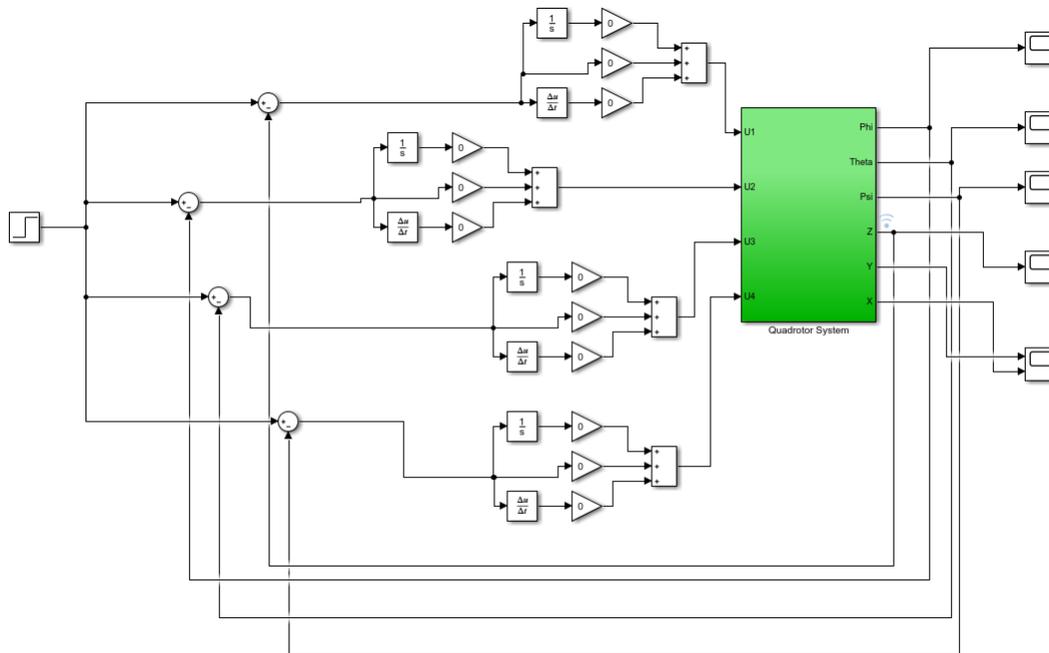


Figure III.7 : Structure du modèle en boucle fermée.

#### III.5.2.1 Réglage du contrôleur

Un contrôleur PID peut être réglé manuellement ou en utilisant la fonction de réglage automatique dans Simulink. Chacun des PID est réglé séparément. Lors du réglage manuel d'un contrôleur PID, une procédure simple peut être suivie, mais le processus peut prendre beaucoup de temps et peut être itératif.

### III.5.2.2 Processus de réglage

#### III.5.2.2.1 Réglage du PID

Le processus consiste à régler d'abord le gain P, alors que les gains I et D sont nuls, et à continuer d'augmenter la valeur du gain jusqu'à ce que la valeur réelle dépasse la valeur souhaitée, mais il ne s'agit pas de la valeur réglée pour le gain P, elle indique simplement la plage de la valeur du gain, qui peut être ajustée lors du réglage des gains I et D. Encore une fois, nous utilisons l'oscilloscope pour la visualisation,

#### 1) Réglage du gain P

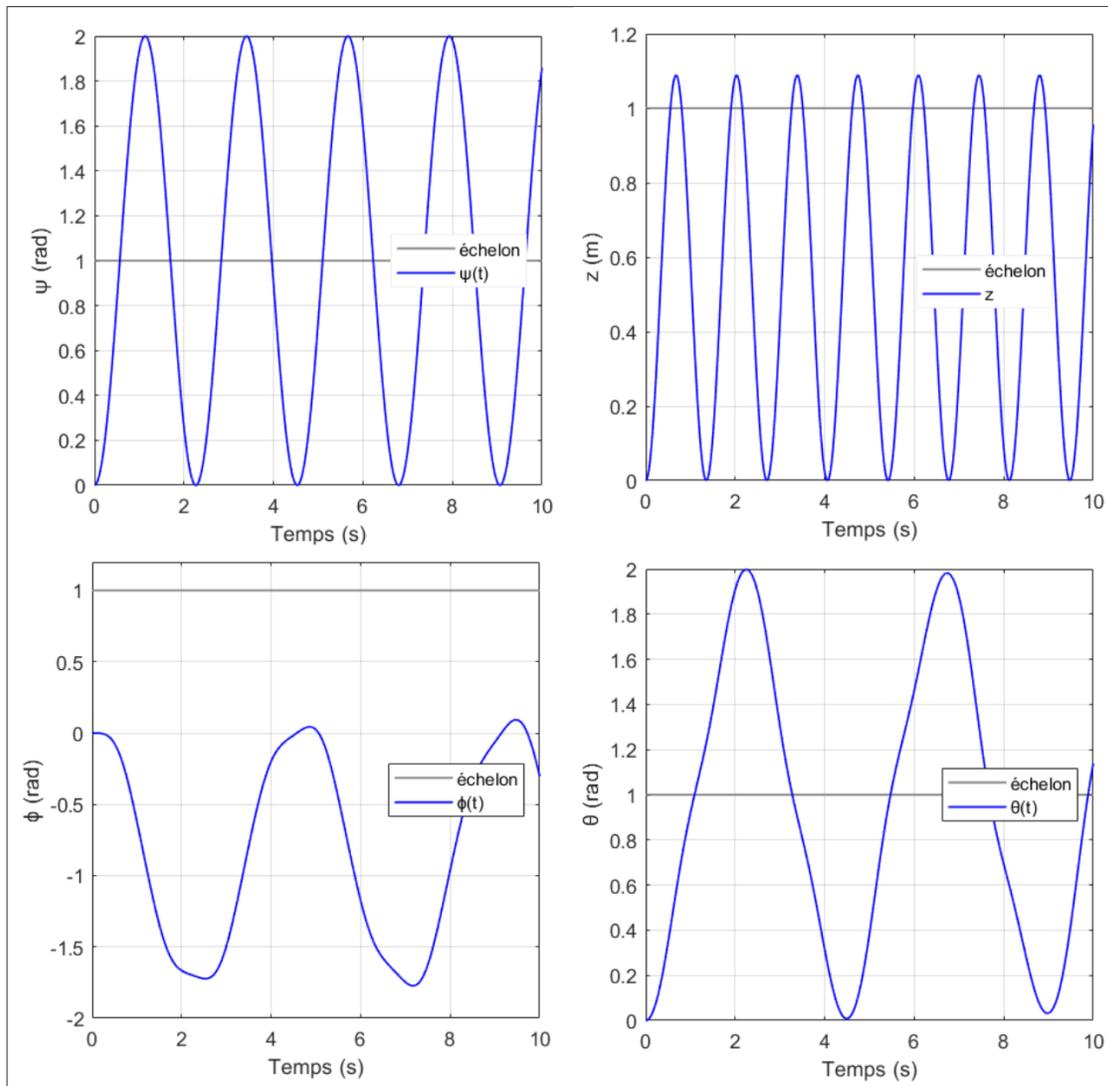


Figure III.8 : Résultats de simulation en boucle fermée (correcteur p)

Les valeurs de P :  $\phi$  : (P= 0.0001),  $\theta$  : (P=0.1),  $\psi$  : (P= 0.1), Z : (P= 14).

Après avoir réglé le gain de P, maintenant on va régler le gain de D, il élimine les erreurs futures. Augmentez légèrement la valeur du gain et observez son effet sur les résultats. Cette action supprimera l'erreur future, ce qui aura pour effet de diminuer les oscillations dans la simulation, et donc de lisser la réponse.

## 2) Réglage du gain D

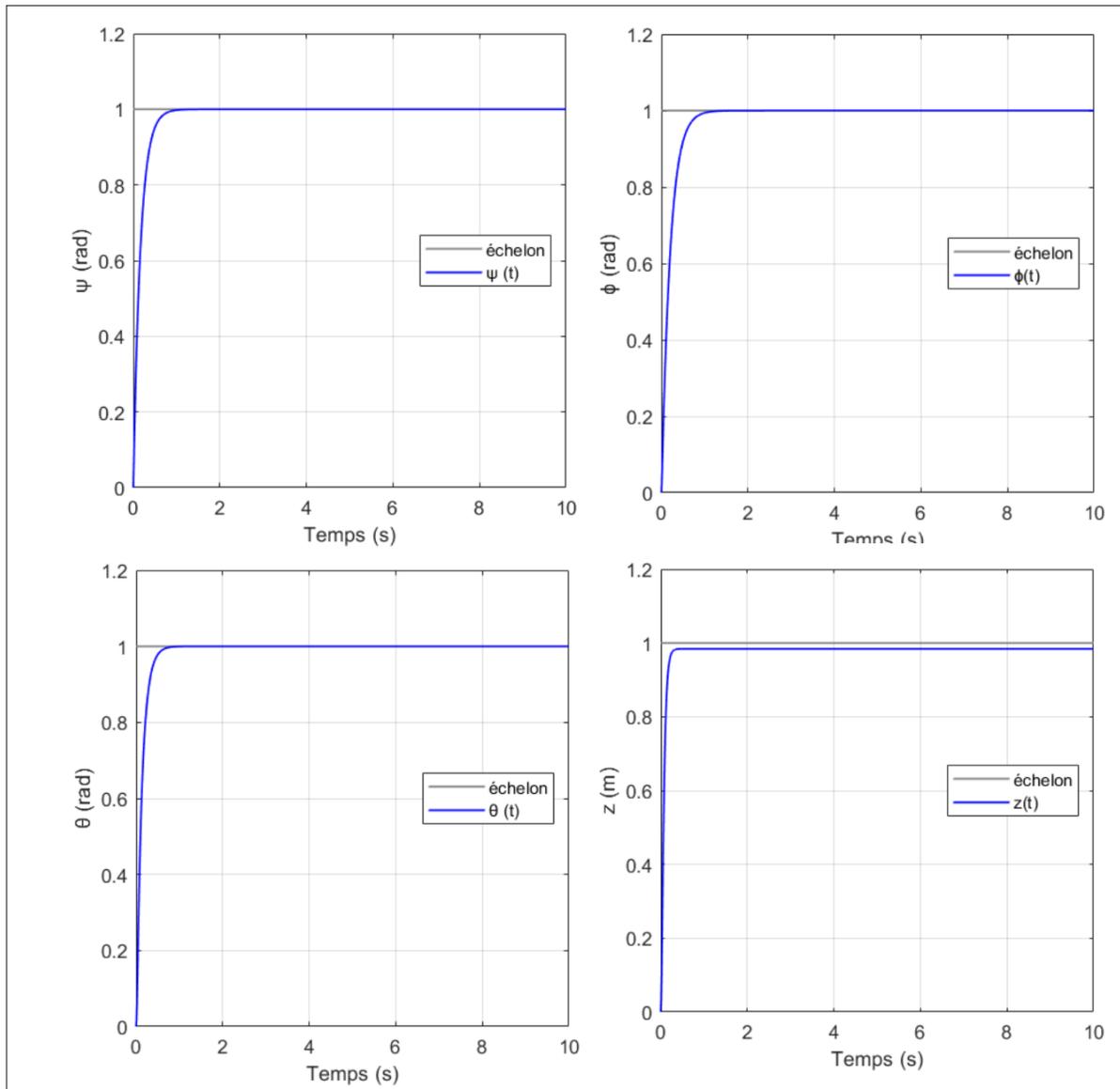
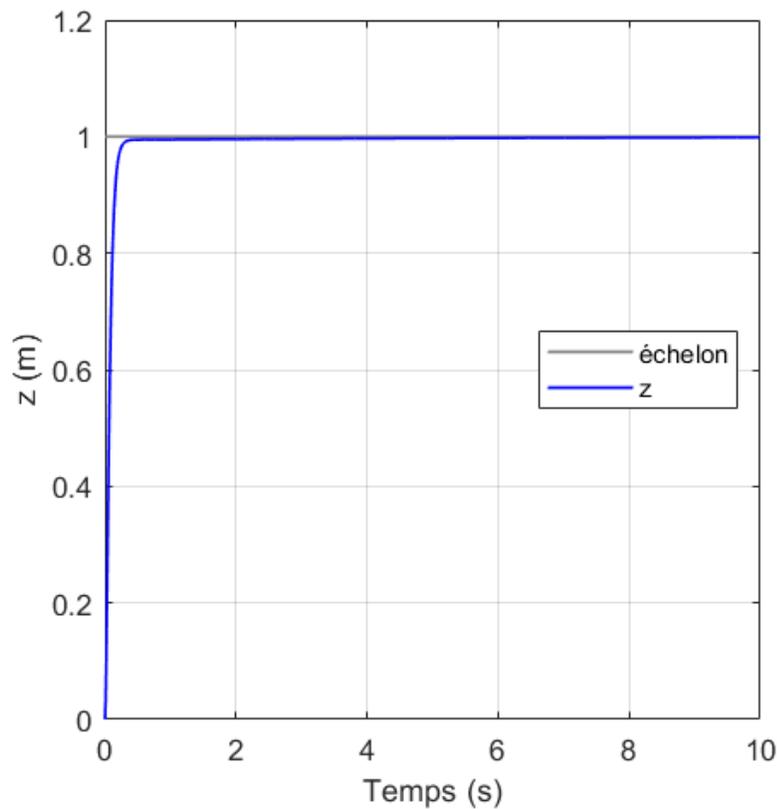


Figure III.9 : Résultats de simulation en boucle fermée (correcteur p et d)

Les valeurs de PD :  $\phi$  : (P= 0.8, D=0.4),  $\theta$  : (P= 1.2, D=0.4),  $\psi$  : (P= 1, D=0.4), Z : (P= 400, D=30).

Maintenant, la réponse de la valeur réelle est très lisse, et le dépassement est négligeable, mais il y a une erreur dans le régime permanent sur le graph de l'altitude, et la valeur réelle de la réponse n'est pas la même que la valeur désirée. Cette erreur peut être éliminée par l'intégrateur, qui accumule la valeur de l'erreur dans le temps et tente d'atteindre la valeur souhaitée. On peut observer sur la figure (III.10) comment le gain diminue l'erreur en régime permanent dans le graph de l'altitude z.

### 3) Réglage du gain I



**Figure III.10 :** Résultat de simulation en boucle fermée (correcteur PID, P=400, D=30, I=50)

Après avoir effectué quelques réglages et corrections, le PID entièrement réglé a donné les résultats suivants (figure III.11), les résultats sont assez satisfaisants.

Les PID de roulis et de tangage ont les mêmes valeurs de gain et les mêmes réponses, car ils se basent sur le même principe.

Les valeurs PID du lacet sont différentes de celles du roulis et du tangage, et doivent être déterminées séparément. Il est difficile de régler le PID de lacet, car il dépend du couple produit par les quatre rotors.

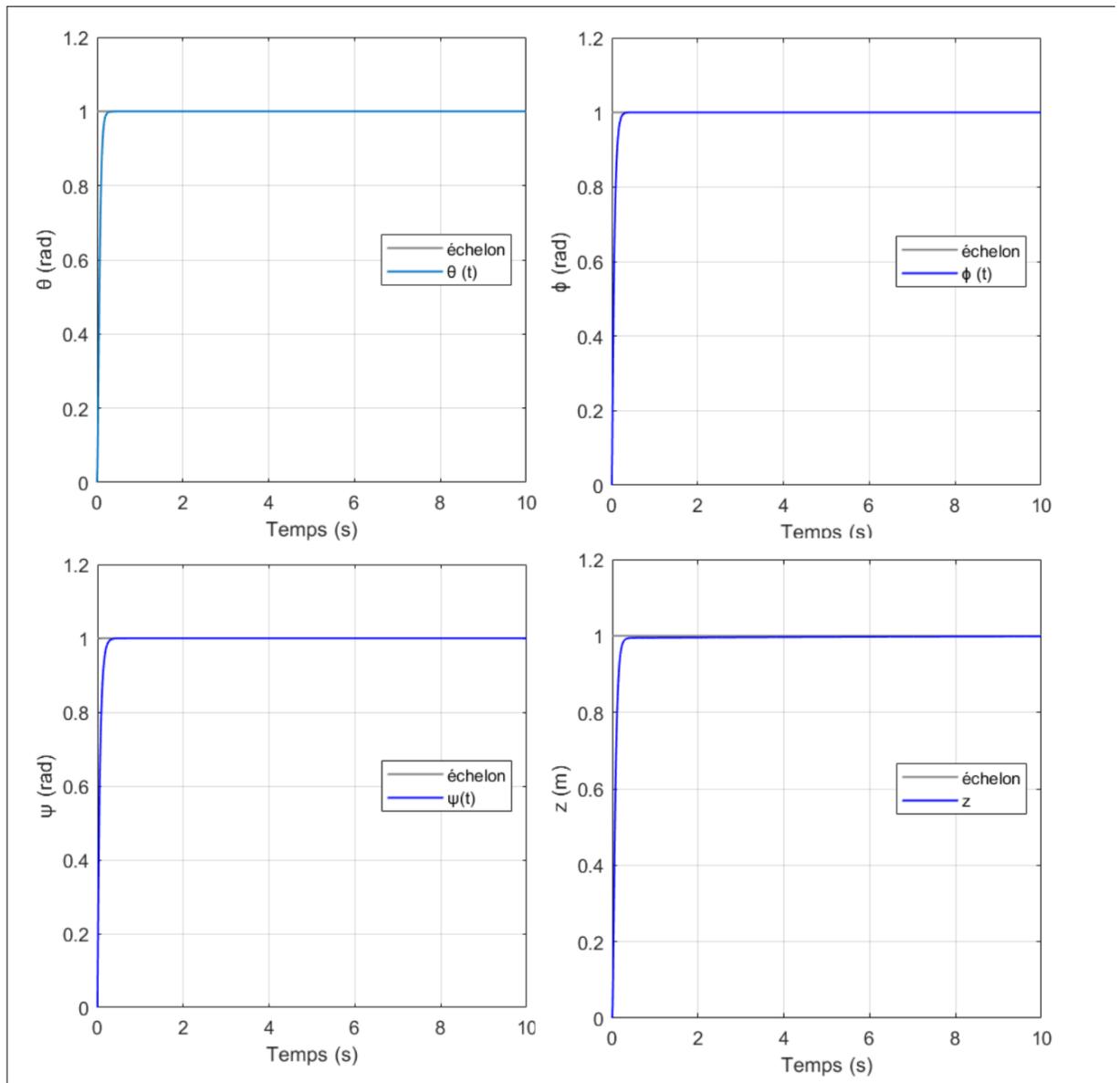


Figure III.11 : Résultats de simulation en boucle fermée (correcteur PID)

Les valeurs de PID :  $\phi$  : (P= 55, I=0, D=3),  $\theta$  : (P= 25, I=0, D=1.5),  $\psi$  : (P= 35, I=0, D=2), Z : (P= 400, I=50, D=30).

Jusqu'à présent, tous les PID du contrôleur sont réglés, ce qui fonctionne bien dans la simulation, mais l'implémentation sur un matériel réel peut nécessiter de changer légèrement ces valeurs, car avec ces valeurs de gain, la réponse du quadcoptère à chaque commande sera un peu agressive.

### **III.6 Conclusion**

Le quadricoptère est l'un des robots volants qui sont en investigation ces dernières années. Ce système est constitué de quatre rotors, deux de ces rotors tournent dans un sens et les deux autres dans le sens inverse. En variant les vitesses de rotation de ces rotors, le quadricoptère peut faire des mouvements différents aussi bien en translation qu'en rotation. Dans ce chapitre une description du principe de fonctionnement du drone quadricoptère est présentée avec une description détaillée sur ses mouvements possibles ainsi que les modes de vol.

On utilise le formalisme de Newton-Euler pour modéliser notre système., où on a établi le modèle dynamique du quadricoptère pour se rapprocher le plus possible de la dynamique réelle du quadricoptère. Ce dernier soumis aux perturbations d'environnement extérieur qui s'influencent sur comportement rotative du quadcoptère auquel nous avons utilisé le correcteur linéaire classique PID.

Dans le prochain chapitre, on effectuera la réalisation concrète de notre objectif, qui se compose de différentes parties expliquant principe de fonctionnement du quadcoptère en détail.

***CHAPITRE IV : Tests réels &  
discussions des résultats***

## ***Chapitre IV : Tests réels & discussions des résultats***

### **IV.1 Introduction**

Dans le chapitre précédent, une modélisation du drone ainsi que la régulation en boucle fermée avec un régulateur PID ont été présentées.

Dans ce chapitre nous allons principalement effectuer des tests réels et présenter les résultats de rotation du bicoptère selon les axes x, y. Nous allons également visualiser les réponses de variation des angles de rotation en déduisant sur la stabilité du système.

Notre but dans ce chapitre est de réaliser un véhicule aérien de type Quad X commander à distance par un radiocommande, et réaliser un système de régulation de type PID.

### **IV.2 Principaux composants nécessaire à la réalisation**

Le quadcoptère que nous allons réaliser se compose de deux circuits :

1. Concernant la commande de quadcoptère (radiocommande) qui contient trois composants essentiels qui sont :
  - Deux potentiomètres de type joystick : indiquent les mouvements de quadcoptère selon la valeur de tension de sortie, où joystick de gauche commande le mouvement vertical et lacet par contre le joystick droit commande les autres mouvements du quadcoptère.
  - Microcontrôleur : permet de traiter les données provenant de deux joysticks et les transmettre au contrôleur de vol à travers l'émetteur radio fréquence.
  - Émetteur radio fréquence.
2. Le deuxième circuit s'appelle le contrôleur de vol, son emplacement sur le centre du quadcoptère, ce circuit reçoit les données de commande depuis la commande de vol à moyen de récepteur radio fréquence, ce dernier transfère les données reçues au microcontrôleur. En utilisant les données reçues de circuit commande de vol, les données reçues de capteur gyroscopique (angles roulis, tangage et lacet) et un algorithme bien

étudié, le microcontrôleur sortis quatre signaux sous forme PWM, ce type de signal permet de gérer les pré-actionneurs ESC qui changent la vitesse de rotation des brushless ce qui permettent de donner un quadcoptère bien commandable et stable.

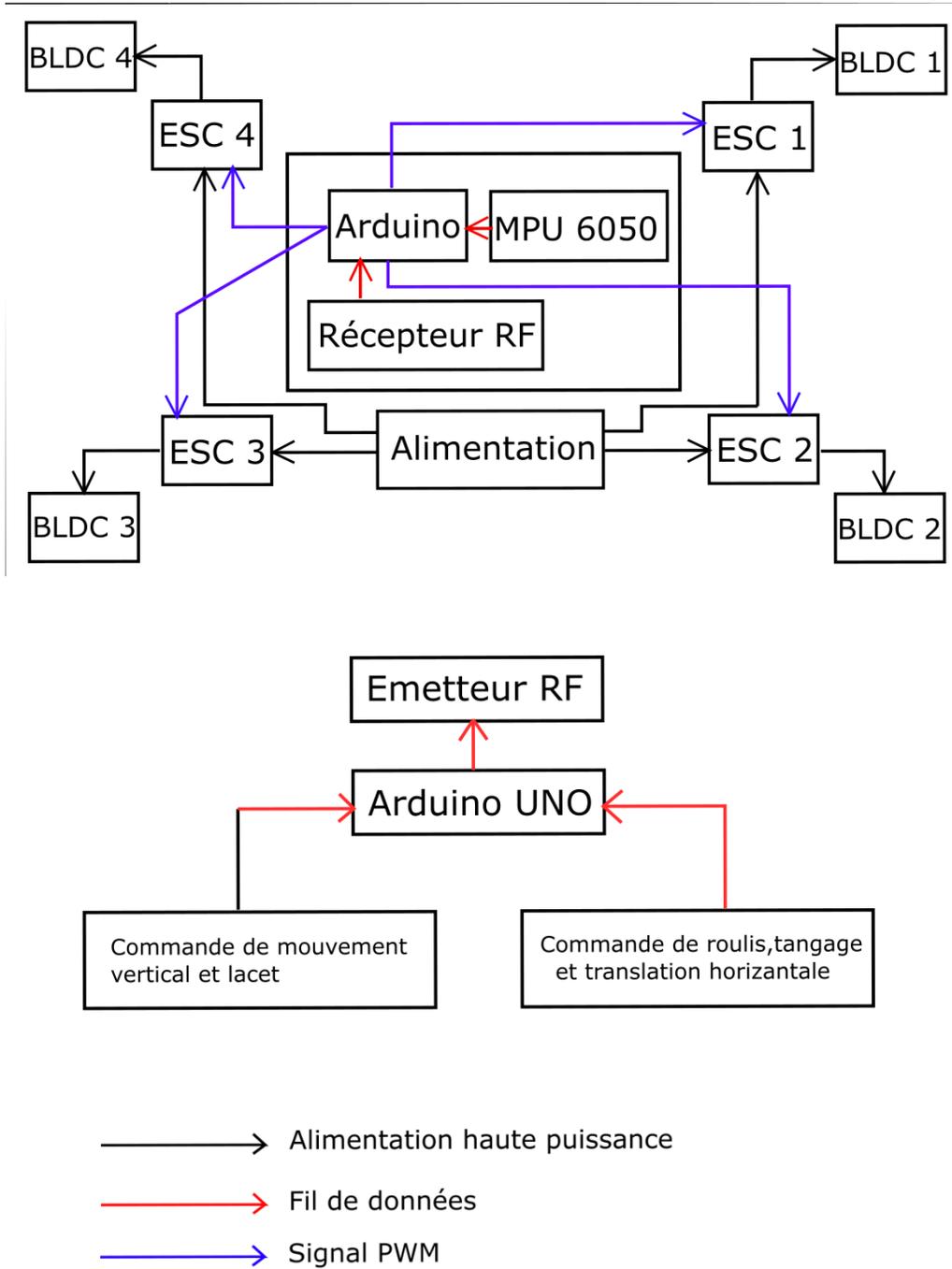


Figure IV.1 : schéma général du quadcoptère à réaliser.

## IV.3 Tests des composants utilisés

### IV.3.1 Première expérience

Dans cette partie, on va d'abord commencer avec un seul moteur donc on doit utiliser la batterie LIPO avec un contrôleur des vitesses ESC et on va aussi utiliser un Joystick et deux NRF.

Ce travail sert à mieux comprendre comment la commande RF fonctionne, et pour arriver à l'utiliser après dans le quadcoptère.

Donc l'objectif principal de cette première expérience c'est bien comprendre le fonctionnement de contrôleur de vitesse ESC, aussi se familiariser avec l'utilisation de la carte Arduino IDE, observer la vitesse de moteur, mesurer le point maximum que le moteur peut s'élever et finalement comprendre comment le joystick et le NRF fonctionne.

#### a) Les composants nécessaires

- 1 Moteur brushless 2212 1000KV.
- 1 Contrôleur de vitesse électrique 30A.
- 1 Batterie Li Po 3300mAh 11.1V 25C.
- 2 Carte Arduino Uno avec 2 câbles USB.
- 2 NRF 24 L01.
- 1 joystick
- Des files pour le branchement.

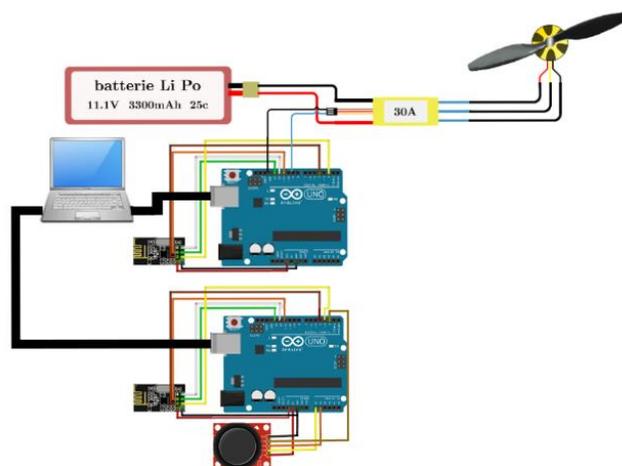


Figure IV.2 : Le branchement de la première expérience.

## b) Branchement des composants

Dans cette partie, on s'intéresse au :

### IV.3.1.1 Branchement des ESC avec le moteur et la carte Arduino

Les ESC sont directement alimentés par la batterie LI PO à travers un filtre par les fils épais rouge et noir, le fil jaune du cordon à 3 fils transporte le signal venant de l'une des pattes digitales de l'Arduino, le noir relié à la masse, le rouge fourni une tension de 5v non utilisé, les trois fils épais de la sortie sont reliés aux moteurs.

Voir la figure ci-dessous :

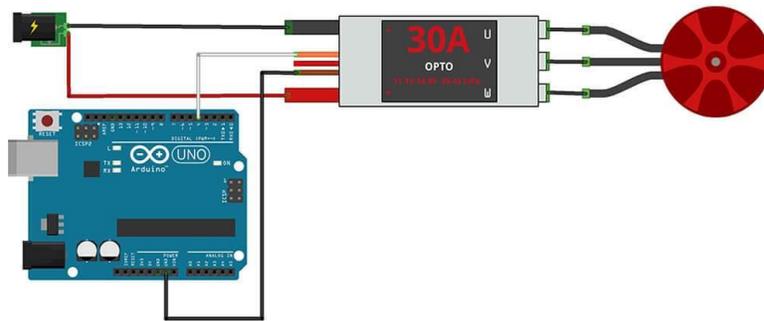


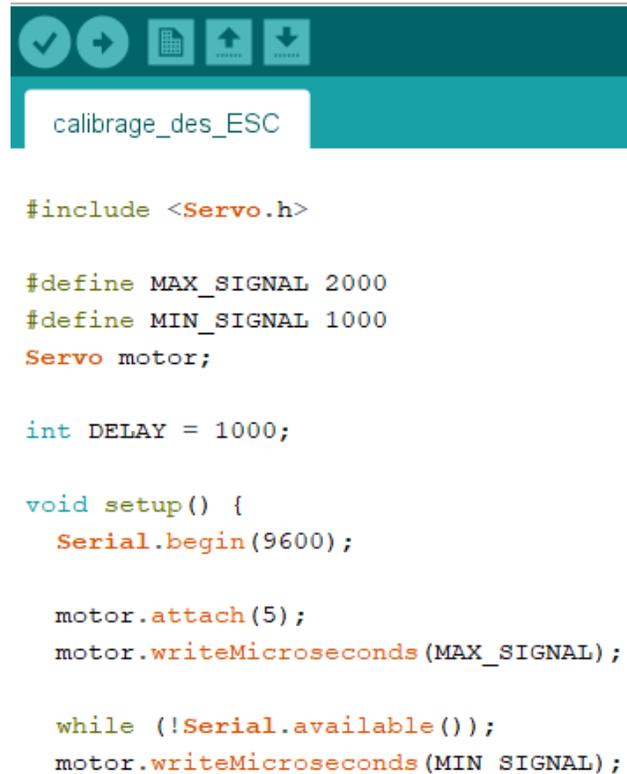
Figure IV.3 : Branchement des ESC avec le moteur et la carte Arduino

- **Calibrage des ESC**

La calibration des ESC est une étape importante dans la configuration de notre drone. En effet, cela va permettre à notre Arduino et ESC d'apprendre l'un de l'autre quel est le minimum et quel est le maximum, dans la plage des régimes moteurs, à utiliser entre eux. Sans ces valeurs, l'Arduino sera incapable de faire voler notre drone (ou très mal !).

Le calibrage n'a rien de compliqué : il s'agit d'envoyer aux ESC les extremums des commandes de gaz soit, en clair, le signal correspondant à la commande "arrêt moteur" et le signal correspondant à la commande "plein gaz".

Cette opération s'effectue par plusieurs méthodes parmi lesquelles on a choisi celle de la programmation à travers le port série de l'Arduino :



```
#include <Servo.h>

#define MAX_SIGNAL 2000
#define MIN_SIGNAL 1000
Servo motor;

int DELAY = 1000;

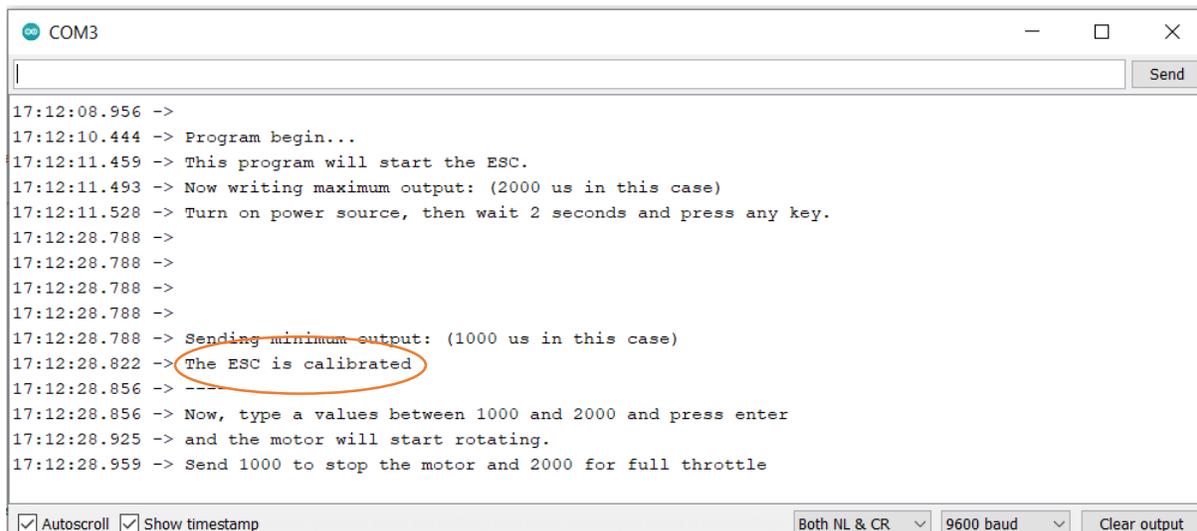
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  motor.attach(5);
  motor.writeMicroseconds(MAX_SIGNAL);

  while (!Serial.available());
  motor.writeMicroseconds(MIN_SIGNAL);
}
```

Figure IV.4 : Le code Arduino pour calibrer les ESC :

Résultat :



```
COM3
17:12:08.956 ->
17:12:10.444 -> Program begin...
17:12:11.459 -> This program will start the ESC.
17:12:11.493 -> Now writing maximum output: (2000 us in this case)
17:12:11.528 -> Turn on power source, then wait 2 seconds and press any key.
17:12:28.788 ->
17:12:28.788 ->
17:12:28.788 ->
17:12:28.788 ->
17:12:28.788 -> Sending minimum output: (1000 us in this case)
17:12:28.822 -> The ESC is calibrated
17:12:28.856 -> ---
17:12:28.856 -> Now, type a values between 1000 and 2000 and press enter
17:12:28.925 -> and the motor will start rotating.
17:12:28.959 -> Send 1000 to stop the motor and 2000 for full throttle
```

Figure IV.5 : résultat obtenue du calibrage des ESC

Quand nous avons chargé le code, les ESC sont calibrés.

### IV.3.1.2 Communication entre deux Arduino via module NRF24 L01

La puce NRF24 est un circuit intégré de Nordic Semiconducteur, il s'agit ni plus ni moins que d'un module d'émission / réception radio, opérant sur la bande des 2,4 GHz (comme le WiFi, ou le Bluetooth). Mais ce qui fait exception, c'est qu'il se pilote le plus simplement du monde. En effet, un simple petit Arduino permet d'en prendre le contrôle, via le port SPI

- **Comment raccorder le NRF24L01 à l'Arduino**

Maintenant que nous avons vu la partie « théorique », passons à la pratique ! Ici, nous verrons en détail les broches des modules NRF24L01 :

BROCHE	SIGNIFICATION	RÔLE
VCC	-	Alimentation du module (1,9 et 3,6 V)
GND	-	Alimentation du module (0 V)
SCK	Serial Clock	Horloge communication SPI
MISO	Master In Slave Out	Voie de communication nRF24 -> Arduino
MOSI	Master Out Slave In	Voie de communication Arduino -> nRF24
CE	Chip Enable	Active le mode RX ou TX (émission / réception)
CSN	Chip Select Not	Active le module nRF24, lorsque mis à la masse (port SPI)
IRQ	Interrupt ReQuest	Permet d'interagir avec un microcontrôleur, si besoin

**Tableau IV.1** brochage des modules NRF24L01

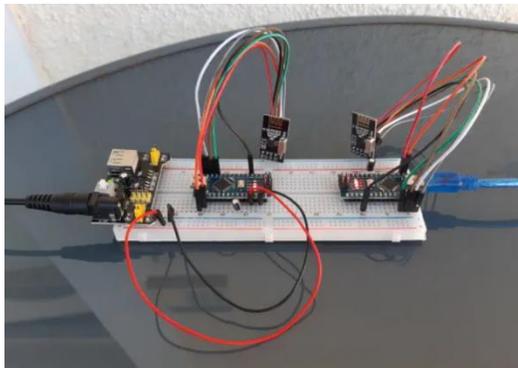
Arduino	VCC	GND	SCK	MISO	MOSI	CE	CSN	IRQ
UNO	+ 3,3 V	GND	13	12	11	7	8	n.c.

**Tableau IV.2** Broches de communication à l'Arduino

**Exemple :** réaliser l'envoi d'un message « Hello World » d'un arduino à l'autre :

Allor:

- Le 1er Arduino envoie un message toutes les secondes, contenant la chaîne de caractères « Hello World !! »
- Le 2ème Arduino sera à l'écoute de données radio, et s'il en reçoit, il les affichera sur le moniteur série de l'IDE Arduino.



**Figure IV.6 :** montage d'un Arduino et deux NRF

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

#define pinCE 7
#define pinCSN 8
#define tunnel "PIPE1"

RF24 radio(pinCE, pinCSN);

const byte adresse[6] = tunnel;
const char message[] = "Hello World !!!";

void setup() {
  radio.begin();
  radio.openWritingPipe(adresse);
  radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
  radio.stopListening();
}

void loop() {
  radio.write(&message, sizeof(message));
  delay(1000);
}

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

#define pinCE 7
#define pinCSN 8
#define tunnel "PIPE1"
RF24 radio(pinCE, pinCSN);

const byte adresse[6] = tunnel;
char message[32];

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Récepteur NRF24L01");
  Serial.println("");

  // Partie NRF24
  radio.begin();
  radio.openReadingPipe(0, adresse);
  radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
  radio.startListening();
}

void loop() {
  if (radio.available()) {
    radio.read(&message, sizeof(message));
    Serial.print("Message reçu : "); Serial.println(message);
  }
}
```

**Figure IV.7 :** Code de l'envoi d'un message « Hello World » d'un Arduino à l'autre

Après avoir chargé le programme, l'un des NRF envoie un message "hello world" et l'autre reçoit le message, et le serial monitor affiche ce message :

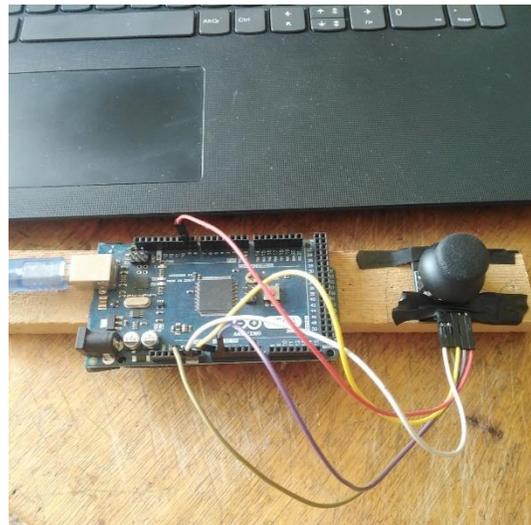
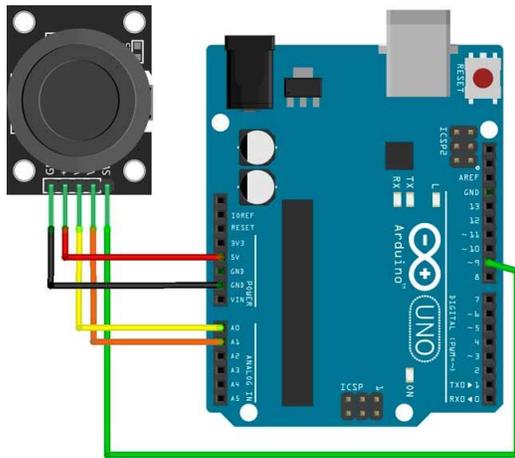
Moniteur série IDE Arduino messages hello world NRF24L01+, montage communication entre deux Arduino UNO par ondes radio, câblage et code nRF24.

Nous avons constaté comme résultat que les deux NRF est mis en marche ceci traduit le bon branchement de ces derniers.

### IV.3.1.3 L'utilisation d'un joystick avec la carte Arduino

Ce branchement permet de mieux comprendre le fonctionnement du joystick. Les composants nécessaires sont :

- Arduino Uno ou équivalent.
- 5 fils mâle-femelle.
- Un joystick analogique.



**Figure IV.8 :** Branchement d'un joystick avec la carte Arduino

```
const int pinX = A0;
const int pinY = A1;
const int pinBouton = 9;

void setup() {
  pinMode(pinBouton , INPUT_PULLUP); |
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int X = 0;
  int Y = 0;
  bool boutonValeur = false;

  //on lit les valeurs
  X = analogRead(pinX);

  delay(100);
  Y = analogRead(pinY);
  boutonValeur = digitalRead(pinBouton);

  //montrer les valeurs à l'écran
  Serial.print("X: " );
  Serial.print(X);
  Serial.print(" | Y: ");
  Serial.print(Y);
  Serial.print(" | Pulsateur: ");
  Serial.println(boutonValeur);
  delay(1000);
}
```

**Figure IV.9:** Le code de branchement d'un joystick avec la carte Arduino

#### IV.3.1.4 Résultats obtenus

Après avoir effectué les branchements nécessaires et téléversé le programme représenté sur la figure précédente, nous avons constaté que le moteur est mis en marche ceci traduit le bon branchement de notre expérience.

#### IV.3.2 Deuxième expérience

Après le succès de la première expérience et avoir réussi à faire tourner un seul moteur, on va aller maintenant à l'étape suivante qui aura pour but de visualisé notre système (voir s'il est stable ou non), pour ce faire on va utiliser :

- 2 Moteurs brushless 2212 1000KV.
- 2 Hélices 10×45.

- 2 Contrôleurs de vitesse électrique 30A.
- 2 NRF 24 L01.
- 1 joystick
- 1 Batterie Li Po 3300mAh 11.1V 25C.
- 1 MPU 6050.
- 2 Carte Arduino Uno avec deux câbles USB.
- Des files pour les branchements.

Les deux moteurs sont positionnés à l'extrémité de l'axe, ils seront tous les deux reliés à notre microcontrôleur Arduino grâce aux ESCs, et pour récupérer l'angle d'inclinaison on utilise un accéléromètre gyroscope MPU6050 qui sera positionné au centre de l'axe. Nous désirons que notre angle soit toujours à 0 degré, pour ce faire nous allons implémenter un régulateur PID numérique dans le programme et nous allons mettre comme consigne l'angle désiré, et afin de contrôler la vitesse des moteurs, on utilise un joystick connecté à un Arduino et un NRF.

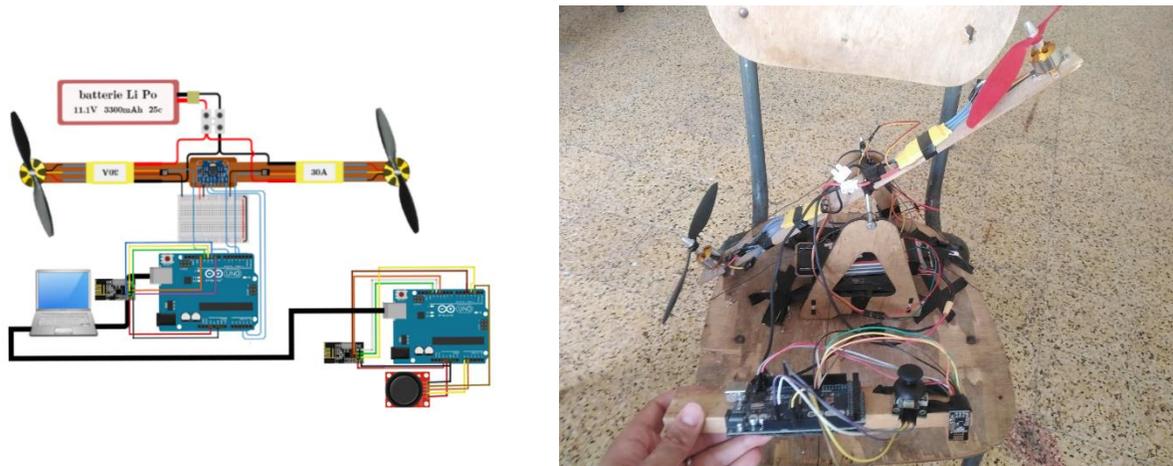


Figure IV.10: Le branchement de la deuxième expérience.

### IV.3.2.1 Branchement des composants

Dans cette partie, on s'intéresse au :

#### IV.3.2.1.1 MPU 6050

Le module MPU6050 est une centrale inertielle qui permet de mesurer l'évolution d'un objet dans l'espace. Il permet de mesurer les accélérations linéaires et angulaires dans les trois axes de l'espace. Ce composant se retrouve dans plusieurs applications notamment les manettes de jeux

vidéo ou les smartphones. Il peut être utilisé pour faire du contrôle d'assiette sur un drone comme notre cas. On va examiner ce capteur pour voir comment il fonctionne et comment l'utiliser avec un Arduino [48].

Le MPU combine une catégorie de dispositifs connus sous le nom d'unités de mesure inertielle un gyroscope 3 axes et un accéléromètre 3 axes de haute précision pour former une centrale inertielle calculant l'accélération et la vitesse angulaire de nos robots et véhicules mobiles.

Mais l'atout principal du module MPU-6050 réside sans doute dans son circuit DMP (Digital Motion Processor) intégré dans le même die de silicium : celui-ci prend en charge les algorithmes de calcul Motion Fusion 9 axes tout en corrigeant les problèmes d'alignement et les erreurs générées par les petits composants. Il prend également en charge la détection des capteurs et du mouvement [48]

Un accéléromètre doit prendre en compte l'accélération statique comme la force de gravité lorsqu'il effectue ses mesures. Il est utilisé dans le MPU-6050 est un accéléromètre à trois axes, ce qui signifie qu'il détecte l'accélération sur les axes X, Y et Z [11].

Un autre composant clé du MPU-6050 est le gyroscope. Ce dernier permet de mesurer le moment angulaire ou la rotation le long des axes X, Y et Z. Ces composants sont essentiels pour maintenir l'équilibre des avions et des engins spatiaux [11].

Un gyroscope mécanique est constitué d'une roue ou d'un disque monté de manière à pouvoir tourner rapidement autour d'un axe libre de se déplacer dans n'importe quelle direction. (A)Le type de gyroscope utilisé dans le MPU-6050 est un gyroscope "Micro Electro Mechanical System" ou MEMS. Il se compose de trois capteurs, un par axe, qui produisent une tension lorsqu'ils tournent. Cette tension est échantillonnée en interne à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique 16 bits [11].

Les données de l'accéléromètre, du gyroscope et de tout autre capteur tiers sont transmises à un processeur numérique de mouvement interne, ou DMP. Ce dispositif corrèle les données et les formate pour les utiliser sur le bus I2C. Il s'agit essentiellement d'un microprocesseur haute performance dédié au traitement des données de mouvement. Le terme DMP a été inventé par

Invensense, une division de TDK. C'est cette société qui a développé le MPU-6050, ainsi que de nombreux autres IMU [11].

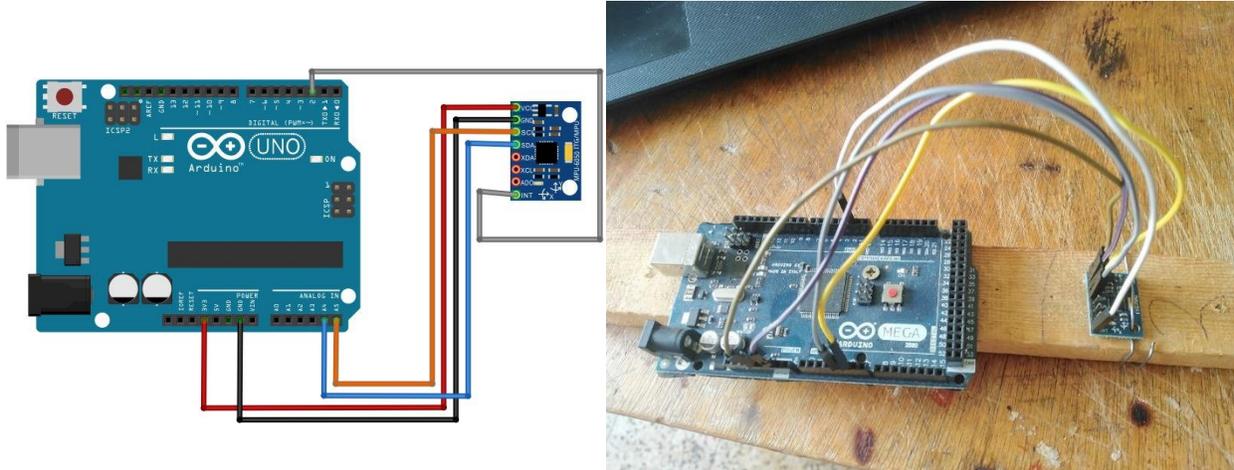


Figure IV.11: Schéma de câblage pour relier le capteur MPU à l'Arduino

Le capteur est surélevé par rapport au centre de gravité du drone, mais est parallèle à celui-ci. Ainsi, lorsque le drone effectue une rotation d'un angle  $\theta$

, le capteur effectue la même rotation. Il subit en plus un déplacement horizontal par rapport au centre du cadre, ce qui n'affecte en rien son inclinaison.

#### IV.3.2.1.2 Le régulateur PID

Le correcteur PID est la technique la plus utilisée dans la commande des processus industriels pour des décennies. Les raisons majeures de sa large diffusion en industrie sont sa capacité de commander la majorité des processus, ces actions sont bien comprises et son implémentation est très simple [49].

La correction se fait à base de l'erreur observée qui est la différence entre la consigne (valeur désirée) et la mesure (valeur réelle) [49].

$$e = \text{consigne} - \text{mesure}$$

Le PID réalise trois actions en fonction de cette erreur :

- Une action Proportionnelle : est souvent utilisée pour améliorer la rapidité du système bouclé.
- Une action Intégrale : est employée pour améliorer le régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées telles que la pression.
- Une action Dérivée : assure l'amélioration de la stabilité.

Le capteur MPU 6050 mesure en permanence les valeurs (l'angle) puis transmet ces informations au régulateur (PID), celui-ci compare cette mesure à la consigne ( $0^\circ$ ) puis suivant son algorithme le régulateur va transmettre ses ordres aux moteurs, afin de corriger l'erreur [49].

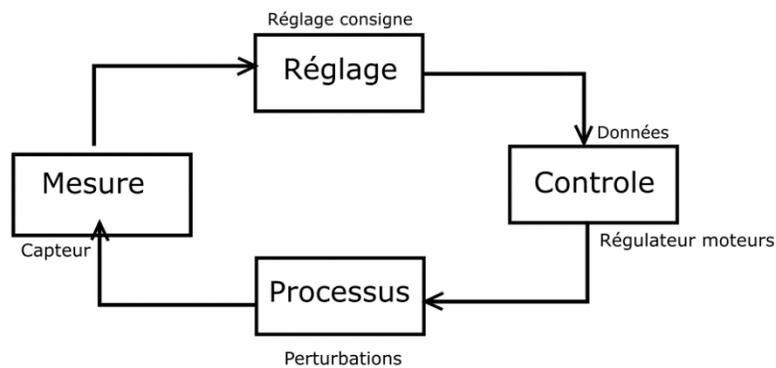


Figure IV.13: Schéma synoptique de régulation PID

Les grandeurs de la boucle de commande :

- **Grandeur commandée ou grandeur à commander** : Les angles de rotation du drone, le niveau d'altitude.
- **Grandeur de commande** : La vitesse de chaque moteur.
- **Grandeur perturbatrice ou perturbation** : Le vent.
- **Grandeur de consigne** : Le niveau d'altitude, angle =  $0^\circ$ .
- **Erreur ou écart de commande** : La différence entre la valeur désirée et la valeur mesure.

### 1) Implémentation d'un Correcteur PID sur la carte Arduino

Dans notre expérience on à utiliser un capteur (MPU 6050) qui est capable de calculer les angles de rotation selon les trois axes (x,y,z), dans notre cas on s'intéresse à l'axe x seulement , alors on utilise un seul régulateur PID pour l'angle ( $\theta$ ).

. Le rôle du contrôleur PID est de fournir la commande adéquate aux différents moteurs, en fonction d'attitude du bicoptère (calculée par les retours capteurs) et les consignes exigées.

- **Action proportionnelle P** : C'est le facteur le plus important, il permet de définir le niveau de correction. Pour le régler, on augmente la valeur de P en prenant un faible I jusqu'à obtenir des vibrations. Finalement on retient la valeur de P avant apparition de vibration [50].
- **Action intégral I** : Le bicoptère glisse naturellement sur un seul axe selon la dernière consigne, c'est là qu'intervient le terme intégral. C'est à dire quand on a une erreur qui est faible et qui dure dans le temps. Pour régler ce paramètre on augmente la valeur de I jusqu'à avoir un comportement stable du bicoptère. Plus le terme I est grand plus on a un comportement lent du robot volant, donc il sera moins réactif [50].
- **Action dérivée D** : Ce terme est diminué pour adoucir les réactions du bicoptère, si par contre on veut avoir un comportement nerveux du robot on augmente sa valeur. Dans le cas où on augmente trop le D, on peut avoir le même effet que d'augmenter P, on retrouve des vibrations [50].

Dans cette partie on intéresse à l'implémentation numérique d'une commande. Le régulateur analogique PID, est remplacé par un algorithme numérique sur l'Arduino. Le signal de commande du régulateur *PID* analogique est donné, en variables écarts, par :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Temps continu(analogique)

$$U[n] = K_p e[n] + K_i \sum_{k=0}^n e[k]T + K_d \frac{e[n] - e[n-1]}{T}$$

Temps discret(digital)

Tel que T est la période d'échantillonnage.

Le régulateur PID numérique donne, par son mode de travail discret, une qualité de régulation inférieure à celle du régulateur analogique. Il est donc normal de vouloir choisir la période d'échantillonnage T aussi petite que possible afin d'approximer au mieux la commande analogique. Il y a cependant, dans la pratique, d'autres facteurs qui influencent ce choix :

- **Temps de calcul**

Si la période d'échantillonnage est très petite, le microprocesseur passe la majeure partie de son temps à servir l'interface et à calculer le signal de commande. Cela est peu souhaitable, surtout si le processeur doit servir plusieurs boucles simultanément.

- **Dynamique du processus**

La période d'échantillonnage doit s'adapter au processus. Si celui-ci est lent, comme c'est généralement le cas pour les applications chimiques, il n'y a aucun avantage à échantillonner rapidement. D'autre part, il est dangereux d'échantillonner trop rapidement lorsqu'un signal change lentement car l'effet de quantification devient relativement important.

- **Instrument de mesure**

Certains capteurs ne permettent que des mesures intermittentes (par exemple, un chromatographe en phase gazeuse ne livre une mesure que toutes les 2-3 minutes).

- **Spectre de perturbations**

Il est dangereux d'échantillonner de manière peu fréquente, car cela peut provoquer l'apparition de signaux numériques factices (alias) de basses fréquences. Il est recommandé d'utiliser une fréquence d'échantillonnage environ cinq fois plus grande que la plus haute fréquence contenue dans le signal de mesure. Donc, si des perturbations hautes fréquences sont

présentes, il est nécessaire de filtrer les signaux de façon analogique avant le convertisseur A/N (avec un filtre de garde).

Notre programme est à la base d' « Arduinoc », l'interface de programmation Arduino se compose d'au moins deux parties :

- 1- void setup : qui est chargée de l'initialisation tel que : les déclarations, des modes des broches (entrée /sorties), initialisation Mpu6050, les déclarations Rx et Tx reliés aux module NRF , etc..., et elle ne sera
- 2- Void loop : c'est la partie de fonctionnement, elle sera exécutée en boucle fermée pour effectuer des tâches bien déterminées afin de gérer le système à travers les broches d'entrées/sorties du module Arduino, (lire l'état du système à travers les broches

#### IV.3.2.2. Les tests sur le bicoptère

Premièrement, nous allons faire des tets sur un bicoptère, Ce dernier est un bras contenant :

- Deux moteurs à ces deux extrémités et deux ESC pour Controller les moteurs.
- Un module MPU 6050 sera positionné au milieu de ce bras pour mesurer les variations de l'angle  $\theta$  qui représente l'angle de rotation selon l'axe y.

##### 1) Test avec un régulateur proportionnel

L'objectif de ce premier test est :

- Trouver les paramètres optimaux du régulateur qui assure la stabilité de bicoptère

Nous allons d'abord commencer par un régulateur proportionnel dont la valeur du gain est égale à 5.

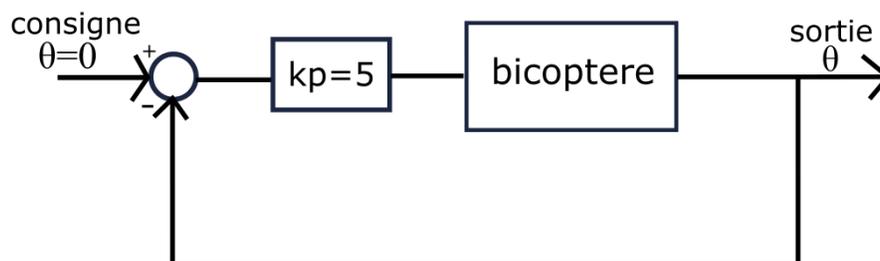


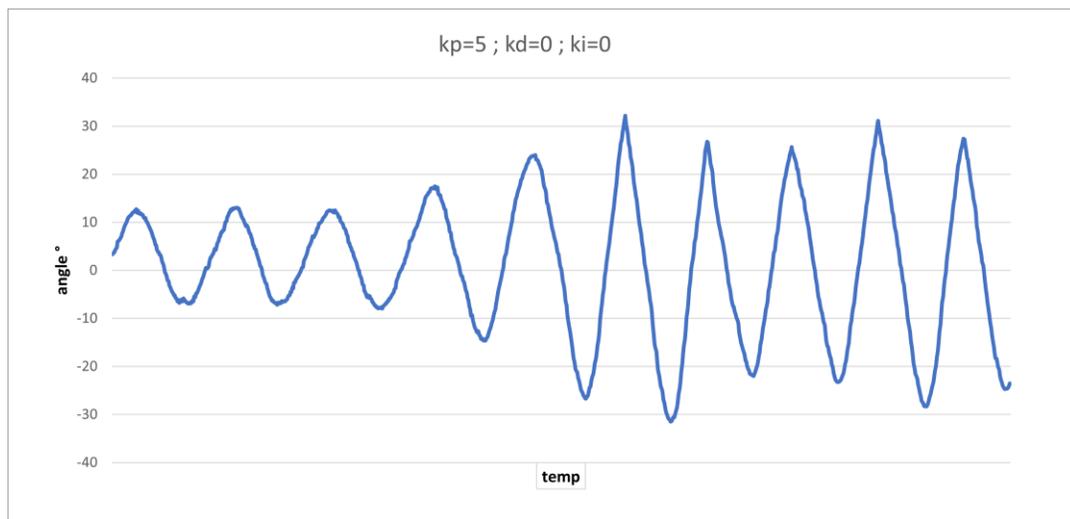
Figure IV.14: Schéma fonctionnel du bicoptère avec un régulateur proportionnel  $k_p = 5$ .

## Résultats obtenus

La figure suivante montre la variation de l'angle  $\theta$  en fonction du temps, avec un régulateur type proportionnel avec  $k_p = 5$ .

D'après la figure ci-dessous, nous constatons que :

- L'allure présente des oscillations fortes et rapides ce qui signifie que la réponse est instable.
- L'action proportionnelle est insuffisante pour satisfaire la stabilité de notre système.

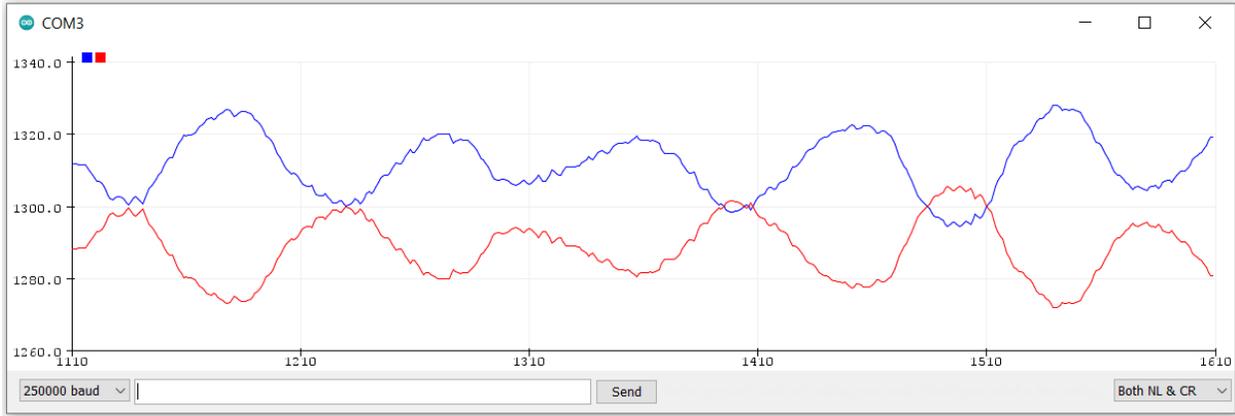


**Figure IV.15:** La variation de l'angle  $\theta$  en fonction du temps avec  $k_p = 5$

La figure suivante montre la variation de la vitesse des deux moteurs en fonction du temps avec lors de l'utilisation du régulateur proportionnel ( $k_p = 5$ )

D'après ces courbes nous constatons que les vitesses des deux moteurs présentent des variations sous forme d'oscillations fortes et rapides. Ils prennent des valeurs entre 1270 et 1330 qui sont des paramètres que nous avons définis comme les valeurs minimales et maximales de la vitesse.

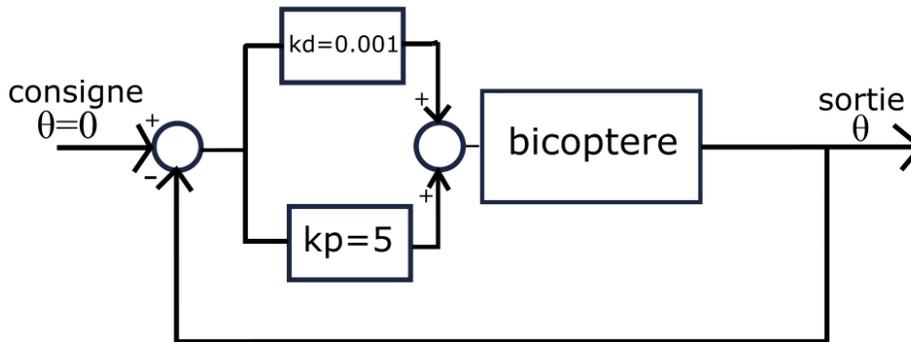
Donc, d'après les résultats de cet essai, nous constatons que l'action proportionnelle est insuffisante pour satisfaire la stabilité de notre système



**Figure IV.16:** La variation de la vitesse des moteurs en fonction du temps avec  $k_p = 5$ .

## 2) Test avec un régulateur proportionnel dérivé

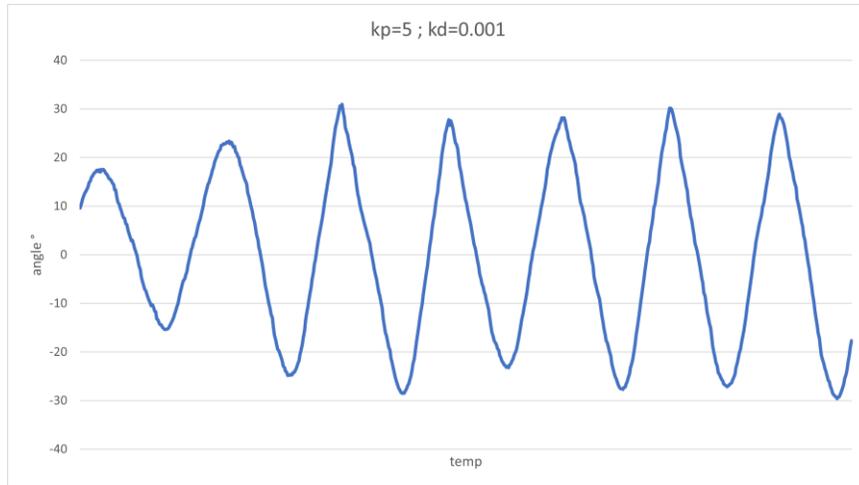
Nous allons effectuer ce test avec régulateur proportionnel dérivé comme le montre la figure suivante :



**Figure IV.17:** Schéma fonctionnel du bicoptère avec un régulateur  $k_p = 5$ ,  $k_d = 0.001$ .

## Résultats obtenus

La figure suivante montre la variation de l'angle  $\theta$  en fonction du temps. Elle représente la réponse du système lors de l'utilisation d'un régulateur proportionnel dérivé dont les valeurs de gains proportionnelle est égale à 5 et la dérivée est égales à 0.001.

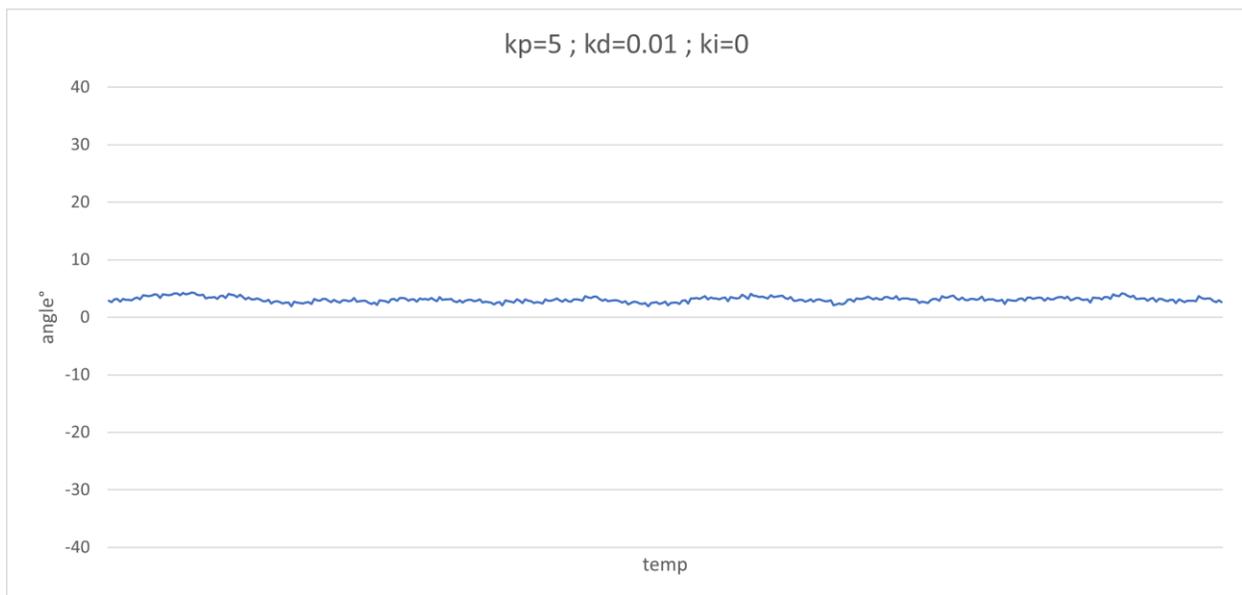


**Figure IV.18:** La variation de l'angle  $\theta$  en fonction du temps avec  $k_p = 5$  et  $k_d = 0.001$ .

D'après l'allure de la figure, nous constatons que le système est toujours instable, mais moins rapide par rapport au cas précédent.

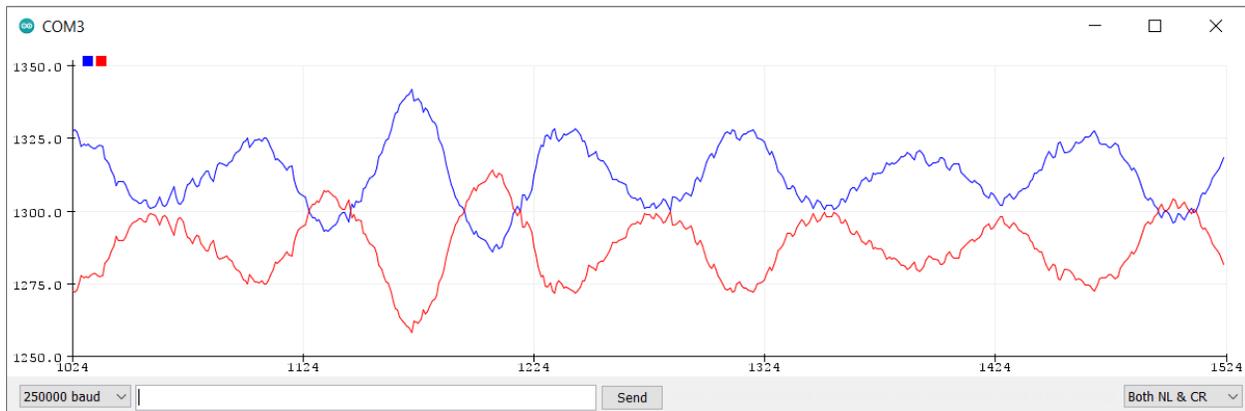
Donc la valeur de gain dérivé est insuffisante pour intervenir à la stabilité de notre système.

Dans ce qui suit nous augmentons la valeur de gain dérivé petit à petit jusqu'à l'obtention d'une réponse satisfaisante :



**Figure IV.19:** La variation de l'angle  $\theta$  en fonction du temps avec  $k_p = 5$ ,  $k_d = 0.01$ ,  $k_i = 0$ .

- La réponse obtenue montre des caractéristiques améliorées par rapport au cas précédent.
- L'ajout de l'action dérivé à permet de diminuer l'erreur dynamique et les oscillations d'une façon remarquable.
- L'allure de l'angle présente une stabilité avec une erreur statique de  $3^\circ$  et des oscillations autour de ce point variant entre  $[2^\circ ; 4^\circ]$ .

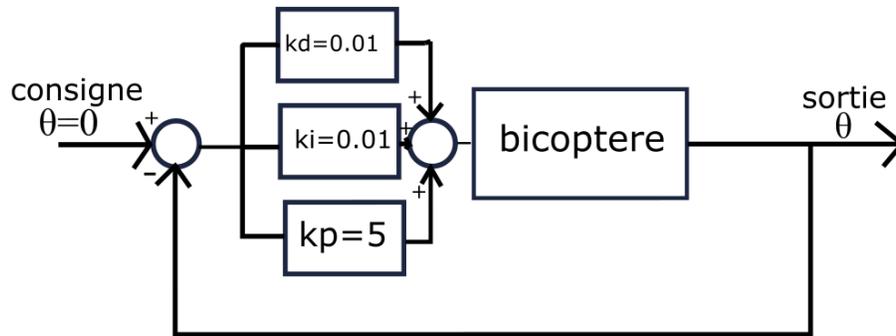


**Figure IV.20:** La variation de la vitesse des moteurs en fonction du temps avec  $k_p = 5$ ,  $k_d = 0.01$  et  $k_i = 0$ .

- Nous constatons que la vitesse du moteur 1 représentés en bleu est plus élevée que celle de moteur 2 représentée en orange, ce qui explique l'erreur statique déterminé dans la figure précédente présentée.
- Ces résultats restent insuffisants pour satisfaire la stabilité du bras. Pour cela l'utilisation de l'action intégrale du régulateur est nécessaire .

### 3) Test avec un régulateur proportionnel intégrale dérivé

La figure suivante montre le schéma fonctionnel de bicoptère commandé par un régulateur proportionnel intégrale dérivé :

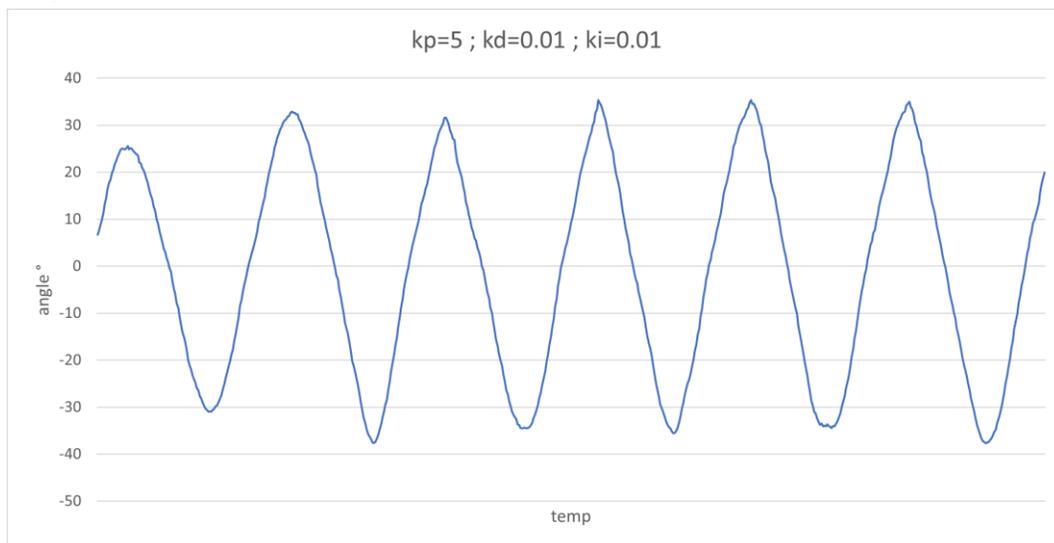


**Figure IV.21:** Schéma fonctionnel montrant les paramètres du régulateur PID

### Résultats obtenus

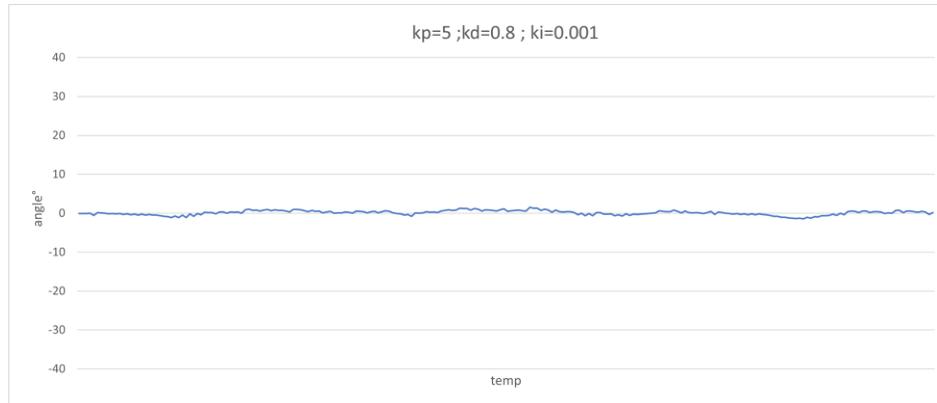
La figure suivante représente la variation de l'angle  $\theta$  en fonction du temps en utilisant un régulateur PID dont les valeurs des gains  $K_p$ ,  $k_d$  et  $k_i$  sont respectivement 5 , 0.01 et 0.01.

Nous constatons que lors de l'ajout de l'action intégrale, le système est redevenu instable avec des oscillations qui varient dans la plage  $[-38^\circ ; 38^\circ]$ . Ceci est dû à la valeur du gain  $K_i$  utilisée qui très importante.

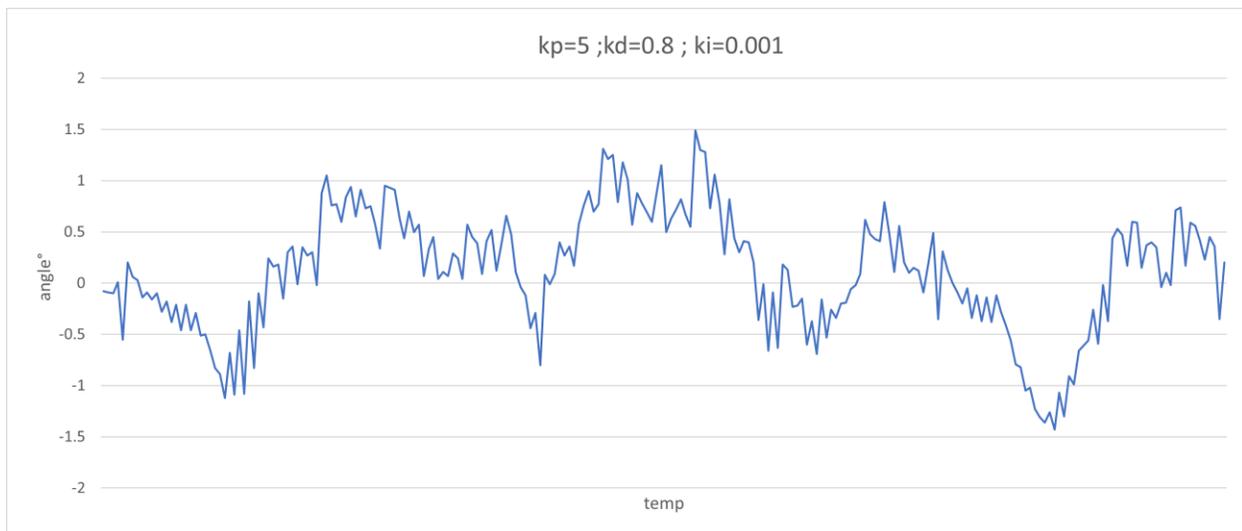


**Figure IV.22:** La variation de l'angle  $\theta$  en fonction du temps avec  $k_p = 5$ ,  $k_d = 0.01$  et  $k_i = 0.01$ .

Nous diminuerons la valeur de gain  $k_i$  et augment le gain  $k_d$  pour obtenir des résultats satisfaisants :



**Figure IV.23:** La variation de l'angle  $\theta$  en fonction du temps avec  $k_p = 3, k_d = 0.8$  et  $k_i = 0.001$ .



**Figure IV.24:** Partie de la courbe de variation de l'angle  $\theta$  en fonction du temps après la stabilité avec  $k_p = 5, k_d = 0.8$  et  $k_i = 0.001$ .

D'après le tracé nous constatons que le système est plus stable par rapport aux cas précédents avec une erreur statique presque nulle, un temps de réponses de (3 s), des oscillations qui varient dans la plage  $[-1.4; 1.5]$ , et un dépassement élevé de  $30^\circ$ .

La réduction de l'erreur statique et de temps de réponse est dû à l'utilisation de l'action intégrale avec une valeur convenable.

Cette réponse est très satisfaisante et garanti la stabilité de notre système.

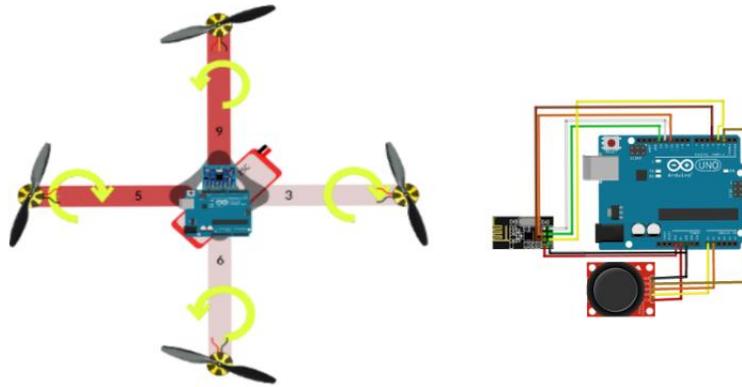
### **IV.3.3 Troisième expérience**

Cette expérience est la dernière étape, qui est la conception de notre drone avec la commande RF, Pour se faire :

- Nous commençons par assembler notre châssis avec tous les composants électroniques dans nous aurons besoin.
- Assembler les composants de notre commande RF (deux joysticks, Arduino UNO, NRF).
- Calibrer nos composants (MPU 6050 et les ESC).
- Implémenter les programmes dans les deux Arduino.
- Utiliser les mêmes paramètres de l'axe des X dans l'axe des Y et l'axe des Z.
- Effectuer notre premier essaies.

#### **Les composants nécessaires**

- 1 Chassais f450.
- 4 Moteurs brushless 2212 1000KV.
- 4 Hélices 10×45.
- 4 Contrôleurs de vitesse électrique 30A.
- 1 Batterie Li Po 3300mAh 11.1V 25C.
- 1 carte de distribution.
- 1 MPU 6050.
- 2 Cartes Arduino Uno avec deux câbles USB.
- Des files pour le branchement.
- 1 NRF
- 2 joysticks



**Figure IV.25:** Le montage de la troisième expérience.

Lors des tests de vol, nous avons perdu deux hélices et deux ESC, la cause principale de la chute du quadcoptère sont les données incorrectes reçues de capteur gyroscopique MPU-6050, alors nous avons recalibrer le MPU, le retard dans l'arrivé des composants (ESC, les hélices) nous a obligé d'arrêté les tests.

#### **IV.4 Conclusion**

Le système volant parmi les systèmes complexe difficile à réaliser à cause de ses mouvements en espace, dans lequel plusieurs obstacles qui peuvent être empêché la direction et la stabilité correcte de système. Tout ce que nous avons vu dans ce chapitre c'est une réalisation pratique d'un quadcoptère radiocommandé à base d'un Arduino et des tests réels avec un discussion des résultats où ce genre de projet se base principalement sur les deux côtés, matériel et programmation.

# *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

Avec l'essor fulgurant des UAV, et des avions à décollage et atterrissage vertical qu'on a observé cette dernière décennie dont le quadricoptère est l'exemple le plus répandu, vient la nécessité d'instruments discrets et légers.

Et c'est pour apporter ma pierre à cet édifice, que m'est venue toute ma motivation, pour mener à bien ce travail de recherche

L'objectif principal de ce travail était de réaliser un drone de type quadricoptère à base d'un Arduino commandable à distance par une télé-commande radio fréquence.

Dans un premier temps nous avons effectué une petite recherche sur les différents types de drones existants ainsi que l'histoire de leur évolution. Par la suite, une présentation de tous les composants constituant un drone quadrirotor ainsi que les mouvements qui gouvernent le fonctionnement de ce dernier dans l'aéronautique sont discutés.

Dans un second temps, nous avons proposé une modélisation, basée sur les lois de la cinématique (Newton-Euler), ainsi que l'élaboration du modèle du quadricoptère sous Simulink de MATLAB. Et dans le but de commander ce dernier nous avons proposé de le faire en utilisant le contrôleur PID, les résultats de simulation du modèle avec la partie commande proposée montrent que l'introduction des trois actions proportion, l'intégration, la dérivation, offre des performances très satisfaisantes en termes de temps de montée de dépassement max et l'erreur en régime permanent.

Dans la dernière partie nous avons commencé la réalisation d'un quadricoptère par des tests séparés de chaque composant, ceci dans le but de déterminer les caractéristiques principales de chaque composant. Par la suite nous avons réalisé un bi-coptère et obtenu les paramètres qui assurent la stabilité et l'équilibre de ce dernier. Lors des tests sur le quadricoptère on a perdu des composants (les hélices, ESC) ceci nous a obligé d'arrêter les tests car leur remplacement nécessite l'achat des composants effectués et la livraison nécessite du temps.

Au terme de ce projet, nous pouvons dire que nous avons touché à un nouveau domaine où l'automatique intervient de plus en plus j'ai cité l'aéronautique (drones).

Ce projet couvre un grand nombre de domaines :

- La partie hardware : nous avons utilisé une carte de commande Arduino, qui se caractérise essentiellement par la programmation directe par un PC sans un programmeur, pour la commande de 4 moteurs brushless de 1000 KV par des variateurs (ESC), commander à distance par un NRF, et ces composants sont montés sur le châssis du quadricoptère et la commande RF.

- La partie software : nous avons utilisé le langage C pour la réalisation de notre programme après la configuration de logiciel IDE et des autres modules annexes, et nous avons utilisé le Matlab et le Simulink pour élaborer notre modèle

Ce travail exige la maîtrise de plusieurs notions techniques aussi bien le domaine électronique et celui de l'informatique.

Le côté pratique de ce travail, nous a permis d'apprendre beaucoup sur les composants électroniques et leur programmation, surtout l'importance des microcontrôleurs pour la commande des systèmes et apprécié leur disponibilité ainsi que leur faible coût. Les cartes de circuit imprimé comme Arduino, qui sont faciles à utiliser et qui rendent le travail de la construction de circuits plus facile et beaucoup plus agréable.

Parmi les difficultés majeures qu'on a trouvées dans notre projet et inhérentes à ce genre d'applications :

- L'atténuation des vibrations de la centrale inertielle.
- L'amélioration des estimations des capteurs.
- L'absence de matériel nécessaire.
- Le travail sur un projet des drones nécessite des connaissances considérables en mathématiques et physiques.

# **Références bibliographiques**

## **Références bibliographiques**

- [1]. Getzin S., Wiegand K., and Schöniingn ‘Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles’ *Methods Ecol.* **32397404** I.2012
- [2]. Reg Austin ‘Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment’ 2010
- [3]. Jérôme de Lespinois ‘L’évolution de la guerre aérienne à travers les aventures de Buck Danny’ 2017/2 (N° 115)
- [4]. SJ Zaloga ‘Unmanned aerial vehicles: robotic air warfare’ 1917–2007
- [5]. La décision politique dans les engagements militaires de la France *cairn.info*. [En ligne] novembre 2013. <https://www.cairn.info/revue-etudes-2013-11-page-439.html>.
- [6]. towahaSyedomar faruk ‘Building smart drones with ESP8266 and arduino’ mumbai, Packt Publishing Ltd., February 2018. (ISBN 978-1-78847-751-2) .
- [7]. Redoune Mr. Ayad : ‘Conception et réalisation d’un drone quadrotor’ . université des sciences et technologie d’oran, s.n., 2009-2010.
- [8]. directindustry. [En ligne] directindustry, january 2019. <https://guide.directindustry.com/fr/bien-choisir-un-drone/>.
- [9]. American Journal of Engineering Research (AJER)  
e-ISSN: 2320-0847 p-ISSN: 2320-0936 Volume-6, Issue-7, pp-36-41
- [10]. Stefano MONTEMURRO ‘Quadcopter HOSM Control on PX4 Firmware Architecture’ – 10560265 2020-2021
- [11]. BACHA Aymene et BOUDERBALI Moncef : « Conception et commande d’un drone quadrotor à base d’arduino et réalisation d’un prototype ». UNIVERSITE M’HAMED BOUGARA-BOUMERDES 2020/2021.
- [12]. Jérôme legranger : « Contribution à l’étude des machine brushless à haut rendement dans les applications de moteur-générateurs embarqués ». Université de Lille. Service commun de la documentation. Bibliothèque universitaire de Sciences Humaines et Sociales.
- [13]. Bertrand Nogarède : « étude de moteurs sans encoches à aimants permanents de forte puissance à basse vitesse ». Université de Lille. Service commun de la documentation. Bibliothèque universitaire de Sciences Humaines et Sociales.

- [14]. EL-PRO-CUS: « What is Electronic Speed Control (ESC) & Its Working ».  
<https://www.elprocus.com/electronic-speed-control-esc-working-applications/>
- [15]. afcadillac.net : « Composition d'un drone ».  
[http://www.afcadillac.net/\\_serveurs/drone/composition\\_dun\\_drone.html](http://www.afcadillac.net/_serveurs/drone/composition_dun_drone.html)
- [16]. studiosport.fr : « Quel type de batterie pour une utilisation optimale de votre drone ? ».  
<https://www.studiosport.fr/guides/drones/batteries-de-drones-types-et-performances.html>
- [17]. Manan Mehta 'ESP 8266: A BREAKTHROUGH IN WIRELESS SENSOR NETWORKS AND INTERNET OF THINGS' 2015 Article ID: IJECET\_06\_08\_002
- [18]. João Mesquita, Diana Guimarães, Carlos Pereira, 'Assessing the ESP8266 WiFi module for the Internet of Things' 2018
- [19]. InvenSense Inc : « MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 ».  
Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013.
- [20]. C. Delmotte : « La thermographie infrarouge », Laboratoire Qualité de l'Air et Ventilation CSTC - Centre Scientifique et Technique de la Construction.
- [21]. H. González-Jorge, J. Martínez-Sánchez, M, Bueno: « Unmanned aerial systems for civil applications: A review », Drones, 1, p.2, 2017.
- [22]. K.M. Zemalache : « Commande d'un système sous-actionné : Application à un drone à Quatre Hélices ». Thèse de Doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne, France, 2005.
- [23]. É. Finoki : « Commande de vol non linéaire d'un drone à voilure fixe par la méthode du backstepping, thèse de maîtrise en génie concentration génie aérospatiale ». École de technologie supérieur université de Québec.
- [24]. Passion Electronic: « Tutorial NRF24L01 Arduino ».  
<https://passionelectronique.fr/tutorial-nrf24l01/>
- [25]. Derek B. Kingston and Randal W. Beard: « Real-Time Attitude and Position Estimation for Small UAVs Using Low-Cost Sensors ». American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2004.
- [26]. Locoduino : « Les entrées sorties de l'Arduino ».  
[https://www.locoduino.org/spip.php?article57#:~:text=Entr%C3%A9es%2Dsorties%20num%C3%A9riques%20de%20l,communication%20s%C3%A9rie%20\(en%20rouge\).](https://www.locoduino.org/spip.php?article57#:~:text=Entr%C3%A9es%2Dsorties%20num%C3%A9riques%20de%20l,communication%20s%C3%A9rie%20(en%20rouge).)
- [27]. A. Chriette. Drones autonomes : « Définition et Classification. ». École Centrale de Nantes à Département Autoâ Robot, 2012.

- [28]. M.R. Bourki, I. Benabid : « Conception et réalisation d'un drone Quadrirotor à base d'Arduino méga piloté par une radiocommande ». Mémoire de fin d'études, INSPF BATNA.2010.
- [29]. Vaishnavi, P.; Agnishwar, J.; Padmanathan, K.; Umashankar, S.; Preethika, T.; Annapoorani, S.; Subash, M.; Aruloli, K. Artificial Intelligence and Drones to Combat COVID-19. ResearchGate **2020**. pre-print. [CrossRef]
- [30]. Mbunge, E.; Chitungo, I.; Dzinamarira, T. Unbundling the Significance of Cognitive Robots and Drones deployed to tackle COVID-19 pandemic: A rapid review to unpack emerging opportunities to improve healthcare in sub-Saharan Africa. Cogn. Robot. **2021**, 1, 205–213. [CrossRef]
- [31]. Miranda, V.R.F.; Rezende, A.M.C.; Rocha, T.L.; Azpúrua, H.; Pimenta, L.C.A.; Freitas, G.M. Autonomous Navigation System for a Delivery Drone. J. Control. Autom. Electr. Syst. **2021**, 2021. 33, 141–155. [CrossRef]
- [32]. Çetin-Kaya, Y.; Kaya, M.; Akdag, A. Route Optimization for Medication Delivery of Covid-19 Patients with Drones. J. Sci. Part C Des. Technol. **2021**, 9, 478–491. Available online: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1744177> (accessed on 28 August 2021).
- [33]. Kunovjanek, M.; Wankmüller, C. Containing the COVID-19 pandemic with drones— Feasibility of a drone enabled back-up transport system. Transp. Policy **2021**, 106, 141–152. [CrossRef]
- [34]. Alsarhan, A.; Almalkawi, I.T.; Kilani, Y. A New COVID-19 Tracing Approach using Machine Learning and Drones Enabled Wireless Network. Int. J. Interact. Mob. Technol. **2021**, 15, 111–126. [CrossRef]
- [35]. Butt, U.J.; Richardson, W.; Abbod, M.; Agbo, H.M.; Eghan, C. The deployment of autonomous drones during the COVID-19 pandemic. In Cybersecurity, Privacy and Freedom Protection in the Connected World: Advanced Sciences and Technologies for Security Applications; Jahankhani, H., Jamal, A., Lawson, S., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2021. [CrossRef]
- [36]. M. Krstić, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotović: « Nonlinear and Adaptive Control Design ». Wiley-Interscience Publication, 1995.

- [37]. Kumar, A.; Sharma, K.; Singh, H.; Naugriya, S.G.; Gill, S.S.; Buyya, R. A drone-based networked system and methods for combating coronavirus disease (COVID-19) pandemic. *Future Gener. Comput. Syst.* **2021**, *115*, 1–19. [CrossRef]
- [38]. Kumar, A.; ElSersy, M.; Darwsih, A.; Hassanien, A.E. Drones combat COVID-19 epidemic: Innovating and monitoring approach. In *Digital Transformation and Emerging Technologies for Fighting COVID-19 Pandemic: Innovative Approaches; Studies in Systems, Decision and Control*; Springer: Cham, Switzerland, 2021; Volume 322, pp. 175–188. [CrossRef]
- [39]. Alsamhi, S.H.; Lee, B.; Guizani, M.; Kumar, N.; Qiao, Y.; Liu, X. Blockchain for decentralized multi-drone to combat COVID-19 and future pandemics: Framework and proposed solutions. *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.* **2021**, *32*, e4255. [CrossRef]
- [40]. González-Jorge, H.; González-deSantos, L.M.; Fariñas-Álvarez, N.; Martínez-Sánchez, J.; Navarro-Medina, F. Operational Study of Drone Spraying Application for the Disinfection of Surfaces against the COVID-19 Pandemic. *Drones* **2021**, *5*, 18. [CrossRef]
- [41]. Restás, Á.; Szalkai, I.; Óvári, G. Drone Application for Spraying Disinfection Liquid Fighting against the COVID-19 Pandemic— Examining Drone-Related Parameters Influencing Effectiveness. *Drones* **2021**, *5*, 58. [CrossRef]
- [42]. S. Bertrand. *Commande de drone miniature à voilure tournante. Automatique / Robotique*. Université Nice Sophia Antipolis, 2007. Français. (tel-00702441)
- [43]. Nascimento, T.P. and Saska, M., "Position and attitude control of multi-rotor aerial vehicles: A survey". *Annual Reviews in Control*, 48, pp.129-146, 2019
- [44]. Dahmani, Sara Bennour, Marouane "Modélisation, commande et fabrication d'un drone quadrirotor " 2020
- [45]. Saad Maarouf "Mémoire présenté à l'École de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise avec mémoire en génie mécanique" 2016-2018
- [46]. Laouadi, Omar ZERROUKI, Nadjib KHADRAOUI, Amar « Modélisation, conception et réalisation d'un quadri-rotor » Université Oum El Bouaghi 2021
- [47]. Adnan Martini. *Modélisation et commande de vol d'un hélicoptère drone soumis à une rafale de vent*. Autre. Université Paul Verlaine - Metz, 2008. Français. (NNT : 2008METZ015S). (tel-01752579)

- [48]. Generation robots “gyroscope et accelerometer 3 axes”  
<https://www.generationrobots.com/fr/402159-gyroscope-et-accelerometre-3-axes-mpu-6050.html>
- [49]. edu.dz “bitstream/handle”  
<http://archives.umc.edu.dz/bitstream/handle/123456789/12327/FER5538.pdf?sequence=1>
- [50]. [Mahony, R., Kumar, V., & Corke, P: « *Multicopter aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor* ». IEEE Robotics and Automation magazine, 19(3), 20-32, 2012.].