

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En commande électrique

Présenté par

DEBBAR Sara

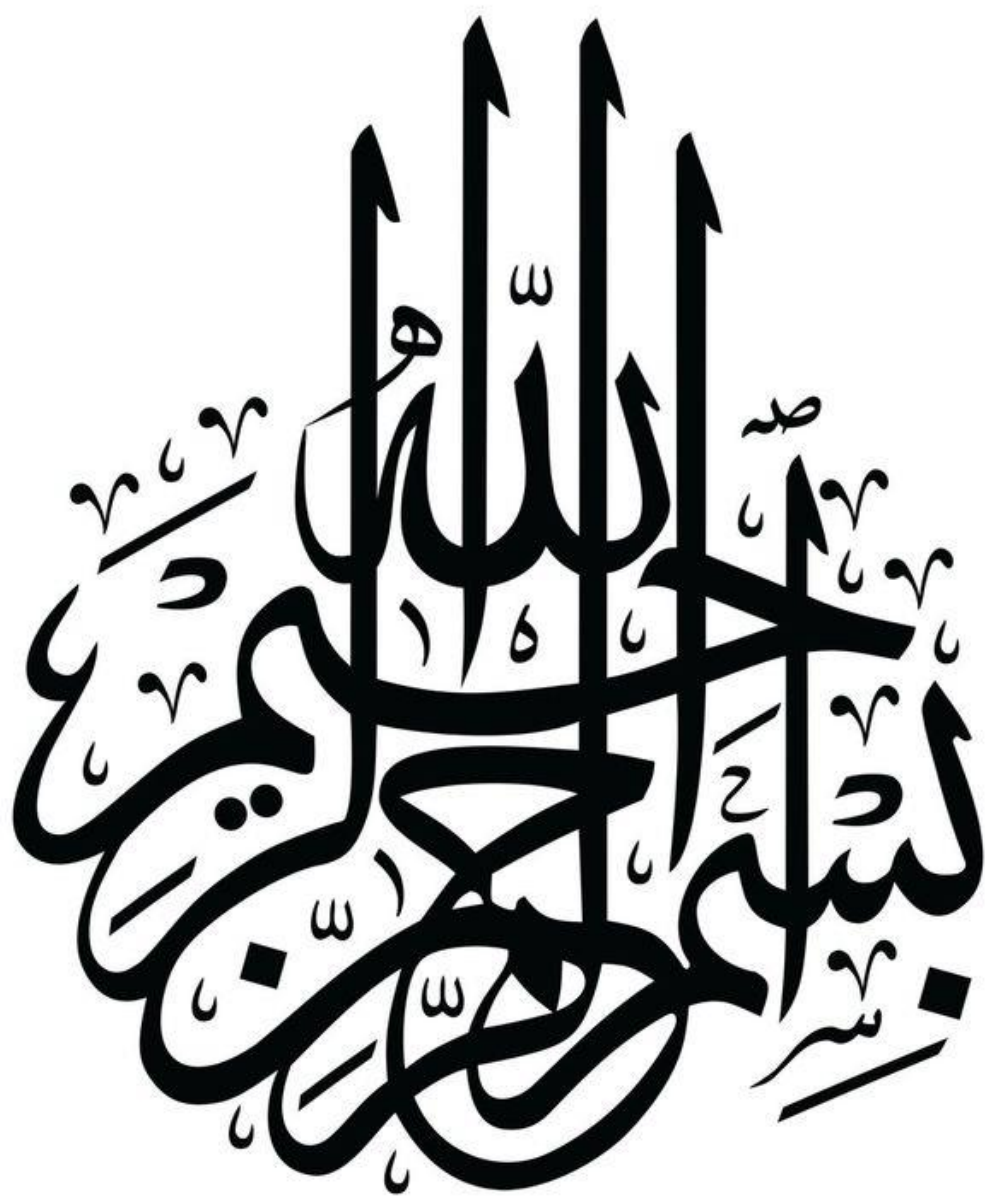
Thème

Réalisation et Etude de la Stabilité d'un Drone Quadrirotor

Soutenu le 02/06/2023. Devant le jury composé de :

Dr.	Maitre de conférences A	Président
Pr. BESSOUS Nouredine	Professeur	Rapporteur
Dr.	Maitre de conférences A	Examineur

Année Universitaire 2023/2024



Remerciements

الحمد لله الذي وفقني لإتمام هذا العمل، والصلاة والسلام على خير خلق الله محمد صلى الله عليه وسلم.

أتوجه بخالص الشكر والامتنان إلى الأستاذ نور الدين بسوس على دعمه المستمر، وتشجيعه لي خلال هذه الرحلة الأكاديمية لقد كان لنصائحه القيمة وتوجيهاته الدقيقة الأثر الكبير في تحقيق هذا الإنجاز. شكراً لك أستاذي على كل ما قدمته لي من علم ومعرفة.

كما أعبر عن شكري وامتناني العميق للأستاذ خالد بقوزة على وقوفه بجانبني طوال فترة إعداد هذا البحث. لقد كانت إرشاداته ونقده البناء مصدر إلهام ودافع لتطوير هذا العمل. شكراً لك أستاذي على صبرك ودعمك المتواصل.

ولا أنسى أن أشكر أسرتي العزيزة على دعمها اللامحدود، وذلك الشخص الذي لطال ما كان سند لي وشجعني على المضي قدماً.

NB : Les étudiants ont toute la responsabilité de rédiger ce travail et d'avoir leurs résultats sous la supervision et les suggestions du comité de soutenance.

Dédicace

باسم الله وعلى بركات الله وصلاة والسلام على رسول الله.
أرفع قبعتي احتراماً لسنين مضت من الدراسة وقد ابتدأ الوداع
مع كل ابتسامه مع كل لقطة أخذت بدء الوداع، وفي البداية الشكر لله.

واهدي تخرجي وثمره تعبتي إلى من عشقها إلى نبض قلبي إلى من تستقبلني بابتسامه وتودعني بدعوة “امي
الغالية” اسأل الله ان يحفظها لي، وإلى سندي وحزام ظهري وأماني “أبي الغالي.”

إلى وطني وملاذ حياتي، وإلى من ساندوني ووقفوا معي إلى من احببتهم صديقاتي اخواني واخواتي

ملخص:

دراسة الطائرات بدون طيار هي مجال بحث نشط للغاية وحيوي في الوقت الحالي. الكوادر يوتر هو روبوت ينتمي إلى عائلة الروبوتات الجوية ويتميز بديناميات غير خطية بشكل كبير ومرتبطة بالكامل، مما يستدعي الحاجة إلى تحكم قوي ومستقر. يركز هذا العمل على تحقيق استقرار الكوادر يوتر. ولتحقيق هذا الهدف، تم تطوير نموذج ديناميكي للكوادر يوتر وفقًا للقانونين الفيزيائيين نيوتن وأويلر. ثم تم تطبيق نهج التحكم المبني على مُنظّم PI مدمج في بطاقة تكوين للكوادر يوتر لتحقيق الاستقرار. وقد تمت دراسة جميع جوانب الطائرة بدون طيار في هذه الدراسة، مثل اختيار المحركات والشفرات وأسلاك الاتصال والنظام الميكانيكي، وذلك بطريقة دقيقة.

كلمات مفتاحية: طائرة بدون طيار، كوادر يوتر، استقرار، مُنظّم PI، بطاقة KK2.1.5.

Résumé :

L'étude des véhicules aériens sans pilote est un domaine de recherche très actif et d'actualité. Le quadrirotor est un robot appartenant à la famille des robots aériens qui possède une dynamique fortement non linéaire et entièrement couplée, d'où le besoin d'un contrôle robuste et stable. Ce travail est centré d'avoir une stabilité d'un quadrirotor. Pour atteindre cet objectif, un modèle dynamique du quadrirotor selon Newton Euler a été développé. Ensuite, une approche de contrôle basée sur un régulateur PI intégrer dans une carte à configurer le quadrirotor afin d'avoir la stabilité. Cette étude a réalisé toutes les parties du drone comme le choix des moteurs, pales, fils de connexion, système mécanique, etc. d'une manière précise.

Mots-clés : Drone, Drone quadrirotor, Stabilisation, Régulateur PI, carte KK2.1.5.

Abstract:

The study of unmanned aerial vehicles is a highly active and topical research area. The quadrotor is a robot belonging to the family of aerial robots that exhibits highly nonlinear and fully coupled dynamics, necessitating the need for robust and stable control. This work focuses on achieving stability of a quadrotor. To achieve this goal, a dynamic model of the quadrotor based on Newton Euler was developed. Subsequently, a control approach based on a PI regulator integrated into a board to configure the quadrotor for stability was implemented. This study addressed all aspects of the drone, such as motor selection, blades, connection wires, mechanical system, etc., in a precise manner.

Keywords: Drone, Quadrotor Drone, Stabilization, PI Controller, KK2.1.5 Board.

Table des matières

Table des matières

Liste des figures	VIII
Liste des tableaux.....	XI
Liste des symboles et abréviations	XIII
Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l’art sur les drones	
I-1 Introduction	5
I-2 Définition d’un drone	5
I-3 Historique	6
I-4 Différents types de drones selon leur usage	9
I-4-1 Utilisation militaire des drones	10
I-4-2- Utilisation civile des drones	11
I-5 Avantages et des inconvénients des drones	12
I-5-1 Les avantages.....	12
I-5-1-1 Exécution de tâches dangereuses.....	12
I-5-1-2 Réduction des coûts.....	12
I-5-1-3 Facilité d'utilisation.....	12
I-5-2 Les inconvénients.....	12
I-5-2-1 Préoccupations concernant la vie privée.....	12
I-5-2-2 Problèmes de sécurité	13
I-5-2-3 Défis techniques.....	13
I-6 Perspectives d’utilisation	13
I-7 Conclusion.....	14
Chapitre II : Modélisation d’un drone	
II-1 Introduction.....	16
II-2 Le quadrirotor	16
II-3 Principe de fonctionnement	17
II-4 Description.....	18
II-5 Principe de vol d’un UAV	19
II-5-1 Les forces de vol.....	23
II-5-2 Mouvements d’un quadrirotor	23
II-6 Reperage du quadrirotor dans l'espace.....	25
II-6-1 Repères utilisés.....	25

II-6-2	Matrice de rotation	27
II-6-3	Vitesses de rotation.....	30
II-7	Modelisation dynamique du quadri-rotor.....	31
II-7-1	Effets physiques agissants sur le quadrirotor.....	31
II-7-1-1	Les forces.....	31
II-7-1-2	Les moments.....	32
II-7-1-3	Effets gyroscopiques.....	33
II-7-2	Modèle mathématique selon Newton-Euler.....	34
II-7-2-1	Equations de mouvement de translation.....	35
II-7-2-2	Equations de mouvement de rotation.....	35
II-7-3	La représentation d'état du système.....	37
II-8	Conclusion.....	38
 Chapitre III : Construction et programmation du drone		
III-1	Introduction.....	40
III-2	Liste des composants et materiel.....	40
III-2-1	Les moteurs brushless.....	40
III-2-2	Le variateur de vitesse ESC.....	42
III-2-3	Capteurs MPU6050.....	43
III-2-4	Rcremote.....	44
III-2-5	Batterie LiPo 2200 mAh / 35C / 3S.....	47
III-2-6	Le châssis F450.....	48
III-2-7	Prop 10X5X3.....	49
III.3.	Carte de contrôle de vol KK2.1.5 (Configuration)	50
III.3.1.	Configuration initiale du KK2.1.X déconnecté du multirotor.....	51
III.3.2.	Alimentation du KK2.1.X.....	52
III.3.3.	Configuration de la carte de vol KK2.1.5 Multi-Rotor.....	53
III.3.4.	Système de contrôle.....	54
III.4.	Configuration K.K 2.1.5.....	56
III.4.1.	Voici les étapes pour configurer une carte KK2.1.5 avec quatre moteurs dans une configuration en X.....	57
III.4.2	Prototype final du drone quadrirotor.....	62
III-4	Conclusion.....	62
Conclusion générale.....		64
Références.....		65

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur les drones	
Figure I.1. Premier drone.	7
Figure I.2. Différents modèles de drones classés par poids Adaptée de Wikipédia	10
Figure I.3. Utilisation des drones dans le secteur militaire	11
Figure I.4. Quelques domaines d'utilisation civile des drones.	12
Chapitre II : Modélisation d'un drone	
Figure II.1. Structure générale du quadrirotor.	17
Figure II.2. Configuration d'un drone quadrirotor.	18
Figure II.3. Sens de rotation des rotors.	18
Figure II.4. Axes des mouvements pour le quadrirotor.	21
Figure II.5. Différentes forces exercée sur le quadrirotor.	21
Figure II.6. Mouvements du drone quadrirotor.	24
Figure II.7. Repérage d'un quadrirotor.	26
Figure II.8. Rotation autour de l'axe X (Roulis).	27
Figure II.9. Rotation autour de l'axe Y (tangage).	28
Figure II.10. Rotation autour de l'axe Z (lacet).	29
Chapitre III : Construction et programmation du drone	
Figure III.1. Moteur à courant continu sans balai en phase.	41
Figure III.2. Variateur de vitesse ESC 30A.	42
Figure III.3. MPU6050	43
Figure III.4. RC remote	44
Figure III.5 Programmez la télécommande	46
Figure III.6 Batterie Lipo 2200 mAh / 35C/ 3S.	48
Figure III.7 Châssis quadrotor F450	49
Figure III.8 Prop 10X5X3.	50
Figure III.9 Carte de contrôle de vol KK2.1.5.	51
Figure III.10 kk2.1.5 Multi-Rotor control board.	55
Figure (III.11) : Écran principal du FCU KK 2.1.5	57
Figure (III.12) : Voici les étapes pour configurer une carte KK2.1.5 avec quatre moteurs dans une configuration en X	58
Figure (III.13) : Pour ajuster la direction de rotation des moteurs	59

Figure (III.14) : Dans le menu de l'éditeur PI et ajustement des valeurs PI de l'axe de l'aileron pour un vol stable	61
Figure (III.15) : Toutes les configurations et valeurs ont été ajustées correctement, et tous les paramètres ont été définis	61
Figure (III.16) : quadcopter	62

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I : Etat de l’art sur les drones	
Tableau I.1 Evènements des drones par an	8
Tableau I.2 Résumé des avantages et des désavantages du quadrirotor.	13
Tableau III.1 Caractéristique de SkyRC 2205-12 2400KV	41
Tableau III.2 Caractéristiques de variateur de vitesse ESC.	42
Tableau III.3 Caractéristiques de MPU 6050	44
Tableau III.4 caractéristiques de Rc remote	46
Tableau III.5 caractéristiques de Batterie LiPo 2200 mAh / 35C / 3S.	47
Tableau III.6 caractéristiques de châssis F450.	49
Tableau III.7 caractéristique de Prop 10X5X3.	50
Tableau (III.8) : Configuration de base de la carte KK2.1.5	53
Tableau (III.9) : caractéristique de Carte de contrôle de vol KK2.1.5	55

Liste des symboles et abréviations

Symboles et abréviations

UAV: Unmanned Aerial Vehicle.

MFs: Fonctions d'appartenance (Membership function) .

COG: Center Of Gravity.

SVD: Singular value decomposition(Décomposition en valeur singulière.)

SN: Normalisation de la Somme.

NN: Non Négativité. NO : Normalité.

PSG: Produit de somme de gravité

FLC : Contrôleur adaptatif par logique floue (Fuzzy logic controlor)

FAI : Fédération Aéronautique Internationale.

VTOL: Vertical Take-Off and Landing.

DDL : Degré De Liberté

EPFL : École Polytechnique Fédérale de Lausanne

DOF: Degree Of Liberty

PI: Proportionnel Intégrateur

SMC : Sliding Mode Control

SE3 : Special Euclidean 3

E-Frame : Earth Frame

B-Frame: Body Frame

AVR: Alf and Vegard's RISC

Atmel: Atmel Corporation

ATmega: Atmel megaAVR

Motor DC: Direct Current Motor

ESC: Electronic Speed Control

IMU: Inertial Measurement Unit

RC: Receiver Controller

PWM: Pulse Width Modulation

MEMS: Micro Electro Mechanical Systems

DMP: Data Movement Processor

NodeMCU: Node MicroController Unit

GPIO: General Purpose Input/Output
 ADC: Analog to Digital Converter
 SoC: System On Ship
 IDE: Integrated Development Environment
 UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter
 SPI: Serial Peripheral Interface
 VIN : Vehicle Identification Number
 I2C : Inter Circuit Communication
 SLAM : Simultaneous Localization And Mapping
 UAV : Véhicule Aérien Sans Pilote
 BLDC : Courant Continu Sans Balai
 P : Proportionnel
 MATLAB : Laboratoire de Matrices
 M-file : Fichier texte MATLAB
 ESC : Contrôleur de Vitesse Électronique
 GPS : Système de Positionnement Global
 3G : Réseau Mobile de Troisième Génération

R_0 : Le repère terrestre.

x, y, z : Coordonnées cartésiennes.

R : Matrice de rotation.

V : Vitesse linéaire.

P : Pesanteur.

d : Coefficient de drag.

J : Inertie du système.

$\square$: Le vecteur d'état.

K_p : gain proportionnel

K_i : gain intégrateur

K_d : gain proportionnel

ε : erreur statique

Introduction générale

Ces dernières années, les robots ont connu un développement remarquable, qui en a fait une nécessité absolue dans la vie quotidienne et pratique, où on le retrouve aujourd'hui dans divers domaines telle que la santé, l'armée, l'agriculteur, l'exploration ...etc. Ceci afin de remplacer les humains dans des opérations qui sont généralement répétitive et dangereuses. [Site web 02]

Un Drone ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) est un aéronef sans pilote humain à bord qui utilise les forces aérodynamiques pour produire un vol vertical : "Un drone ou un véhicule aérien sans pilote est un aéronef qui utilise les forces dynamiques pour produire un vol vertical. Il peut être contrôlé à distance, être autonome ou semi-autonome.". Il peut être piloté à distance, autonome ou semi autonome. Il est susceptible d'emporter différentes charges utiles, le rendant capable d'effectuer des tâches spécifiques, pendant une durée de vol qui peut varier en fonction de ses capacités. Le terme « drone » a souvent mauvaise dans la presse où il appartient à la famille des robots. Dans les médias, on l'associe aux frappes aériennes et à la guerre. Les drones sont cependant bien plus que des armes [Site web 04]. Ils sont utilisés par des milliers d'amateurs et de très nombreuses organisations dans le monde, pour les loisirs, la recherche, la préservation des espèces, l'agriculture et même pour sauver des vies. Il faut donc redorer le blason de ce terme afin que les gens commencent à comprendre tout son potentiel. [MOH 19]

D'un point de vue technique, beaucoup de gens définissent les drones comme des machines ayant la capacité de voler de manière entièrement autonome, du décollage jusqu'à l'atterrissage. Dans ces conditions, certains quadricoptères commercialisés aujourd'hui ne sont pas, techniquement parlant, des drones, mais plutôt des quadricoptères télécommandés. Bien qu'ils aient une certaine autonomie, ils ne peuvent pas complètement voler de façon indépendante, en décollant automatiquement, en parcourant une série de points de passage et en atterrissant ensuite sans assistance. De la même manière, beaucoup de soi-disant drones utilisés par les militaires sont en fait des appareils qui sont toujours pilotés à distance par un être humain. [Site web 05]

Les drones connaissent à l'heure actuelle un vif succès dans le monde civil aussi bien auprès des particuliers qu'auprès des professionnels. Le marché des drones est en pleine expansion et des applications de plus en plus variées voient le jour [Site web06]. Le défi principal reste toutefois un défi de type réglementaire dans les différents pays du globe. En effet, si les drones semblent

apporter de nombreuses solutions aussi originales les unes que les autres, il est important d'y apporter un cadre réglementaire structuré et adapté. Pour bien comprendre les spécificités du drone, nous avons orienté notre étude autour de celui-ci [Site web07].

Le développement et l'étude des systèmes de vol autonomes ont augmenté récemment en raison du nombre croissant d'applications des drones dans les domaines militaires et civils. L'incitation à l'investigation dans ce domaine est la nécessité de remplacer l'intervention humaine sur des travaux ou des missions à haut risque. [BEN21]

Il existe une très grande variété de drones. Néanmoins, ceux qui ont attiré beaucoup d'attention pour les projets d'investigation sont les drones quadrirotors. Ils ont longtemps été utilisés essentiellement pour des missions militaires. Un quadrirotor possède quatre rotors, chacun d'entre eux ayant une vitesse indépendante, ce qui permet une variation équilibrée de la vitesse des rotors et donc de générer la poussée et les accélérations dans les directions souhaitées. Un quadrirotor a six degrés de liberté, ce qui signifie qu'il peut se déplacer le long des trois axes spatiaux X, Y et Z. [BEN21]

Certains drones, essentiellement de petite taille, étaient cependant utilisés par les aéromodélistes. Au fil du temps, les progrès technologiques ont dopé les performances de ces aéronefs notamment des plus petits (d'un poids inférieur et souvent très inférieur à 25 kg) de même que celles des capteurs qu'ils peuvent héberger et ces engins ont depuis quelques années démontré leur aptitude à réaliser des missions civiles de nature très variée comme, par exemple, la réalisation de prises de vues aériennes, la surveillance d'ouvrages d'art ou d'infrastructures linéaires ou encore d'exploitations agricoles pour en optimiser la gestion. [Site web 08] L'utilisation commerciale de drones est aujourd'hui autorisée dans de nombreux pays qui ont mis en place des réglementations visant à limiter les risques associés à leur exploitation. Ces réglementations concernent essentiellement les drones de petite taille, télépilotés, évoluant à basse altitude. Au-delà de l'utilisation de petits drones dans des conditions somme toute très encadrée, on envisage d'utiliser à plus long terme des drones plus gros (de quelques dizaines, voire centaines de kilos) qui pourraient être insérés dans l'espace aérien au même titre que les aéronefs disposant de pilotes à bord. Ceux-ci seraient toujours télépilotés dans un premier temps mais pourraient au fil du temps être de plus en plus autonomes. [Site web 08]

Il est bien entendu postulé qu'une telle évolution ne saurait se faire que si la sécurité offerte dans l'espace aérien en place est préservée pour tous. Elle pose donc des défis techniques de taille

et de nombreux travaux sont aujourd'hui engagés dans le monde dans la perspective de cette intégration des drones civils dans l'espace aérien. Cette étude va essayer de résoudre quelques problèmes comme l'instabilité et le poids limité du drone et la durée d'aération et autres contraintes afin d'avoir un bon prototype [Site web 09].

L'objectif de ce mémoire est l'étude et la réalisation d'un drone quadrirotor. Il est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre nous présenterons une synthèse bibliographique sur les drones.

Le second chapitre est consacré à la modélisation d'un drone quadrirotor.

Le troisième chapitre exposera la réalisation et l'étude de la stabilité de celle-ci.

Nous terminons ainsi ce mémoire par une conclusion générale qui situe la valeur du travail accompli et donne un ensemble de propositions concernant les améliorations futures ainsi que les perspectives et orientations possibles de ce travail.

Chapitre I

Etat de l'art sur les drones

I.1. INTRODUCTION :

Les drones ou encore U.A.V (Unmanned Aerial Vehicle : Véhicule aérien sans pilote) sont des aéronefs sans pilote capables de faire des missions d'une façon plus ou moins autonome et automatique [BEN13]. Ils ont été conçus au début pour des missions purement militaires. Le mot « drone » est tiré du terme anglais et signifie « drone ». En français, le terme désigne les véhicules aériens, terrestres, nautiques ou sous-marins. Ils sont utilisés ensuite dans beaucoup d'applications civiles, telles que la photographie, l'exploration des endroits, la prospection et les missions de sauvetage [Site web 01]. Depuis le début de l'industrie aéronautique, le développement des véhicules aériens sans pilote (UAV) a remporté la victoire. Au départ, les applications militaires ont rendu les chercheurs principalement motivés par ce domaine. Pour cela, le but de ce travail est de donner un bref aperçu des principes de l'un de ces drones (appelés quadricoptères), puis d'introduire la synthèse et l'implémentation de commandes sur les quadricoptères actuels [MAC21].

Ce premier chapitre va définir les différents drones par une présentation qui donnera une synthèse bibliographique sur le sujet proposé. Ensuite, nous donnerons un aperçu sur les classifications du drone en citons les avantages et les inconvénients de celui-ci.

I.2. DEFINITION D'UN DRONE :

Les drones sont des aéronefs sans pilote c'est-à-dire c'est un avion qui ne porte pas d'opérateur humain à bord. Le terme « drone » est issu de la langue anglaise et signifie « faux bourdon ». Il désigne un système pilotable à distance, capable d'emporter une charge utile [Site web10].

Les drones appelés communément R.P.V (Remotely Piloted Vehicule) véhicule piloté à distance ou U.A.V (Unamanned Aerial Vehicle) : véhicule aérien sans pilote, ont connu un franc succès lors des conflits survenus au moyen orient lors des trois dernières décennies[BOU09]. Ceci a poussé tous les pays industrialisés à mettre au point, seuls ou en collaboration, des engins de ce type. Ils sont destinés essentiellement aux :

- Surveillance, reconnaissance et acquisition d'objectif ;
- Photos aériennes, inspections ;

- Activités gouvernementales (police, douanes, environnement, etc.). [Site web11]

Les drones utilisent des forces aérodynamiques pour fournir un ascenseur de véhicule, ils peuvent voler de façon autonome et être piloté à distance, ils peuvent être récupérables grâce à un système de navigation programmable et effectuer des vols dans des différents environnements, ils sont capables aussi de porter un camera de liaison de données, permettant la transmission directe des vidéos. Le vol des drones peut se fonctionner avec de différents degrés d'autonomie : soit sous contrôle à distance par un opérateur humain, soit par ordinateur embarqué de manière autonome [BEN13].

I.3. HISTORIQUE :

Afin d'apprécier pleinement l'histoire des drones, nous devons étudier l'histoire générale des avions sans pilote, qui a connu des développements parallèles à celle de l'aviation habitée dès le début des vols habités. L'histoire des drones a une face sombre, car ils ont souvent été utilisés comme des armes puissantes et ils le sont encore aujourd'hui [Site web12].

Cependant, les dernières applications civiles permettent de plus en plus souvent aux drones d'avoir des rôles positifs et d'être utilisés dans des sauvetages. Selon la façon dont vous définissez le mot « drone », vous pouvez soutenir que les engins volants sans pilote ont été employés dès 1849, quand des ballons équipés de bombes ont été utilisés par l'armée autrichienne lors d'une attaque sur Venise. Cependant, on admet plus communément que le premier vol d'un aéronef sans pilote remonte aux années 1890, quand Otto Lilienthal, un pionnier de l'aviation allemande, a expérimenté des planeurs sans pilote pour tester la conception d'ailes volantes légères. Comme pour de nombreuses conceptions pionnières d'avion expérimental, il n'y avait personne à bord afin de ne pas blesser les courageux pilotes d'essai [Site web13].

Cela a eu pour conséquence que Lilienthal a pu tester bon nombre de ses conceptions audacieuses en toute sécurité et tirer des enseignements des accidents. À la même époque, en 1896, Samuel Pierpont Langley expérimentait un avion à vapeur. Il est intéressant de noter que son avion était lancé en employant un système de catapulte, méthode encore utilisée par certains drones modernes.

L'avion de Langley sans pilote, qui n'était pas téléguidé et s'appelait « Aerodrome », réussissait juste à voler pendant un kilomètre le long du Potomac, dans le cadre d'un processus de test pour un avion habité. Bien que le projet ait été finalement abandonné, ce vol d'essai a

représenté quelque chose dans le monde de l'aviation car c'était le premier vol réussi d'un avion autopropulsé sur une distance relativement importante. Cette expérience a eu lieu plusieurs années avant le célèbre vol des frères Wright [Site web12].

Malgré les vols réussis d'aéronefs sans pilote, on s'est rapidement aperçu que disposer d'un pilote afin de contrôler l'avion était plus pratique pour faire progresser la conception et le développement des avions. Avoir des pilotes à bord était donc un risque qu'il fallait prendre [Site web12]. Le vol historique des frères Wright a enseigné au monde que l'on pouvait contrôler le vol en utilisant le gauchissement des ailes pour gérer le roulis de l'aéronef, et cette découverte a conduit à une avancée des progrès techniques de l'industrie aéronautique. Le succès des frères Wright a été le catalyseur qui a façonné la science l'aviation telle qu'elle est aujourd'hui. [Site web12]

Les drones dans l'histoire, ont vu leur intérêt augmenter au courant de la seconde guerre mondiale au vu de la nécessité d'avoir des appareils sans pilotes capables de réaliser des missions de reconnaissances et d'espionnage.



Figure (I.1) : Premier drone.

Dans les années 1960, l'arrivée de l'information a permis d'envisager des engins autonomes. Dans cette époque exactement les français ont réussi à développer les premiers drones européens grâce à la société « NORD-AVIATION » qui a développé le μ R20 dérivait de l'engin cible μ CT20 utilisait comme cible pour les avions de chasse ou les missiles destinaient à la surveillance des champs de bataille [MIL19]. Doté d'un programme de vols internes, ce drone a été mis en service au cours de la période 1966-1976, mais son principal problème est qu'il était insensible aux

brouillages [MIL19]. L'histoire de ce merveilleux appareil est très instructive et peut être résumée dans le tableau ci-dessous :

Tableau (I.1) : Evènements des drones par an [BEN13].

L'année	Evènement
1916	En Grande-Bretagne, ArchiballLow lance le premier projet d'un avion-cible sans pilote et radiocommandé
1951	L'avion-cible américain Ryan Firebee est le premier drone à réaction à être produit en masse
1990	Le Japon recourt à des drones pour des applications civiles : épandage et surveillance agricole.
1991	Lors de l'assaut en Irak, pour l'opération Desert Storm, des drones Pioneer effectuent plus de 530 sorties et l'un d'eux filme la reddition des troupes irakienne
1994	General Atomics introduit une nouvelle génération de drones militaires de longue autonomie avec le MQ-1 Predator.
1994	Les premiers drones sont dépêchés en Bosnie, le Fox AT-1 de CAC Systèmes et le Gnat 750 de General Atomics afin de réaliser des missions de surveillance
2002	20Les drones changent d'échelle avec le RQ-11 Raven d'AeroVironment, d'une longueur de 1,1 mètre. Il est propulsé par un moteur électrique mais se lance à la main.
2009	Des insurgés irakiens réussissent, via un logiciel russe, SkyGrabber, à intercepter des informations non cryptées d'un drone Predator.
2010	Le Parrot AR, drone piloté par un iPhone, est le premier succès grand public du domaine. Quelque 120.000 unités sont écoulées dans le monde en six mois.

I.4. DIFFERENTS TYPES DE DRONES SELON LEUR USAGE :

Le domaine des drones (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) est en constante évolution depuis les débuts de l'aviation. À l'origine, les recherches dans ce domaine étaient principalement motivées par des applications militaires. En effet, les drones étaient, et demeurent aujourd'hui, la meilleure solution pour éviter la perte de pilotes lors de missions dangereuses [Site web14]. Cependant, compte tenu des complexités additionnelles inhérentes aux drones, le développement de ce domaine s'est effectué plus lentement que pour les systèmes avec pilote. L'apparition de capteurs de plus en plus précis, l'augmentation constante de la puissance de calcul des processeurs ainsi que l'avancement des connaissances dans le domaine de l'aéronautique ont permis à cette tendance de s'inverser [KAM19].

En effet, le domaine des drones croît de manière exponentielle depuis le début des années 80. L'utilisation de drones est désormais monnaie courante dans plusieurs domaines d'applications telles que l'arpentage, la surveillance de pipeline et la photographie aérienne [Site web14]. Aussi, les drones sont désormais très connus du public spécialement depuis l'intensification de l'utilisation de drones militaires, tels que le désormais célèbre Predator, par l'armée américaine [Site web15]. Compte tenu du potentiel énorme des drones pour des applications civiles, un très grand nombre de compagnies concevant des drones civils sont apparues depuis les années 90 telles que, par exemple, Aeryon Labs et Aerodreams. En effet, pour la même application, les drones civils sont typiquement beaucoup moins volumineux que des véhicules avec pilote [Site web14]. Ceci permet de réduire drastiquement le coût de carburant, de fabrication, d'opération ainsi que de maintenance des appareils. Par ailleurs, l'apparition de capteurs bon marché, la multiplication de communautés hébergées sur internet portant sur les drones légers ainsi que l'apparition de projets à code libre sont des facteurs qui ont rendu accessible le domaine des drones à une très grande partie de la population [Site web14].

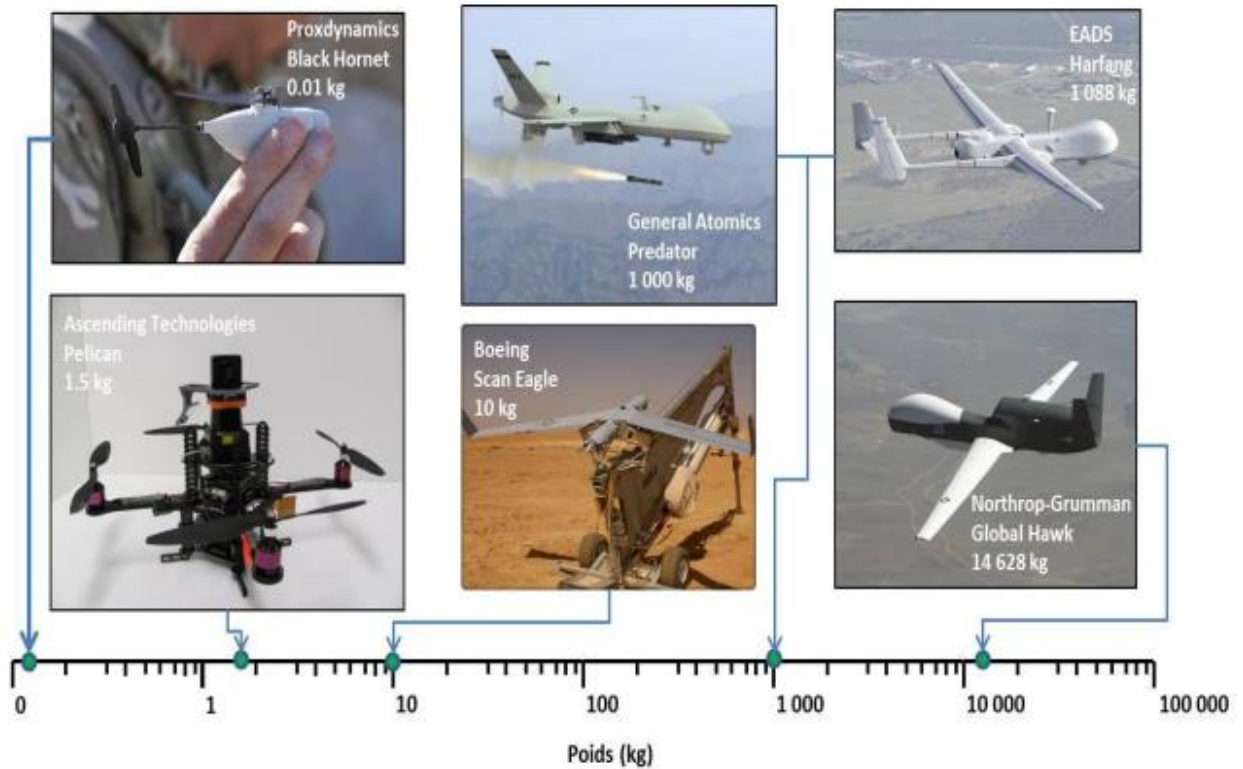


Figure (I.2) : Différents modèles de drones classés par poids Adaptée de Wikipédia [Site web 02].

Les drones peuvent être catégorisés suivant leurs fonctions et leurs rôles. Ainsi donc, on distingue :

I.4.1. Utilisation militaire des drones :

Les drones sont utilisés dans l'armée depuis seconde guerre mondiale et ça afin de faire l'observation, le renseignement, la reconnaissance du terrain pour les troupes terrestres et aériennes et comme une arme de combat. Le pilotage d'un drone peut s'effectuer à partir de sites distants de plusieurs milliers de kilomètres de l'avion. La figure (I.3) illustre un exemple de l'utilisation des drones dans le secteur militaire de l'état unis d'Amérique [Site web16] :



Figure (I.3) : Utilisation des drones dans le secteur militaire

I.4.2. Utilisation civile des drones :

Les applications des drones civils sont multiples et variées. Citons la cartographie, la logistique, la sécurité publique et privée, les prises de vues aériennes (photographies ou vidéos), l'inspection de sites (ex. éoliennes, centrales nucléaires, etc.), l'observation d'environnements marins, les secours (ex. : détection de victimes d'avalanches), la thermographie, la recherche agronomique et bien d'autres encore [Site web06].

En plus, les drones civils offrent de multiples possibilités et applications variées. Par exemple, dans le domaine de la photographie aérienne et de la vidéographie, les drones peuvent être utilisés pour avoir des images originales des paysages naturels et urbains, enrichissant ainsi la production cinématographique et publicitaire. En ce qui concerne la surveillance, les drones peuvent être utilisés pour surveiller les incendies de forêt, surveiller les frontières et inspecter les infrastructures telles que les ponts et les tours électriques [ZIO20]. Ils peuvent également être utilisés pour la livraison rapide de colis et de marchandises dans les zones urbaines. Cependant, il existe également des défis liés à la législation et à la réglementation, notamment en matière de lois sur l'aviation, de protection de la vie privée et de sécurité.



Figure (I.4) : Quelques domaines d'utilisation civile des drones.

I.5. AVANTAGES ET DES INCONVENIENTS DES DRONES :

L'utilisation d'un drone peut apporter de nombreux avantages et améliorer l'efficacité, la rapidité et la qualité de nombreuses tâches dans différents secteurs d'activités professionnels, commerciales, scientifiques ou militaires [Site web17].

Les drones sont des appareils volants sans pilote à bord, télécommandé par des pilotes professionnels qualifiés. Ils offrent une perspective aérienne unique et un accès à des endroits difficiles d'accès. Pouvant être utilisés pour effectuer des tâches difficiles, dangereuses ou coûteuses de manière plus rapide, efficace et sur [Site web17].

I.5.1. Les avantages:

- 1. Exécution de tâches dangereuses :** Les drones sont utilisés pour des missions telles que la reconnaissance de zones dangereuses ou la lutte contre les incendies sans exposer les humains au danger.
- 2. Réduction des coûts :** Comparé aux avions traditionnels, l'exploitation des drones est généralement moins coûteuse, que ce soit en termes d'exploitation ou de maintenance.
- 3. Facilité d'utilisation :** Grâce aux avancées technologiques, le fonctionnement et le contrôle des drones sont devenus plus faciles et plus simples, offrant ainsi de nombreuses opportunités d'utilisation dans divers domaines.

I.5.2. Les inconvénients:

- 1. Préoccupations concernant la vie privée :** L'utilisation des drones soulève des questions de vie privée, car ils peuvent être utilisés pour espionner les individus ou les zones de manière indésirable.

2. Problèmes de sécurité : Des accidents ou des collisions peuvent survenir entre les drones et d'autres aéronefs habités ou non, ce qui nécessite une réglementation stricte et des mesures de sécurité strictes.

3. Défis techniques : Avec la croissance de l'utilisation des drones, des défis techniques tels que l'autonomie limitée de la batterie et le contrôle du trafic aérien dans des espaces aériens encombrés se posent.

Tableau (I.2) : Résumé des avantages et des désavantages du quadrirotor.

Avantages	Inconvénients
Décollage/Atterrissage vertical	Naturellement instable
Vol stationnaire	Dynamique couplée
Simple mécanique	Système sous-actionné
Agile	Petit rayon d'action (~ 1 à 3 km)
Petite taille	Faible autonomie (~ 10 à 30 min)
/	Faible charge utile (~ 0.1 à 1 kg)

I.6. PERSPECTIVES D'UTILISATION :

Les drones civils vendus aujourd'hui sont destinés à deux grandes catégories d'utilisateurs, les particuliers qui les utilisent pour leurs loisirs (on les appelle parfois des dronistes) et les professionnels. Les drones utilisés à des fins ludiques sont de très loin les plus nombreux. Leur usage s'apparente à l'aéromodélisme. Ainsi, près d'un million d'exemplaires des modèles grand public produits par l'entreprise française Parrot se sont vendus dans le monde depuis 2010 [Site web 05].

Les utilisateurs de drones à des fins professionnelles sont bien moins nombreux mais leur nombre croît très rapidement. Il y aurait en mai 2015 en France près de 1 500 petites et moyennes entreprises autorisées à exploiter des drones à des fins professionnelles et celles-ci exploitent environ 4 000 drones. On note qu'en France, la réglementation existante concerne à la fois les usages professionnels et les usages personnels et que ces deux mondes restent à bien des égards encore aujourd'hui assez proches. On se focalise dans ce paragraphe sur les utilisations professionnelles qui sont extrêmement diverses [Site web 05].

La taxonomie utilisée pour le processus de report d'accident/incident normalisé qui distingue quatre grandes catégories d'activités réalisables avec un aéronef : le transport commercial, l'aviation générale, le travail aérien et les vols d'État [Site web 05].

On s'attend à ce que les drones puissent développer des activités relevant de ces quatre catégories, en se limitant cependant à court/moyen terme au transport de marchandises pour ce qui concerne le transport commercial.

I.7. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons donné des généralités sur les drones. Nous avons présenté quelques classifications des drones. Nous avons aussi décrit également le drone quadrirotor, le type qui nous intéresse dans ce travail. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du quadrirotor.

Chapitre II

Modélisation d'un drone

II.1. INTRODUCTION :

Le contrôle d'un système nécessite en premier lieu l'établissement de son modèle mathématique. La modélisation fait référence à l'utilisation de procédures pour obtenir une représentation mathématique d'un système, plus cette représentation est détaillée, plus elle représente fidèlement le comportement réel du système. Le quadrirotor répond à une dynamique de vol très spécifique. Ce dernier doit être le plus fidèle possible à la dynamique du système à commander. Le système que l'on cherche à commander ici est un drone quadrirotor. Il est classé parmi les systèmes complexes vu le nombre d'effets physiques qui l'affectent. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation des drones quadrirotor.

II.2. LE QUADRIROTOR :

Le quadrirotor comporte quatre (04) rotors définis dans l'espace par six (06) Degrés De Liberté (DDL), trois mouvements de rotation et trois mouvements de translation. Les quatre rotors sont généralement placés aux extrémités d'une croix, et l'électronique de commande est habituellement placée au centre de la croix. Les hélices opposées tournent dans un sens, et les deux autres tournent dans le sens inverse afin d'éviter à l'appareil de tourner sur lui-même [AMR20]. Le quadrirotor est un système sous actionné (le nombre des actionneurs est inférieur au nombre des DDL à pouvoir réaliser) et son fonctionnement est assez particulier. En faisant varier astucieusement les vitesses de rotation des moteurs, il est possible de le faire monter/descendre, de l'incliner à gauche/droite (roulis) ou en avant/arrière (tangage) ou encore de le faire pivoter sur lui-même (lacet) [AMR20].



Figure (II.1) : Structure générale du quadrirotor.

II.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Un quadrirotor est composé de quatre rotors. En variant astucieusement la puissance des moteurs, nous sommes capables de le faire monter/descendre, de l'incliner à gauche/droite (roulis) ou en avant/arrière (tangage) ou de le faire pivoter sur son axe vertical (lacet). Le quadrirotor a six degrés de liberté, trois mouvements de rotation et trois mouvements de translation, ces 6 degrés de liberté sont commandés à partir de quatre consignes seulement. Ainsi le drone quadrirotor est un système sous actionné (le nombre des entrées est inférieur au nombre des sorties) [HAM].

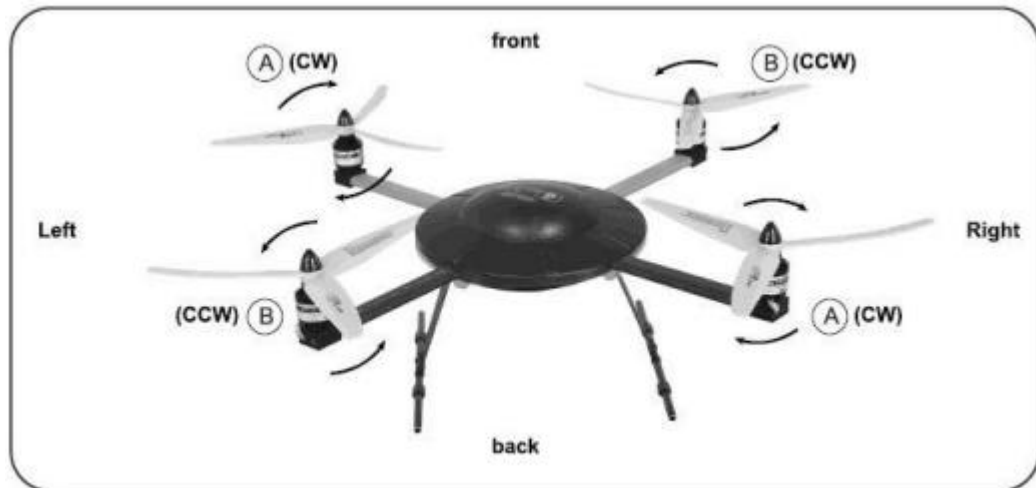


Figure (II.2) : Configuration d'un drone quadrirotor.

II.4. DESCRIPTION :

Un quadrirotor est un drone à voilure tournante composé de quatre rotors. Il est constitué de quatre pales à pas fixe accouplées à des moteurs à courant continu.

Les quadrirotors utilisent deux paires d'hélices à pas fixe identiques, deux dans le sens des aiguilles d'une montre (CW) et deux dans le sens inverse (CCW). Pour diriger l'appareil, les rotors tournant dans le même sens doivent être placés l'un en face de l'autre [AMR20]. Figure (II.3)

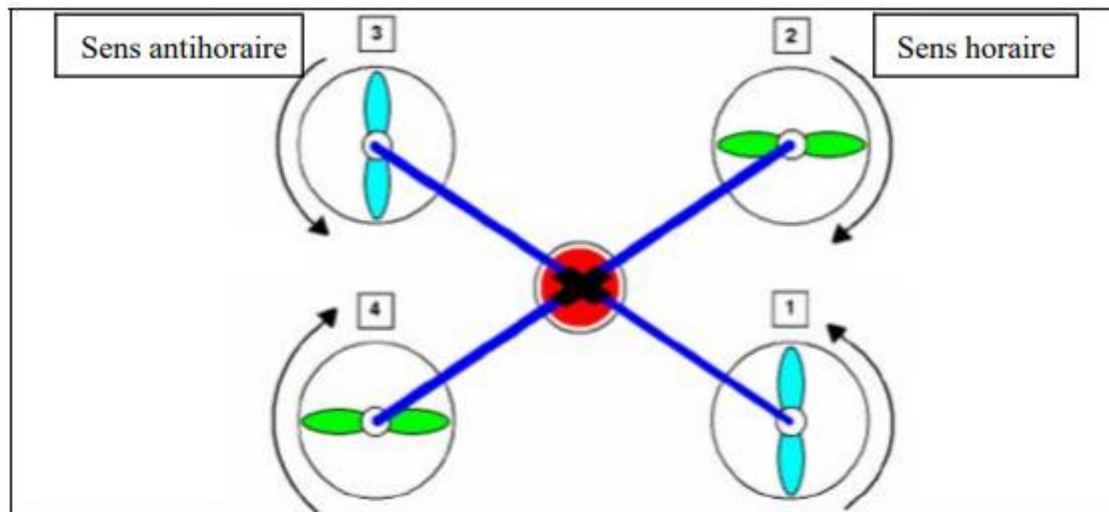


Figure (II.3) : Sens de rotation des rotors.

II.5. PRINCIPE DE VOL D'UN UAV :

La conception d'un contrôleur de vol efficace pour un UAV autonome commence par une bonne compréhension des principes de la théorie des vols. Un manque de connaissances sur l'aérodynamique peut provoquer des commandes d'entrée inappropriées lorsque l'avion fonctionne à la limite de ses performances. Pour cette raison, l'objectif de cette section est de fournir un aperçu de base de la mécanique du vol[Site web19].

Pour pouvoir se déplacer dans l'espace, le quadricoptère doit pouvoir réaliser quatre mouvements. Tous ces mouvements sont possibles en modifiant indépendamment les vitesses des quatre moteurs. Ces quatre mouvements sont :

1. Les déplacements verticaux ou autrement dit, le contrôle de l'altitude (monter et descendre) (déplacement sur l'axe Z)
2. Les déplacements frontaux (avancer et reculer) (déplacement sur l'axe X)
3. Les déplacements latéraux (se déplacer sur le côté à la manière d'crabe) (déplacement sur l'axe Y)
4. Les rotations sur lui-même (tourner sur lui-même sur le même plan) (rotation autour de l'axe Z)

Nous allons prendre l'exemple d'un quadricoptère en X car c'est la forme que nous avons utilisée et également la plus courante. Il existe d'autres formes de quadricoptère (comme celui en croix) mais elles sont moins répandues[Site web20].

Premièrement, pour pouvoir monter et descendre, il suffit de modifier la vitesse des quatre moteurs simultanément pour créer plus ou moins de portance.

Ensuite, pour pouvoir avancer par exemple, on augmente la vitesse des deux moteurs arrière afin de faire pivoter le quadricoptère en avant. Une fois l'inclinaison désirée atteinte, on stabilise à nouveau la vitesse des moteurs, et l'appareil va avancer, tel un hélicoptère. Les déplacements latéraux se font selon le même principe que les déplacements frontaux, il faut augmenter la vitesse des moteurs du côté opposé auquel nous souhaitons déplacer le quadricoptère[Site web20].

Ces deux types de rotation portent les noms suivants : le tangage (pitch en anglais) pour les rotations frontales et le roulis (roll en anglais) pour les rotations latérales. Pour pouvoir tourner sur lui-même, le quadricoptère utilise un principe un peu moins connu : l'inertie de rotation. C'est en raison de ce principe que les hélicoptères ont un rotor de queue (la petite hélice verticale à l'arrière) [Site web20].

Le troisième principe de la dynamique de Newton, souvent formulé comme "à chaque action, il y a une réaction égale et opposée", est une notion fondamentale en physique. Dans le contexte des hélicoptères et des quadricoptères, il est crucial pour comprendre les forces impliquées dans le mouvement.

Pour un hélicoptère, le rotor principal génère une force ascendante en faisant tourner l'air vers le bas. Selon le troisième principe de Newton, cette action crée une réaction égale et opposée, poussant l'hélicoptère vers le haut. Cependant, cette action crée également un couple qui tend à faire tourner l'hélicoptère dans la direction opposée à la rotation du rotor principal. C'est là que le rotor de queue entre en jeu, en produisant une force de poussée dans une direction latérale pour compenser ce couple et maintenir l'hélicoptère stable.

Dans le cas d'un quadricoptère, ce principe est également à l'œuvre, mais la configuration des hélices est conçue de manière à annuler les couples indésirables. En faisant tourner les hélices dans des directions opposées, les couples générés par chaque paire d'hélices s'annulent mutuellement, assurant ainsi la stabilité de l'engin. Cependant, en variant les vitesses de rotation des moteurs de manière appropriée, il est possible de créer un couple net qui fait tourner le quadricoptère sur lui-même. Cette rotation est appelée "lacet" (ou "yaw" en anglais).

En résumé, le troisième principe de Newton est essentiel pour comprendre les forces et les couples impliqués dans le mouvement des hélicoptères et des quadricoptères, et il est utilisé pour maintenir la stabilité et contrôler le mouvement de ces engins volants.

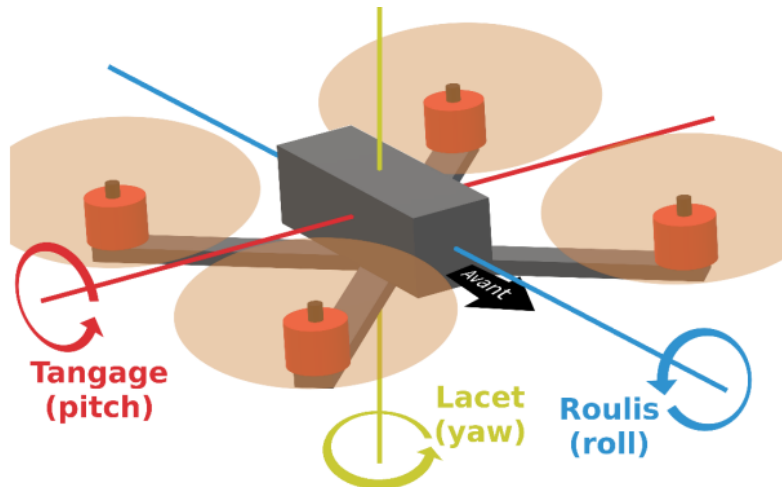


Figure (II.4) : Axes des mouvements pour le quadrirotor.

Ces quatre mouvements combinés permettent aux quadricoptères de se mouvoir dans l'espace. On pourrait également imaginer un drone comme étant un vecteur dont on peut modifier l'intensité (la puissance des moteurs) ainsi que la direction en trois dimensions (grâce aux trois axes de rotation).

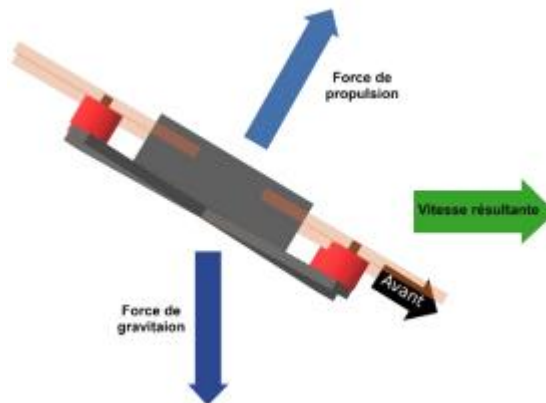


Figure (II.5) : Différentes forces exercée sur le quadrirotor.

Les quatre mouvements d'un quadricoptère sont contrôlés par les quatre canaux de la télécommande, qui correspondent aux mouvements suivants :

a) Le contrôle du roulis (roll), qui correspond au mouvement horizontal de l'aéronef autour de son axe longitudinal, est associé au canal numéro 1. Cela est généralement contrôlé en déplaçant l'axe horizontal du joystick de droite.

b) Le contrôle du tangage (pitch), qui correspond au mouvement vertical de l'aéronef autour de son axe transversal, est associé au canal numéro 2. Ce mouvement est généralement contrôlé en déplaçant l'axe vertical du joystick de droite.

c) Le contrôle de l'altitude (de la puissance), qui correspond au maintien de l'élévation de l'aéronef, est associé au canal numéro 3. Ce canal est souvent associé à l'axe vertical du joystick de gauche. Un aspect important est que cet axe n'a pas de ressorts pour le ramener au centre, ce qui permet au pilote de maintenir la puissance sans avoir à maintenir le joystick en position.

d) Le contrôle du lacet (yaw), qui correspond à la rotation de l'aéronef autour de son axe vertical, est associé au canal numéro 4. Ce mouvement est généralement contrôlé en déplaçant l'axe horizontal du joystick de gauche.

En utilisant ces quatre canaux de contrôle, les pilotes peuvent manipuler avec précision les mouvements de leur quadricoptère pour effectuer diverses manœuvres et maintenir le contrôle pendant le vol.

II.5.1. Les forces de vol :

Les principes fondamentaux de l'aérodynamique impliquent l'interaction entre un objet solide et l'air qui circule autour du corps de cet objet en maintenant le contact en tous points. Compte tenu du cas d'un avion en vol, les variations de pression le long de ses composants, causées par le contact physique avec l'air, génèrent une force aérodynamique qui agit à travers le centre de pression. Cette force peut être résolue en une composante normale à la direction de l'écoulement de l'air qui s'appelle portance (lift), et une composante le long de la direction de l'écoulement de l'air qui s'appelle traînée (drag) [Site web39].

La portance est toujours une force ascendante perpendiculaire à la direction du vol et dépend de plusieurs variables. De même, la traînée est une force arrière très sensible à de nombreux facteurs et sa principale source est le frottement entre l'air et la surface de l'avion. Il y a deux autres forces qui agissent sur l'avion: la poussée générée par le moteur qui fait avancer l'avion et la force gravitationnelle qui est due au poids de l'avion qui est toujours dirigé vers le centre de la Terre. Par conséquent, la force de portance est ce qui maintient l'avion dans l'air pour surmonter son poids alors que la force de poussée est ce qui fait avancer l'avion vers l'avant. Lorsque l'avion vole droit sans accélérer, les quatre forces sont en équilibre, la poussée est égale à la traînée et à la portance égale au poids. Ce cas particulier est représenté[Site web39].

Les quatre forces affectant le vol d'un avion sont des quantités vectorielles qui signifient qu'elles ont à la fois une grandeur et une direction. La motion de vol dépend exclusivement des paramètres de ces vecteurs et de leur relation. Pour qu'un pilote puisse manœuvrer l'avion, les quatre forces doivent être manipulées avec précision. Par conséquent, comprendre leur nature et posséder des moyens d'ajuster leur direction et leur grandeur est nécessaire afin d'assurer un contrôle précis de l'avion.

II.5.2. Mouvements d'un quadrirotor :

Il existe quatre mouvements possibles pour un quadrirotor : vertical, le lacet, le tangage et le roulis.

a) Mouvement vertical (sustentation)

Le mouvement vertical correspond tout simplement à la montée/descente du quadrirotor. La montée est obtenue en augmentant la vitesse des quatre moteurs. La descente, s'obtient par la réduction de la vitesse des moteurs.

b) Mouvement de lacet (ψ)

Le mouvement de lacet est utilisé pour faire tourner le quadrirotor sur lui-même. Il est obtenu en augmentant la vitesse des rotors (1 et 3) et en réduisant proportionnellement la vitesse des rotors (2 et 4).

c) Mouvement de roulis (ϕ)

Afin d'obtenir le mouvement de roulement, un couple est appliqué autour de l'axe, qui est la différence de poussée entre le rotor (02) et le rotor (04). Le mouvement (rotation autour de l'axe) est couplé au mouvement de translation le long de l'axe y.

d) Mouvement de tangage (θ)

De la même manière, en appliquant un couple autour de l'axe y, la différence de poussée entre le rotor (01) et le rotor (03) est inclinée. Ce dernier est couplé à un mouvement de translation le long de l'axe x [Site web40].

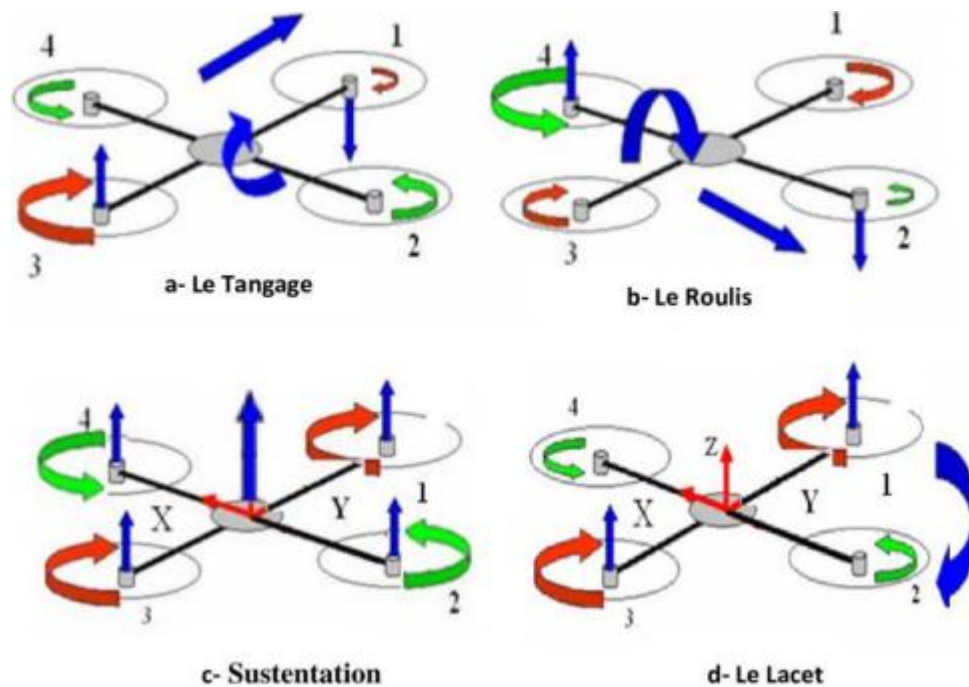
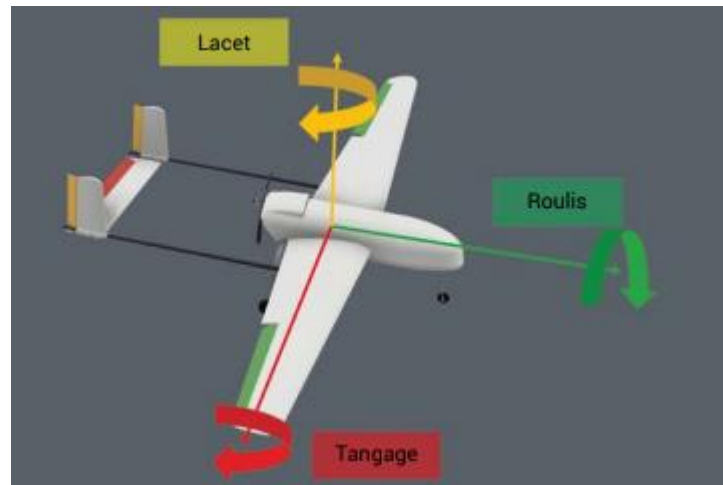


Figure (II.6) : Mouvements du drone quadrirotor.

II.6. REPERAGE DU QUADRIROTOR DANS L'ESPACE :

II.6.1. Repères utilisés :

Un quadrirotor a besoin de deux trièdres pour être positionné dans l'espace[Site web21] :

✓ Le repère terrestre : Il est noté $R_0(O_0, X_0, Y_0, Z_0)$. C'est un repère lié à la terre (figure (II.8)) et supposé immobile.

✓ Le repère lié au corps du quadrirotor : Le repère lié au corps du quadrirotor est noté $R_1(O_1, X_1, Y_1, Z_1)$. C'est un repère dont l'origine O_1 coïncide avec le centre de gravité G du quadrirotor.

Les paramètres qui permettent donc de décrire le mouvement du quadrirotor sont $(\phi, \psi, \theta, x, y, z, \Omega, V)$ avec :

- ϕ (angle de roulis) : rotation autour de X_1 ($-\pi < \phi < \pi$).
- θ (angle de tangage) : rotation autour de Y_1 ($-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$).
- ψ (angle de lacet) : rotation autour de Z_1 ($-\pi < \psi < \pi$).
- x : coordonnée du centre de gravité G du quadrirotor suivant X_0 .
- y : coordonnée du centre de gravité G du quadrirotor suivant Y_0 .
- z : coordonnée du centre de gravité G du quadrirotor suivant Z_0 .

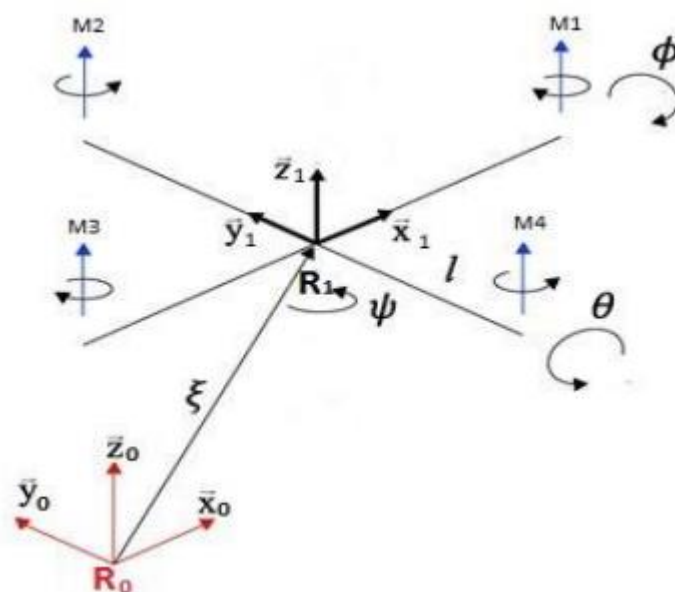


Figure (II.7) : Repérage d'un quadrirotor.

- $V = [u, v, w]^T \in R_0$: La vitesse linéaire liée du quadrirotor par rapport repère inertiel.
- $\Omega = [p, q, r]^T \in R_0$: La vitesse de rotation du quadrirotor par rapport repère inertiel.

Figure II- 7 Repérage d'un quadrirotor

II.6.2. Matrice de rotation :

On considère que les centres O_0 et O_1 des deux repères sont confondus, ce qui signifie que le repère R_1 ne fait que des rotations par rapport au repère R_0 . Trois paramètres indépendants sont nécessaires pour décrire complètement l'orientation du repère R_1 par rapport à celle de R_0 . Le passage du repère R_1 vers le repère R_0 se fera par trois rotations en utilisant deux repères intermédiaires R_i et R_j [Site web22].

✓ Passage du repère R_0 vers le repère R_i

La rotation se fait autour de l'axe $x_i = x_0$. On passe du repère R_0 vers R_i en faisant une rotation d'angle ϕ appelé angle de roulis. La représentation se fait par des figures planes à partir desquelles nous construisons les matrices de passage. Nous avons ainsi la matrice [Site web22] :

$$R(X_0, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

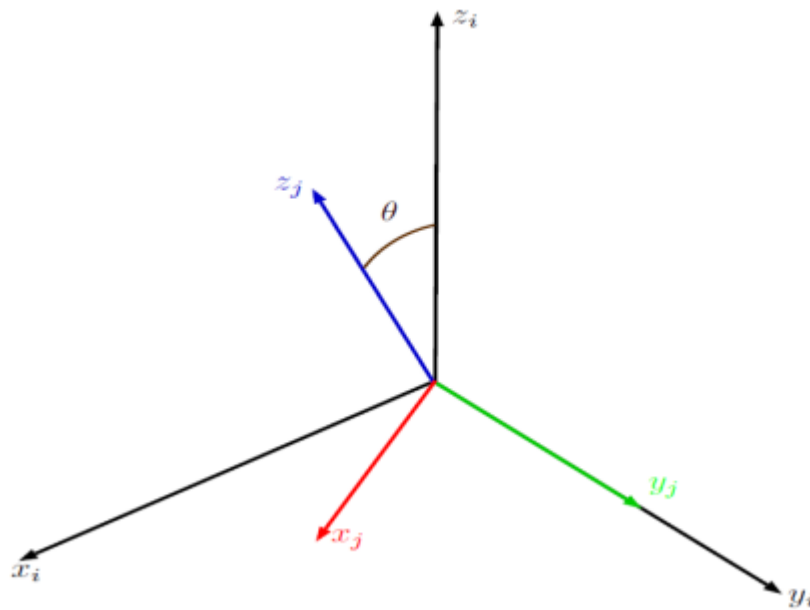


Figure (II.8) : Rotation autour de l'axe X (Roullis).

✓ Passage du repère R_i vers le repère R_j

La rotation se fait autour de l'axe $y_j = y_i$. On passe du repère R_i vers le repère R_j en faisant une rotation d'angle θ appelé angle de tangage.

Figure (II- 9): Rotation autour de l'axe Y

Nous avons ainsi la matrice [Site web22]:

$$R(Y_0, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

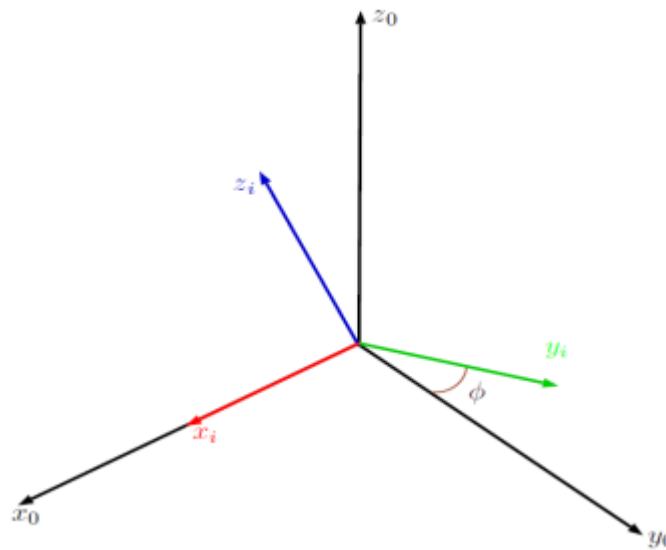


Figure (II.9) : Rotation autour de l'axe Y (tangage).

✓ Passage du repère R_j vers le repère R_1

La rotation se fait autour de l'axe $z_1 = z_j$. On passe du repère R_j vers le repère R_1 en faisant une rotation d'angle ψ appelé angle du lacet.

Figure II- 10: Rotation autour de l'axe Z

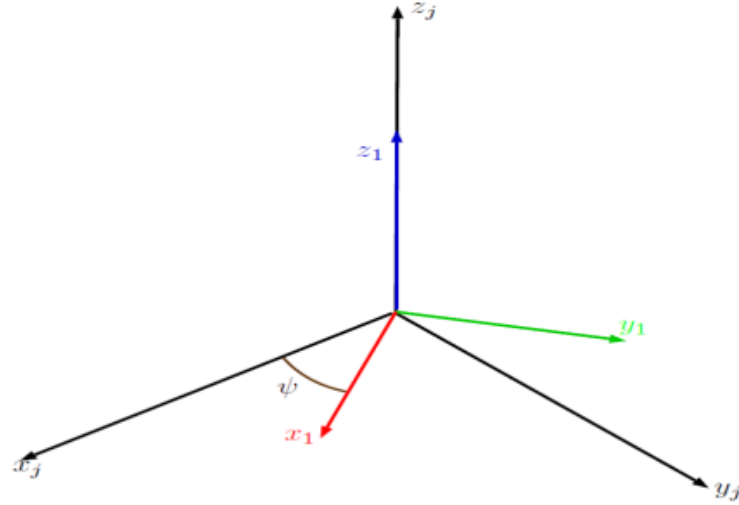


Figure (II.10) : Rotation autour de l'axe Z (lacet).

Nous avons ainsi la matrice [Site web22]:

$$R(Z_0, \psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donc on a la formule de la matrice de rotation R[7] :

$$R = \text{Rot}_z(\psi) \times \text{Rot}_y(\theta) \times \text{Rot}_x(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & \sin(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) - \sin(\psi)\cos(\phi) & \cos(\phi)\sin(\theta)\cos(\psi) + \sin(\psi)\sin(\phi) \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \sin(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) + \cos(\psi)\cos(\phi) & \cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\phi)\cos(\psi) \\ -\sin(\theta) & \sin(\phi)\cos(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix}$$

II.6.3. Vitesses de rotation:

Nous exprimons les vitesses de rotation $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ dans le repère fixe, en fonction des vitesses de rotation $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ dans le repère mobile [Site web24] :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \text{Rot}_x(\phi)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + (\text{Rot}_y(\theta)\text{Rot}_x(\phi))^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

En effet, la rotation en roulis a lieu lorsque les repères sont encore confondus. Puis, en ce qui concerne le tangage, le vecteur représentant la rotation doit être exprimé dans le repère fixe : il est donc multiplié par $\text{Rot}(\phi)^{-1}$. De même, le vecteur représentant la rotation en lacet doit être exprimé dans le repère fixe qui a déjà subies deux rotations. On arrive ainsi à :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}\cos(\phi) \\ -\dot{\theta}\sin(\phi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\psi}\sin(\theta) \\ \dot{\psi}\sin(\phi)\cos(\theta) \\ \dot{\psi}\cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi}\sin(\theta) \\ \dot{\theta}\cos(\phi) + \dot{\psi}\sin(\phi)\cos(\theta) \\ \dot{\psi}\cos(\phi)\cos(\theta) - \dot{\theta}\sin(\phi) \end{bmatrix}$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi)\cos(\theta) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix}$$

Lorsque le quadrirotor fait des petites rotations, nous pouvons faire les approximations suivantes :

$$\cos(\phi) = \cos(\theta) = \cos(\psi) = 1, \sin(\phi) = \sin(\theta) = \sin(\psi) = 0$$

On obtient donc :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [\Omega_x \Omega_y \Omega_z]^T$$

Les vitesses linéaires v_x^b, v_y^b, v_z^b dans le repère fixe en fonction des vitesses linéaires v_x^m, v_y^m, v_z^m dans le repère mobile sont données par [Site web24]:

$$v = \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} v_x^m \\ v_y^m \\ v_z^m \end{bmatrix}$$

II.7. MODELISATION DYNAMIQUE DU QUADRI-ROTOR:

La modélisation d'un quadrirotor est une tâche difficile car la dynamique du système est hautement non linéaire et entièrement couplée. Afin de mieux comprendre le modèle dynamique, nous faisons quelques hypothèses [Site web25]:

- ✓ La structure du quadrirotor est supposée rigide et symétrique.
- ✓ Les hélices sont supposées rigides pour pouvoir négliger l'effet de déformation lors de la rotation (battement).
- ✓ La matrice d'inertie J est supposée constante (il n'y a pas de changement de poids).
- ✓ Les forces de portance et de trainée sont supposées proportionnelles au carré de la vitesse de rotation des rotors.
- ✓ Le repère lié au corps du quadrirotor est supposé confondu avec son centre de gravité.

II.7.1. Effets physiques agissants sur le quadrirotor :

II.7.1.1. Les forces :

Les forces agissantes sur le quadrirotor sont [Site web23] :

- ✓ Le poids

Il donnée par :

$$P = m \times g$$

m : La masse totale de quadrirotore g la gravité.

- ✓ Les forces de poussée

Ces forces sont provoquées par la rotation des moteurs, elles sont perpendiculaires sur le plan des hélices, et proportionnelles au carrée de la vitesse de rotation des moteurs :

$$F_i = b \cdot \omega_i^2$$

avec : i le nombre des moteurs et b le coefficient de portance.

✓ Les forces de traînée

La traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un fluide pesant et agit comme un frottement. Nous avons donc deux forces de traînée agissant sur le système :

- La traînée dans les hélices : elle agit sur les pales, elle est proportionnelle à la densité de l'air, à la forme des pales et au carré de la vitesse de rotation de l'hélice, elle est donnée par :

$$T_h = d\omega_i^2$$

avec : d le coefficient de drag qui dépend de la fabrication de l'hélice.

- La traînée selon les axes ($\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$) : elle est due au mouvement du quadrirotor :

$$F_t = K_{ft}V$$

avec : K_{ft} le coefficient de traînée de translation et V la vitesse linéaire.

II.7.1.2. Les moments :

Il y a plusieurs moments agissants sur un quadrirotor, qui sont dus aux forces de poussée et de traînée et aux effets gyroscopiques [Site web24]:

✓ Moments dus aux forces de poussée

- La rotation autour de l'axe $\mathbf{x}$: elle est due au moment créé par la différence entre les forces de portance des rotors 2 et 4, ce moment est donnée par la relation suivante :

$$M_x = l(F_4 - F_2) = lb(\omega_4^2 - \omega_2^2)$$

avec : l est la longueur du bras entre le rotor et le centre de gravité du quadrirotor.

- La rotation autour de l'axe $\mathbf{y}$: elle est due au moment créé par la différence entre les forces de portance des rotors 1 et 3, ce moment est donnée par la relation suivante :

$$M_y = l(F_3 - F_1) = lb(\omega_3^2 - \omega_1^2)$$

✓ Moments dus aux forces de trainée

- La rotation autour de l'axe **z** : elle est due à un couple réactif provoqué par les couples de trainée dans chaque hélice, ce moment est donnée par la relation suivante :

$$M_z = d(\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2)$$

✓ Moment résultant des frottements aérodynamiques

Il est donnée par :

$$M_a = K_{fa}\Omega^2$$

avec : K_{fa} le coefficient des frottements aérodynamiques et Ω est la vitesse angulaire.

II.7.1.3. Effets gyroscopiques [Site web26] [Site web23]:

L'effet gyroscopique est défini comme la difficulté de changer la position ou la direction du plan de rotation de la masse en rotation. L'effet gyroscopique est nommé selon le mode de fonctionnement du gyroscope, qui est un dispositif de contrôle de mouvement utilisé dans l'aviation (du grec gyroscope, qui signifie tourner et observer). Dans notre cas, il y a deux moments gyroscopiques, le premier est le moment gyroscopique de l'hélice, et l'autre est le moment gyroscopique dû au mouvement du rotor à quatre axes.

✓ Moment gyroscopique des hélices

Il est donné par la relation suivante :

$$M_{gm} = \sum_1^4 \Omega \wedge J_r \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (-1)^{i+1} \omega_i \end{bmatrix}$$

avec J_r est l'inertie des rotors.

✓ Moment gyroscopique dû aux mouvements de quadrirotor

Il est donné par la relation suivante :

$$M_{gh} = \Omega \wedge J \Omega$$

avec J est l'inertie du système.

II.7.2. Modèle mathématique selon Newton-Euler [Site web28] [Site web27]:

En utilisant la formulation de Newton-Euler, les équations sont écrites sous la forme suivante :

avec :

ζ : Vecteur de position du quadrirotor.

m : Masse totale du quadrirotor.

Ω : Vitesse angulaire exprimée dans le repère fixe.

R : Matrice de rotation.

Λ : Produit vectoriel.

J : Matrice d'inertie symétrique de dimension (3×3), elle est donnée par :

$$J = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}$$

$S(\Omega)$: est la matrice antisymétrique, pour un vecteur de vitesse = $[\Omega_1 \Omega_2 \Omega_3]$ elle est donnée par :

$$S(\Omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{bmatrix}$$

F_f : est la force totale générée par les quatre rotors, elle est donnée par :

$$F_f = R \times [0 \quad 0 \quad \sum_{i=1}^4 F_i]^T$$

$$F_i = b\omega_i^2$$

F_t : est la force de trainée selon les axes, elle est donnée par :

$$F_t = \zeta \begin{bmatrix} -k_{ftx} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{fity} & 0 \\ 0 & 0 & -k_{ftz} \end{bmatrix}$$

$k_{ftx} k_{fity} k_{ftz}$: Les coefficients de trainée de translation.

F_g : Force de gravité, elle est donnée par :

$$F_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}$$

M_f : Moment provoqué par les forces de poussée et de trainée.

$$M_f = \begin{bmatrix} l(F_4 - F_2) \\ l(F_3 - F_1) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix}$$

M_a : Moment résultant des frottements aérodynamiques, il est donné par :

$$M_a = \begin{bmatrix} k_{fax} \dot{\phi}^2 \\ k_{fay} \dot{\theta}^2 \\ k_{faz} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix}$$

II.7.2.1. Equations de mouvement de translation [Site web27] :

On a:

$$m\ddot{\zeta} = F_f + F_t + F_g$$

On remplace chaque force par sa formule, on trouve :

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi)\cos(\psi)\sin(\theta) + \sin(\phi)\sin(\psi) \\ \cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\phi)\cos(\psi) \\ \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i - \begin{bmatrix} k_{ftx} \dot{x} \\ k_{fity} \dot{y} \\ k_{ftz} \dot{z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}$$

On obtient alors les équations différentielles qui définissent le mouvement de translation :

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} (\cos(\phi)\cos(\psi)\sin(\theta) + \sin(\phi)\sin(\psi)) \left(\sum_{i=1}^4 F_i \right) - \frac{k_{ftx}}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} (\cos(\phi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\phi)\cos(\psi)) \left(\sum_{i=1}^4 F_i \right) - \frac{k_{fity}}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} (\cos(\phi)\cos(\theta)) \left(\sum_{i=1}^4 F_i \right) - \frac{k_{ftz}}{m} \dot{z} - g \end{cases}$$

II.7.2.2. Equations de mouvement de rotation [Site web27]:

On a:

$$J\dot{\Omega} = \Omega \wedge J\Omega - M_f - M_a - M_{gh}$$

On remplace chaque moment par la formule correspondant, on trouve :

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\
&= - \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{fax} \dot{\phi}^2 \\ k_{fay} \dot{\theta}^2 \\ k_{faz} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \\
&- \begin{bmatrix} J_r \Omega_r \dot{\theta} \\ -J_r \Omega_r \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

On obtient alors les équations différentielles définissant le mouvement de rotation :

$$\begin{cases} I_x \ddot{\phi} = -\dot{\theta} \dot{\psi} (I_z - I_y) - J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} - k_{fax} \dot{\phi}^2 + lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ I_y \ddot{\theta} = -\dot{\phi} \dot{\psi} (I_z - I_x) - J_r \bar{\Omega}_r \dot{\phi} - k_{fay} \dot{\theta}^2 + lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ I_y \ddot{\theta} = -\dot{\phi} \dot{\theta} (I_y - I_x) - k_{faz} \dot{\psi}^2 + d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases}$$

Notant que $u_1 u_2 u_3 u_4$ sont les entrées de commande (de translation selon l'axe « x, y, z » et la rotation selon lacet) du système et qui s'écrivent en fonction des vitesses angulaires des quatre rotors comme suit :

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -lb & 0 & lb \\ -lb & 0 & lb & 0 \\ d & -d & d & -d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\Omega}_r = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4$$

En conséquence le modèle dynamique complet qui régit le quadrirotor est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_r}{I_x} \Omega_r \dot{\theta} - \frac{k_{fax}}{I_x} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{I_x} u_2 \\ \ddot{\theta} = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} - \frac{J_r}{I_y} \Omega_r \dot{\phi} - \frac{k_{fay}}{I_y} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{I_y} u_3 \\ \ddot{\psi} = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\theta} \dot{\phi} - \frac{k_{faz}}{I_z} \dot{\psi}^2 + \frac{1}{I_z} u_4 \\ \ddot{x} = -\frac{k_{ftx}}{m} \dot{x} + \frac{1}{m} u_x u_1 \\ \ddot{y} = -\frac{k_{fty}}{m} \dot{y} + \frac{1}{m} u_y u_1 \\ \ddot{z} = -\frac{k_{ftz}}{m} \dot{z} - g + \frac{(\cos(\phi) \cos(\theta))}{m} u_1 \end{array} \right.$$

avec :

$$\begin{cases} u_x = (\cos(\phi) \cos(\psi) \sin(\theta) + \sin(\phi) \sin(\psi)) \\ u_y = (\cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi)) \end{cases}$$

II.7.3. La représentation d'état du système [Site web27] [Site web28]:

Pour un système physique il existe une multitude de représentations d'état, dans notre cas on choisit le vecteur d'état comme suit :

$$X = [\phi \dot{\phi} \theta \dot{\theta} \psi \dot{\psi} x \dot{x} y \dot{y} z \dot{z}]^T = [x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10} x_{11} x_{12}]^T$$

On obtient la représentation d'état suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3 \bar{\Omega}_r x_4 + b_1 u_2 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = a_4 x_2 x_6 + a_5 x_4^2 + a_6 \bar{\Omega}_r x_2 + b_2 u_3 \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = a_7 x_2 x_4 + a_8 x_6^2 + b_3 u_4 \\ \dot{x}_7 = x_8 \\ \dot{x}_8 = a_9 x_8 + \frac{1}{m} u_x u_1 \\ \dot{x}_9 = x_{10} \\ \dot{x}_{10} = a_{10} x_{10} + \frac{1}{m} u_y u_1 \\ \dot{x}_{11} = x_{12} \\ \dot{x}_{12} = a_{11} x_{12} + \frac{\cos(\phi) \cos(\theta)}{m} u_1 - g \end{array} \right.$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{(I_y - I_z)}{I_x}, a_2 = -\frac{k_{fax}}{I_x}, a_3 = -\frac{J_r}{I_x}, a_4 = \frac{(I_z - I_x)}{I_y}, a_5 = -\frac{k_{fay}}{I_y}, a_6 = \frac{J_r}{I_y} \\ a_7 = \frac{(I_x - I_y)}{I_z}, a_8 = -\frac{k_{faz}}{I_z}, a_9 = -\frac{k_{ftx}}{m}, a_{10} = -\frac{k_{fity}}{m}, a_{11} = -\frac{k_{ftz}}{m}, b_1 = \frac{1}{I_x} \\ b_2 = \frac{1}{I_y}, b_3 = \frac{1}{I_z} \end{array} \right.$$

II.8. Conclusion :

Ce chapitre introduit les équations cinématiques et dynamiques, ainsi que les forces et moments agissant sur le quadrirotor pour élaborer un modèle mathématique décrivant avec précision le comportement du système. Ce modèle permet une meilleure compréhension de la fonction globale du système ainsi que de ses limitations, ce qui facilite la conception du contrôleur de vol dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Construction et programmation du drone

III.1. INTRODUCTION

Un drone quadrirotor est un type d'aéronef à voilure tournante équipé de quatre rotors pour sa sustentation. Son fonctionnement implique cinq mouvements possibles : le mouvement vertical, le lacet, le roulis, le tangage et la translation. Ces mouvements sont obtenus en modifiant trois angles d'Euler. Le drone est ainsi capable d'effectuer à la fois des translations et des rotations. Pour garantir la précision de ces mouvements, il est nécessaire de corriger le fonctionnement du drone à l'aide d'un mécanisme de contrôle. Parmi les contrôleurs utilisés, le contrôleur KK2.1.5 connu pour fournir des performances élevées. Ce chapitre va utiliser cette carte afin de vérifier notre montage ou le système sera stable.

III.1. LISTE DES COMPOSANTS ET MATERIEL :

De quoi avez-vous besoin pour construire un avion ? Il y a des éléments essentiels qui doivent être présents et des composants supplémentaires dont vous pouvez vous passer.

III.2.1. Les moteurs brushless:

Les nouveaux moteurs Lumenier 2400kv RX2205 et RB2205C "Skitzo" en édition limitée comblent un vide dans la gamme de moteurs multirotors de Lumenier, en atteignant le point optimal entre puissance et poids.

Avec une note de 2400kV et une taille de stator de 2205, les nouveaux moteurs RX et RB 2205 se placent parfaitement entre les moteurs Lumenier RX2204 et RX2206, parmi les moteurs de course de drone et de FPV freestyle les plus populaires sur le marché. Avec ces moteurs 2205, Lumenier propose désormais un choix très granulaire de moteurs allant de 2204, 2205 et 2206 avec différentes notes kV, cela offre ainsi un excellent choix lors de la spécification des composants à construire. Les moteurs 2205 pèsent moins de 24 g, ce qui perpétue la tradition de Lumenier de créer certains des moteurs de course les plus légers.

Les moteurs Lumenier 2205 sont disponibles en deux versions. Le RX2205 utilise des roulements en acier inoxydable et des composants en aluminium anodisé argentés et usinés par CNC, tandis que le RB2205 "Skitzo" en édition limitée est disponible dans une couleur violette luxuriante et utilise des roulements à billes en céramique. Les roulements à billes en céramique sont depuis

longtemps utilisés dans des applications RC telles que la course automobile haute performance et offrent l'avantage d'une durée de vie accrue, de températures de fonctionnement plus fraîches et d'une performance super lisse et silencieuse. Lumenier est un moteurs brushless à déployer des roulements à billes en céramique dans la taille de moteur 22 pour les applications multirotors.

Assemblés avec soin et équilibrés dynamiquement dans l'installation climatisée de Lumenier, les moteurs Lumenier 2205 utilisent une nouvelle technologie de colle, des robots d'application pour une distribution uniforme de la colle et des procédures de durcissement avancées pour garantir que les aimants ne glissent pas, même sous les énormes contraintes auxquelles ils sont soumis lors des courses de drones et des différents événement [Site web29].



Figure (III.1) : Moteur à courant continu sans balai en phase.

Les caractéristiques du moteur lumenier RX2205-12 2400KV sont résumé dans le tableau suivant:

Tableau (III.1) : Caractéristique de SkyRC 2205-12 2400KV

KV(RPM/Volt)	2400KV
Configuration	12N14P
Termination	D (Delta)
Diamètre du stator	22mm
Diamètre de l'arbre	3mm
Dimensions du moteur	27x17mm
Poids	24g (avec fils)
Courant de repos @12.6v (Io)	0.81A
Cellules (LiPo)	2-4S
Courant maximal continu (A) 60s	20A
Courant de pointe maximal <10s	32A
Puissance maximale continue (W) 60s	290W

Courant d'efficacité maximale	(2.2-6A) 80%
Résistance interne (R_m)	260m Ω
Connexion du moteur	Fil nu

III.2.2. Le variateur de vitesse ESC:

L'ESC (Electronic Speed Controller) ou contrôleur électronique de vitesse est un circuit électronique permettant de réguler la vitesse des moteurs à courant continu sans balais (BLDC). Il contient 3 phases. La partie puissance du contrôleur repose sur des transistors MOSFET. Le 30A BLDC ESC (Electronic Speed Controller) peut piloter des moteurs consommant jusqu'à 30A de courant. Il fonctionne sur des batteries LiPo 2S-3S. Il dispose d'un BEC intégré qui fournit une tension régulée de 5V (tirage maximal de 2A) pour alimenter le contrôleur de vol et d'autres modules embarqués. Il peut être utilisé pour contrôler nos moteurs sans balais avec une LiPo 2S-3S (assurez-vous que le moteur ne tire pas plus de 30A). Ce contrôleur de vitesse électronique particulier est recommandé avec le moteur sans balais A2212 (1000kv, 1400kv, 2200kv) [OUL20].



Figure (III.2) : Variateur de vitesse ESC 30A.

Les caractéristiques du variateur de vitesse sont:

Tableau (III.2) : Caractéristiques de variateur de vitesse ESC.

Caractéristiques	
MODÈLE	CONTRÔLEUR DE VITESSE ÉLECTRONIQUE BLDC STANDARD 30A
Couleur	Jaune
Courant (A)	30A

BEC	3A
Li-Poly	2-3
Tension d'entrée	CC 5,5-12,6V (2-3S Lixx)
BEC .	5V 2A.
Ni-Mh/Ni-CD	4-10 Ni-Mh
Courant constant	30A max 40A <10s
Li-Poly 2-3 CELLULES	Ni-MH 4-10 CELLULES Détection auquetomati
Frein marche/arrêt	Ralentissement automatique de la BATTERIE faible à 3,0V/cellule Lipo, coupure à 2,9V/cellule Lipo
Taille	46mm x 26mm x 8mm

III.2.3. Capteurs MPU 6050:

Le MPU6050 est un capteur IMU (unité de mesure d'inertie) faisant partie de la famille des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS). Il se distingue par la présence d'un accéléromètre triaxial et d'un gyroscope triaxial. L'unité MPU6050, également connue sous le nom de capteur magnétique, peut détecter l'accélération sur trois axes (X, Y et Z) et mesurer la vitesse angulaire autour de ces axes. Ce dispositif est utilisé pour suivre le mouvement dans des applications telles que la détection de l'orientation de l'appareil, la détection du mouvement et la mesure de la vitesse angulaire. L'unité d'IMU contient des circuits supplémentaires pour communiquer avec un microcontrôleur ou un autre appareil.

Le MPU6050 offre un suivi précis des mouvements rapides et progressifs. Il comprend un gyroscope programmable par l'utilisateur avec une gamme complète de ± 250 , ± 500 , ± 1000 , et $\pm 2000^\circ/\text{sec}$ (DPS). De plus, il est doté d'un accéléromètre programmable par l'utilisateur avec une gamme complète de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, et $\pm 16g$ [Site web30].

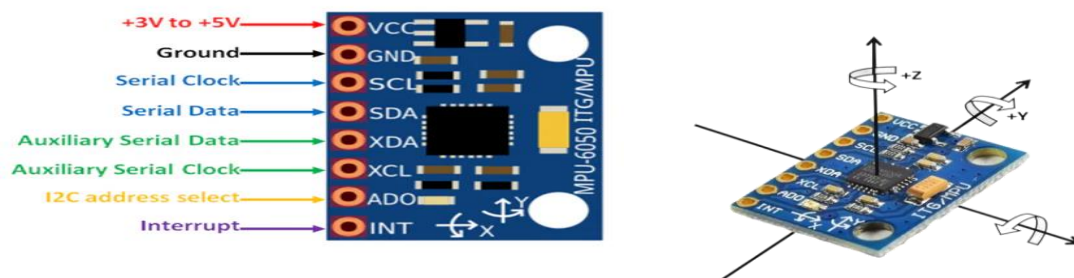


Figure (III.3) : MPU6050

Tableau (III.3) : Caractéristiques de MPU 6050

Caractéristiques	
Régulateur	3,3V embarqué
Interface Interface	I2C
Courant de fonctionnement du gyroscope	3,6 mA
Courant de fonctionnement normal de l'accéléromètre	500 μ A
Fréquence du cristal	32,768 KHz
Alimentation électrique d'entrée	5V
Dimensions	3 x 2 x 1 cm

III.2.4. Rc remote:

Cela représente le nombre d'ondes que vous pouvez envoyer par seconde ou le nombre de canaux disponibles que vous pouvez utiliser en même temps (voir figure 4).



Figure (III.4) : RC remote

Rc remote fonctionne dans la plage de fréquences de, de, à GHz. Cette plage a été divisée en canaux indépendants, et chaque système utilise 16 canaux différents, ainsi que différents types d'algorithmes de saut de fréquence. Conception simple sur l'émetteur pour une facilité d'utilisation.

Ce système sans fil utilise une antenne haute qualité et à gain élevé à polarisation multiple, couvrant toute la gamme de fréquences. Cela garantit une liaison sans fil associée à un récepteur très sensible, une transmission longue portée sans fil, résistant aux interférences.

Chaque émetteur possède une identifiant unique, lors de l'appariement avec un récepteur, ce dernier enregistre cet identifiant unique et ne peut accepter les données que de cet émetteur unique. Cela évite de capter un autre signal d'émetteur et augmente considérablement l'immunité contre les interférences et la sécurité.

Ce système sans fil utilise des composants électroniques à faible consommation d'énergie et une puce réceptrice sensible. La modulation des fréquences sans fil utilise un signal intermittent, réduisant la consommation d'énergie.

Le système AFHDS2A dispose d'une fonction d'identification automatique, qui peut basculer automatiquement entre le mode de communication unidirectionnel et bidirectionnel en fonction des besoins du client.

AFHDS2A dispose d'un codage à canaux multiples et d'une correction d'erreur, améliorant la stabilité de la connexion, réduisant le taux d'erreur et étendant la distance de transmission fiable

[Site web31].

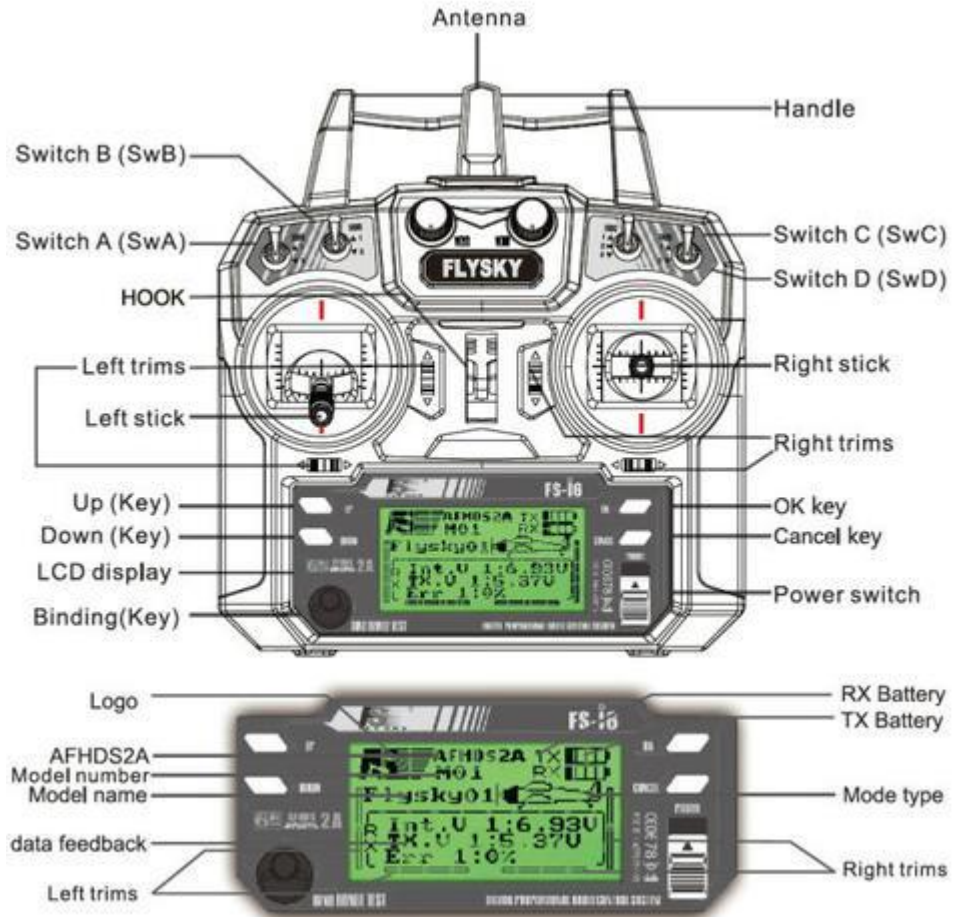


Figure (III.5) : Programmation de la télécommande

Tableau (III.4) : Caractéristique de Rc remote

Caractéristiques	
Canaux	6
Type de modèle	Quadricoptère
Plage RF	2,408 - 2,475 GHz
Largeur de bande	500 kHz
Bande	135
Puissance RF	inférieure à 20 dBm
Protocole	AFHDS 2A
Type de modulation	GFSK
Résolution des manches	4096
Alarme de basse tension	Oui (inférieure à 4,2V)
Port PS2/USB	Oui (Micro-USB)
Alimentation	6V CC 1,4AA*4
Taille	174*89*190 mm

Couleur	Noir
Poids	392 g
Certificat	CE, FCC: N4ZFLYSKYI6

III.2.5. Batterie LiPo 2200 mAh / 35C / 3S:

Les batteries au lithium polymère, connues sous le nom de batteries LiPo, sont un nouveau type de batterie largement utilisé dans de nombreux appareils électroniques grand public. Elles ont gagné en popularité dans l'industrie de la radiocommande ces dernières années et sont désormais le choix le plus courant pour ceux qui recherchent une longue autonomie et une puissance élevée. Les batteries LiPo offrent une gamme étendue d'avantages, mais chaque utilisateur doit décider si les avantages l'emportent sur les inconvénients [Site web32].

Une cellule LiPo a une tension nominale de 3,7V. Pour une batterie de 7,4 V, cela signifie qu'il y a deux cellules en série (ce qui signifie que la tension est ajoutée). C'est pourquoi vous entendrez parfois parler d'une batterie "2S" - cela signifie qu'il y a 2 cellules en série. Ainsi, un pack de deux cellules (2S) a une tension de 7,4 V, un pack de trois cellules (3S) a une tension de 11,1 V, et ainsi de suite [Site web33].

Tableau (III.5) : caractéristique de Batterie LiPo 2200 mAh / 35C / 3S.

Caractéristiques	
Capacité : 2200mAh.	2200mAh.
Tension nominale	3.7V par cellule.
Tension de coupure de charge	4.2V par cellule.
Tension de coupure de décharge	3.0V par cellule.
Technique de charge	Courant continu (CC), Tension continue (CV).
Cycle de vie	≥ 500 fois par cellule (Chaque cycle comprend une charge jusqu'à 4.2V, puis une décharge jusqu'à 3V).
Courant maximal de décharge :	35C, soit $35 * 2.2 = 77A$
- Fils d'équilibrage.	



Figure (III.6) : Batterie Lipo 2200 mAh / 35C/ 3S.

III.2.6. Le châssis F450:

Le F450 est un châssis d'une envergure de 45 cm, fabriqué en fibre de verre de haute qualité et en nylon polyamide, avec des manchons en laiton pré-filetés pour tous les boulons du cadre. Il peut être équipé d'un petit appareil photo numérique ou d'une mini caméra, ce qui permet de réaliser des photographies aériennes (photo ou vidéo) exceptionnelles avec une stabilité professionnelle ! Il supporte des charges au décollage allant de 0,8 à 1,6 kg [MACH20].

Ce kit de châssis F450 comprend :

- 4 bras (très résistants, fabriqués à partir de matériaux d'injection).
- 2 cartes (distribution intégrée).
- Vis de fixation.



Figure (III.7) : Châssis quadrotor F450

Il est facile à assembler et dispose d'un tableau de distribution électrique intégré. Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques de notre châssis :

Tableau (III.6) : caractéristique de châssis F450.

Caractéristiques de F450	
Modèle	F450
Poids du châssis [g]	282
Envergure [mm]	450
Poids au décollage [g]	800 ~ 1600

III.2.7. Prop 10X5X3:

La structure de base de l'hélice comprend trois parties symétriques appelées pales qui tournent autour de leur centre pour créer une poussée. La conception de l'hélice à trois pales affecte son rendement et son comportement dans l'air différemment des hélices à d'autres nombres de pales.

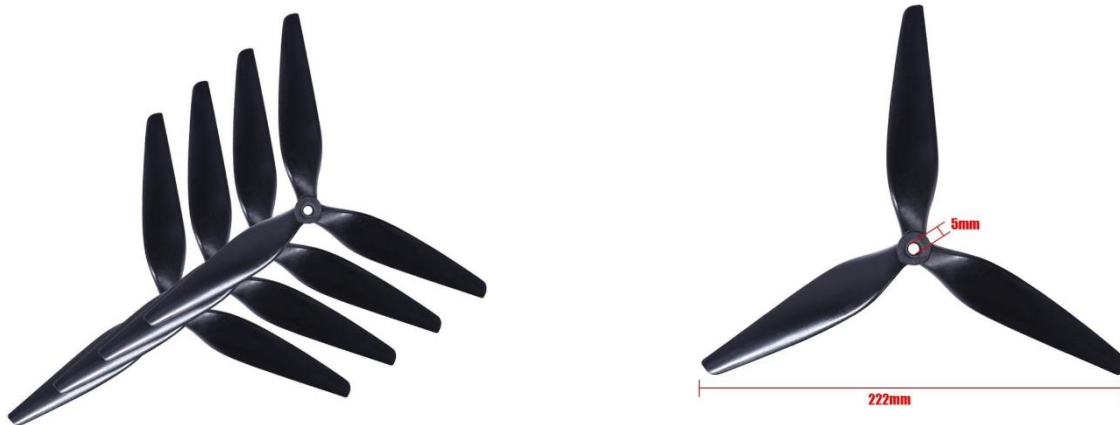


Figure (III.8) : Prop 10X5X3.

Tableau (III.7) : Caractéristique de Prop 10X5X3.

Caractéristiques de Prop 10X5X3	
Diamètre de l'hélice	10 pouces
Pas	5
Pales	3
Poids	23,3 g
Diamètre du moyeu	222 mm
Axe	5 mm

III.3. Carte de contrôle de vol KK2.1.5 (Configuration) :

C'est un dispositif de contrôle de vol conçu pour améliorer votre compréhension des unités de contrôle de vol, en plus de permettre la création d'un accéléromètre et d'un gyroscope. La carte de contrôle de vol KK 2, équipée d'une carte MPU 6050 et d'un microcontrôleur Atmel 644PA, représente la prochaine génération de cartes de contrôle de vol KK. Livrée préchargée avec le firmware KK 2, elle est caractérisée par une technologie de pointe de STMicroelectronics et un système de capteurs InvenSense, offrant des performances exceptionnelles, une flexibilité et une fiabilité pour le contrôle de tout véhicule autonome. De plus, un buzzer piezo est inclus pour les avertissements sonores lors de l'activation et de la désactivation de la carte [Site web34].



Figure (III.9) : Carte de contrôle de vol KK2.1.5.

L'écran LCD et le logiciel intégré rendent l'installation et la configuration plus faciles que jamais. Le système gyroscopique KK a été mis à jour vers un système MPU 6050 très sensible, ce qui rend cette carte KK la plus stable jamais conçue et permet l'ajout d'une fonction d'auto-nivellement. Au cœur du KK 2 se trouve un microcontrôleur Atmel Mega644PA basé sur la technologie AVR RISC et doté de 64 kilo-octets de mémoire[Site web35].

III.3.1. Configuration initiale du KK2.1.X déconnecté du multirotor: Elle s'effectue par les étapes suivantes :

- Retirez le KK2.1.X du multirotor.
- Allumez le KK2.1.X à l'aide d'un pack de batterie 4 cellules ou d'un BEC.
- Sélectionnez la disposition des moteurs souhaitée.
- Sélectionnez le type de récepteur dans les paramètres du mode.
- Si nécessaire, modifiez l'affectation des canaux.
- Éteignez le KK2.1.X.
- Configurez votre émetteur comme un avion simple sans mixage.
- Si nécessaire, associez votre émetteur au récepteur (voir l'annexe C).
- Allumez votre émetteur.
- Connectez le récepteur au KK2.1.X.
- Allumez le KK2.1.X et le récepteur.
- Consultez la section de test du récepteur de ce manuel et configurez-le correctement.
- Éteignez le KK2.1.X et le récepteur.

- Éteignez votre émetteur [Site web36].

III.3.2. Alimentation du KK2.1.X

Le KK2.1.X est équipé de deux bus d'alimentation 5V.

Le premier bus 5V est commun à travers les entrées du récepteur, la sortie 1 (M1) et le port du programmeur. Ce bus alimente le processeur KK2.1.X et doit être aussi propre que possible (c'est-à-dire sans bruit des servos).

Le deuxième bus 5V est commun aux sorties 2 à 8 (M2 à M8) uniquement.

Il ne faut pas connecter les deux bus 5V ensemble car tout bruit sur les sorties 2 à 8 sera alors présent sur l'alimentation du processeur KK2.1.X.

En général, la plupart des ESC n'ont pas besoin d'une alimentation 5V, mais les servos en ont besoin. Par conséquent, si un servo est connecté à M2 à M8, il aura également besoin d'une alimentation 5V.

En général, un ESC avec un BEC 5V sera connecté à M1, ce qui alimente le récepteur et la carte KK2.1.X. Les servos sur le bus 5V M2 à M8 nécessiteront un autre ESC avec un BEC 5V pour être connecté à M2 à M8. Notez que vous pouvez faire fonctionner le bus d'alimentation M2 à M8 à 6V si vous le souhaitez.

En général, seul un BEC doit être connecté à M2 à M8. Dans le cas d'un quadricoptère, vous aurez trois ESC connectés à M2, M3 et M4. S'ils ont des BEC à commutation, leurs fils 5V ne doivent pas être connectés ensemble sur le bus d'alimentation M2 à M8. Par conséquent, retirez les trois fils rouges du connecteur de servo et mettez de la gaine thermorétractable sur chacun d'eux (laissez un BEC sur M2 à M4 si vous avez besoin d'alimenter un servo sur M5, M6, M7 et/ou M8). Les ESC avec des BEC linéaires peuvent laisser le fil 5V dans le connecteur de servo. En cas de doute, retirez le fil 5V.

Certains ESC n'ont pas de BEC interne, vous devrez donc utiliser un UBEC externe. Si vous avez déjà un ESC (sans BEC) branché sur M1, vous avez les options suivantes pour alimenter le KK2.1.X et le récepteur.

- Reliez l'UBEC à un canal récepteur supplémentaire. Cela alimentera le récepteur ainsi que le KK2.1.X via le câble reliant le récepteur et le KK2.1.X.

- Utilisez l'Éditeur de mixage et copiez les réglages de M1 sur M5 (ou sur toute autre sortie de rechange). Connectez l'ESC du moteur 1, que vous auriez normalement connecté à M1 (sortie 1), à la nouvelle sortie moteur que vous venez de configurer. Vous pouvez ensuite connecter votre UBEC à M1.

- Utilisez un câble en Y pour connecter à la fois l'ESC et l'UBEC à M1. Certains ESC sont équipés de BEC à faible courant qui risquent de "faiblir" lorsque de forts courants moteur sont

demandés. Si cela se produit, le KK2.1.X redémarrera, provoquant ainsi un crash. Si vous craignez que cela ne se produise, vous devriez utiliser un UBEC externe et le connecter comme indiqué ci-dessus [Site web37].

III.3.3. Configuration de la carte de vol KK2.1.5 Multi-Rotor:

Nous avons utilisé le firmware "Dualcopter" préinstallé sur la carte. Cependant, nous avons dû le régler selon notre modèle car les paramètres automatiques ne fonctionnaient pas correctement pour notre modèle. En gros, les réglages sont très différents et uniques pour chaque modèle. Sans réglages personnalisés, cette carte ne fonctionnera pas correctement. Afin de rendre notre drone stable et réactif aux perturbations, nous avons ajusté l'éditeur PI et tous les autres paramètres. Le tableau 5.2 montre les valeurs personnalisées que nous avons définies pour stabiliser notre drone [Site web38].

Tableau (III.8) : Configuration de base de la carte KK2.1.5.

ÉLÉMENT DE MENU KK2							
Éditeur PI		Gain P :	Limite P :	I gagne :	I limite :		
	Axe : roulis (aileron)	200	40	0	0		
	Axe : Emplacement (Ascenseur)	200	40	0	0		
	Axe : Yaw (gouvernail)	200	40	0	0		
Test du récepteur	Aileron : 0	Ascenseur : 0	Accélérateur : 0	Gouvernail : 0	Auxiliaire : 0		
Paramètres des modes	Niveau de soi :	Pas de rouleur de lien :	Désarmement automatique :	CPPM :			
Mise à l'échelle du bâton	Rouler (Ail):	Emplacement (élévation) :	Lacet (Rud) :	Manette de Gaz:			
	36	53	52	90			
Divers. Paramètres	Accélérateur minimum :	Dimensions de la hauteur :	Hauteur D. Limite :	Alarme 1/10 Volts :	Filtre d'asservissement :		
	dix	16	30	105	50		

Paramètres de niveau personnel	Gain P :	Limite P :	Rouleau de garniture ACC :	Pas de garniture ACC :			
	90	89	0	0			
Paramètres de prise de vue de la caméra	Gain de rouleur : 0	Décalage de rouleur : 50	Gain de hauteur : 0	Décalage de pas : 50			
Test du capteur	Gyroscope X :	Gyroscope Y :	Gyroscope Z :	ACC X :	ACC Y :	ACC Z :	
Étalonnage ACC							
Paramètres CPPM	Rouler (Ail):	Emplacement (élévation) :	Manette de Gaz:	Lacet (Rud) :	Aux :		
Éditeur de mixage	Manette de Gaz:	Aileron:	Ascenseur:	Gouvernail:	Compenser:	Taper:	Taux:
Ch: 1	100	100	0	0	0	Échap	haut
Ch: 2	100	-100	0	0	0	Échap	haut
Ch : 3	0	0	-100	-75	32	Servomoteur	faible
Ch: 4	0	0	100	-75	49	Servomoteur	faible
Afficher la disposition du moteur	2 1						
Disposition du moteur de charge	Double hélicoptère						

III.3.4. Système de contrôle :

En prenant en considération toutes les perturbations environnementales, nous avons élaboré le système de contrôle de notre UAV. Dans cette section, chaque étape est décrite de manière détaillée. Les figures 2.7, 2.8 et 2.9 illustrent le système de contrôle du roulis, du tangage et du lacet où[Site web39] :

G1 = Fonction de transfert du moteur BLDC gauche

G2 = Fonction de transfert du moteur BLDC droit = G1

G3 = Fonction de transfert du moteur de servo gauche

G4 = Fonction de transfert du moteur de servo droit = G3

PI = Fonction de transfert du régulateur PI

D = Bruit gaussien (perturbations)

F = Rétroaction

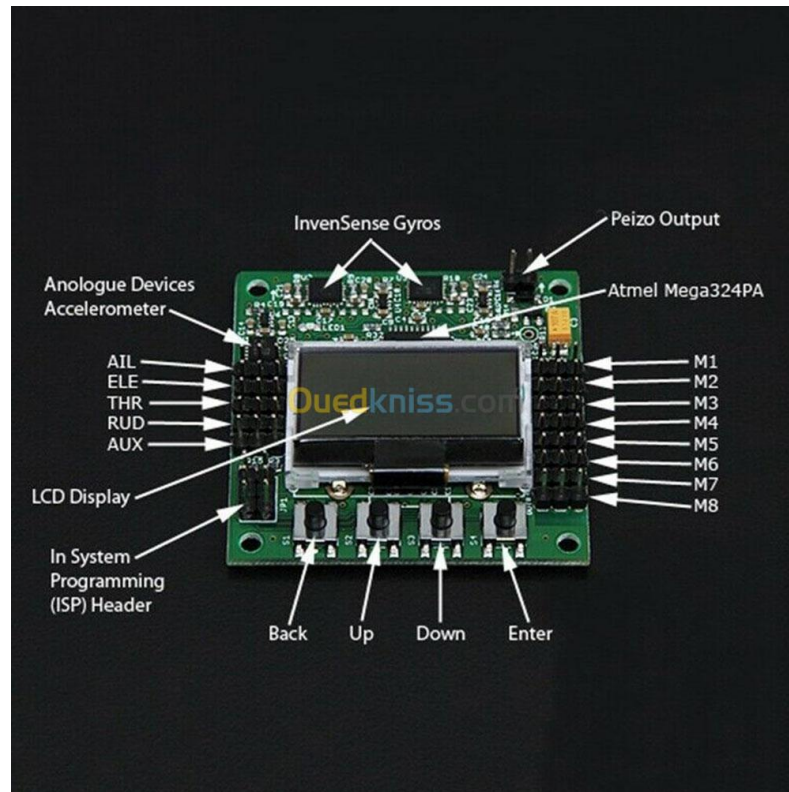


Figure (III.10) : kk2.1.5 Multi-Rotor control board.

Tableau (III.9) : caractéristique de Carte de contrôle de vol KK2.1.5.

Caractéristiques	
Taille	50,5 mm x 50,5 mm x 12 mm
IC	Atmega644
PA Gyro/Acc	6050MPU InvenSense Inc
Auto-nivellement	Oui
Tension d'entrée	4,8-6,0V
Interface AVR	standard à 6 broches
Signal du récepteur	1520 μ s (5 canaux)
Signal vers les ESC	1520 μ s
Version du firmware	V1.19S1 PRO ou OpenAeroVTOL
Interface avr	6 broches standard
Tension d'entrée	4,8-6,0V
Auto-nivellement	oui
Emballage inclus	1 x Carte de contrôle de vol KK2.1.5 Multi-rotor LCD
Poids	21 grammes (avec buzzer piézo)

S1	Firmware préinstallé. Dualcopter Tricopter Y6 Quadcopter + Quadcopter X Hexcopter + Hexcopter X Octocopter + Octocopter X X8 + X8 X H8 H6 V8 V6 Aero 1S Aileron Aero 2S Aileron Flying Wing Singlecopter 2M 2S Singlecopter 1M 4S (Mixage personnalisé via l'option "Mixer Editor") L'éditeur de mixage vous permet d'ajuster où et combien de signal les moteurs reçoivent des entrées de manche et des capteurs. Cela vous permet de créer n'importe quelle configuration possible avec jusqu'à 8 moteurs ou servos.
----	--

Afin d'avoir des bons résultats du drone contrôlé, il faut bien suivre le tableau d'affichage pour régler les paramètres suivants :

- Factory Reset
- Are you sure?
- QuadroCapter x mode
- Are you sure?
- Motor selection
- ACC Calibration
- PI Editor
- P Gain: 65----75
- P Limit: 100---50
- I Gain: 30----40
- I Limit: 20----20
- Reciver Test

Pour améliorer la stabilité du quadricoptère, nous réglons certaines valeurs dans le menu des paramètres. Les étapes des tableaux d'affichage pour configurer tous les moteurs sont présentés dans l'annexe.

III.4.Configuration K.K 2.1.5:

Pour une meilleure stabilité du quadricoptère, nous avons entré certaines valeurs dans le menu des paramètres.



Figure (III.11) : Écran principal du FCU KK 2.1.5

III.4.1. Voici les étapes pour configurer une carte KK2.1.5 avec quatre moteurs dans une configuration en X :

1. Connectez chaque moteur au port approprié sur la carte KK2.1.5. Chaque moteur doit être connecté au port correspondant sur la carte, ce qui signifie que le moteur 1 doit être connecté au port moteur 1, et ainsi de suite.

2. Connectez le gyro (capteur de vol) à la carte.

3. Ensuite, allumez la carte KK2.1.5. Lors de la première mise sous tension, vous devrez fournir quelques informations de base telles que le type de cadre, le nombre de bras, l'orientation de l'aéronef, etc.

4. Une fois les paramètres de base configurés, accédez au menu des réglages (Settings) et sélectionnez l'option "Motor Layout". Ensuite, choisissez "Quad X" comme configuration de moteur.

5. Ensuite, vous devez configurer les connexions correctes pour chaque moteur selon le schéma en X. Cela se fait en modifiant la direction de rotation (Motor Direction) dans le menu des réglages. Assurez-vous que chaque moteur tourne dans la bonne direction pour garantir un fonctionnement correct de l'aéronef.

Suivez ces étapes pour configurer correctement votre carte KK2.1.5 dans une configuration en X avec quatre moteurs.

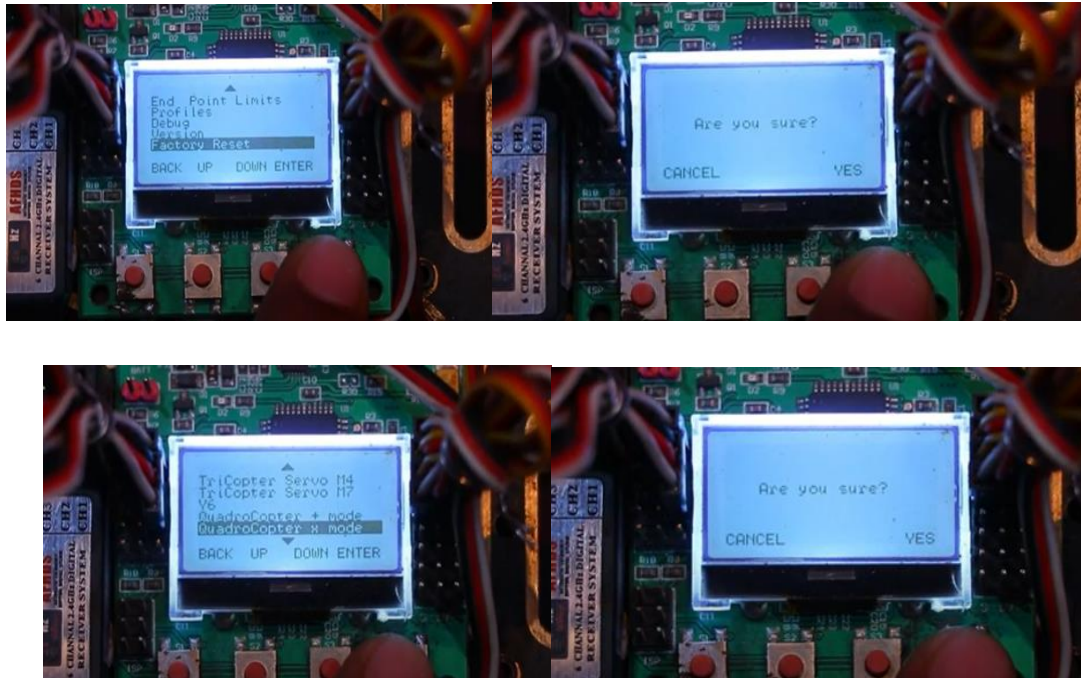
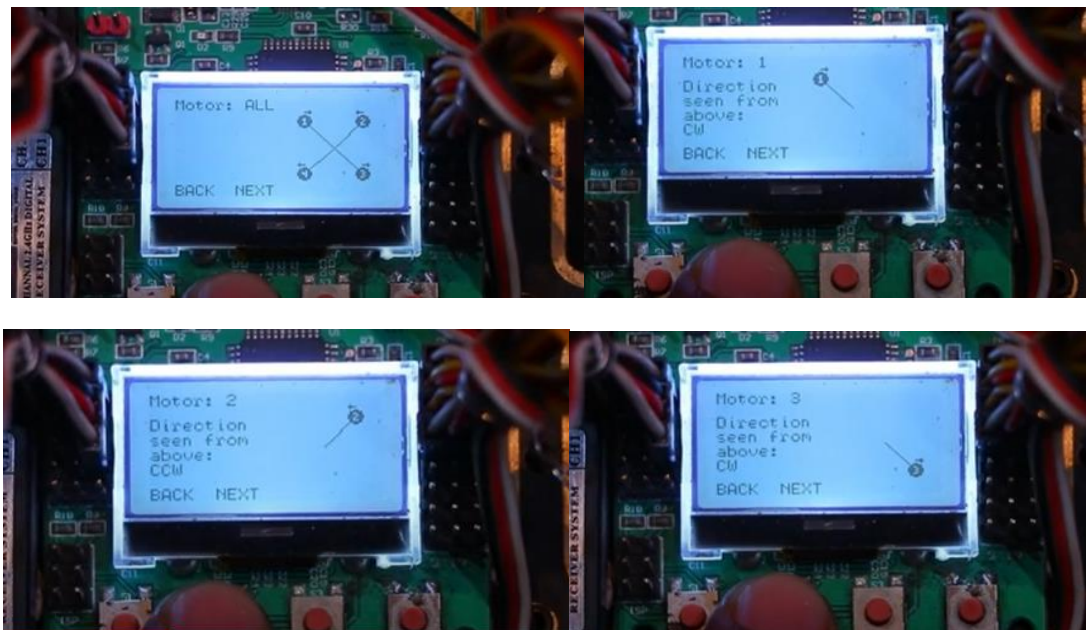


Figure (III.12) : Voici les étapes pour configurer une carte KK2.1.5 avec quatre moteurs dans une configuration en X



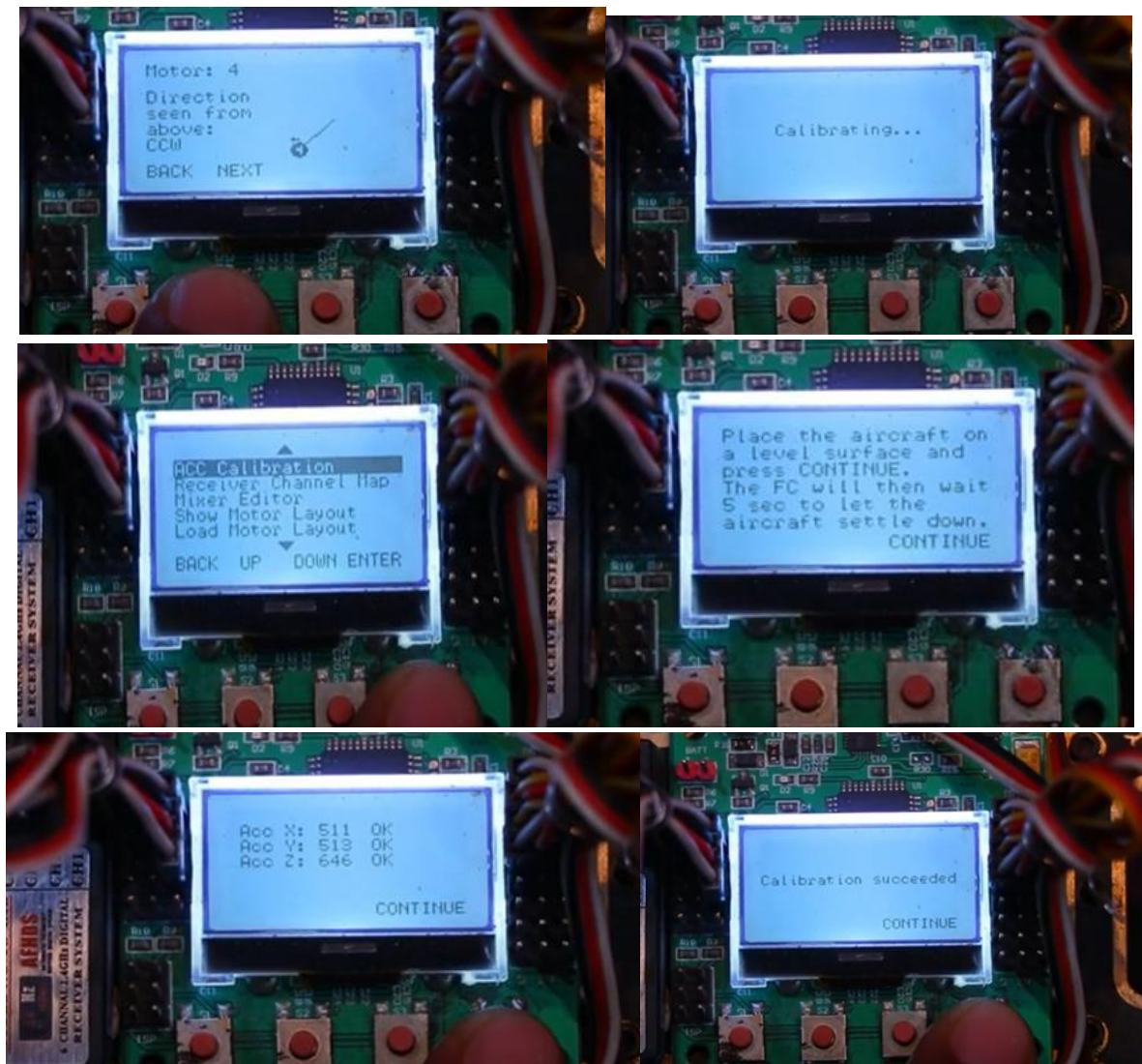
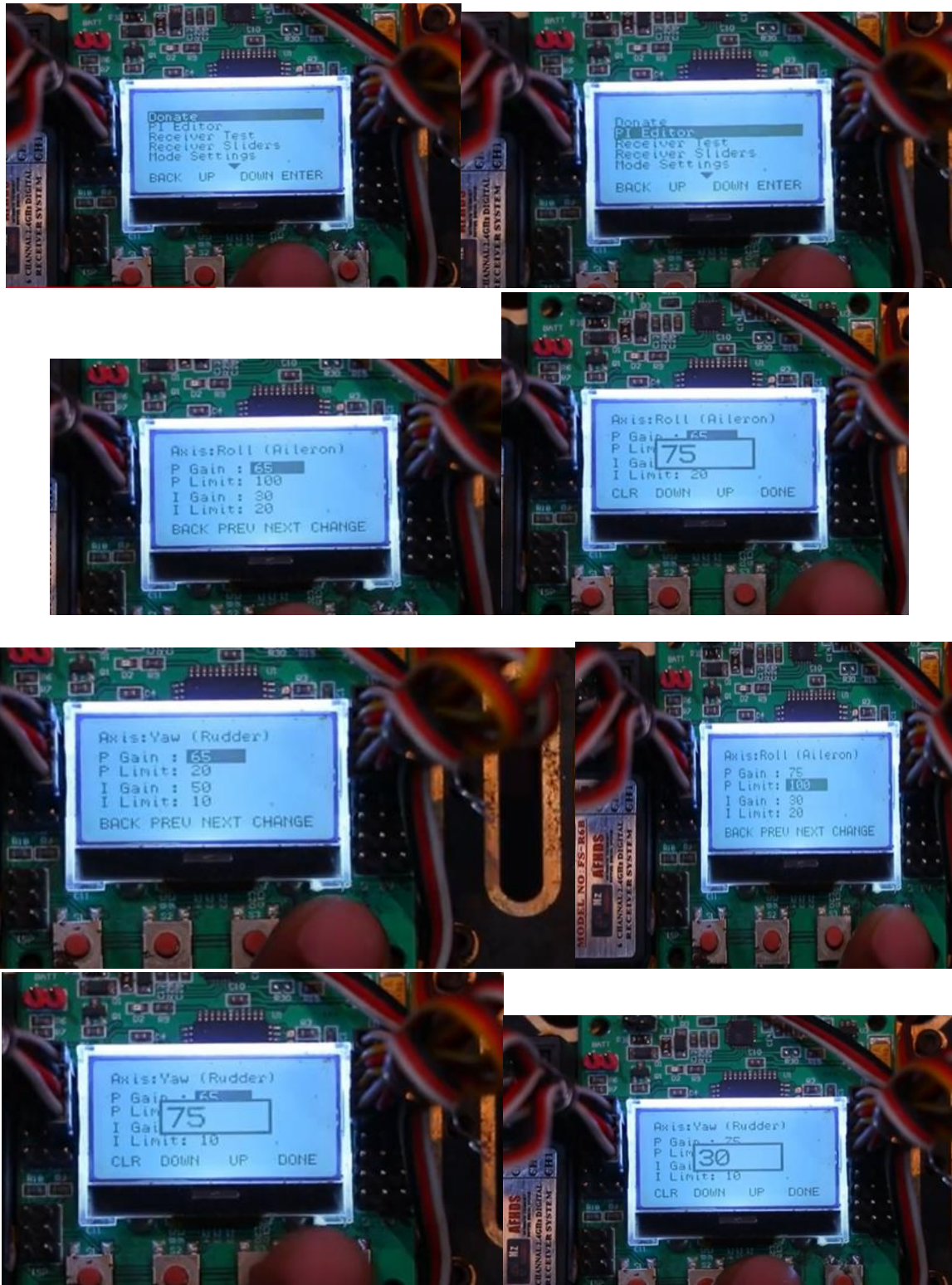
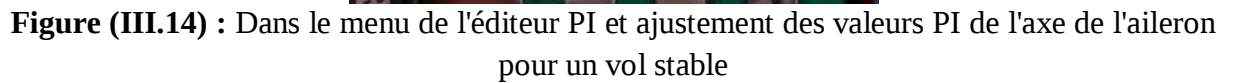


Figure (III.13) : Pour ajuster la direction de rotation des moteurs





I gain: 30 I limit: 10



Figure (III.15) : Toutes les configurations et valeurs ont été ajustées correctement, et tous les paramètres ont été définis

III.4.2 Prototype final du drone quadrirotor:

Nous avons construit le quadricoptère. Après avoir testé le drone pour avoir un équilibre et la stabilité du celui-ci, le quadricoptère a réussi à décoller et prototype est comme suit:



Figure (III.16) : quadcopter

III.5. Conclusion :

Le quadrirotor peut voler dans le ciel jusqu'à une hauteur autorisée et limitée. Il peut être utilisé pour des missions à distance, la photographie aérienne, la sécurité, etc. La capacité de capture des perspectives plus élevées avec des drones est également un excellent moyen de photographier des paysages qui n'ont pas d'éléments en premier plan. Des mesures de sécurité ont été prises lors du vol de ce drone, et une stabilité maximale est visée pour le même. La réalisation du drone dans ce mémoire a une bonne stabilité c'est que nous a permis de le proposer dans les applications citées précédemment. En plus, le réglage se base sur des régulateurs PI qui a des gains

bien précis. On peut dire la conception du drone est adéquat et les parties mécaniques réalisées ont des bons dimensionnements

Conclusion générale

Avec l'achèvement de cette étude sur la réalisation et l'étude de la stabilité d'un drone quadrirotor, nous avons exploré différents aspects essentiels de ce domaine passionnant. À travers trois chapitres distincts, nous avons couvert un large éventail de sujets, allant de l'état de l'art sur les drones à la modélisation et finalement à la construction et la programmation du drone lui-même.

Dans le premier chapitre, nous avons dressé un panorama détaillé de l'état actuel de la technologie des drones, mettant en lumière les avancées récentes, les applications courantes et les défis à relever. Cette revue de la littérature nous a permis de mieux comprendre le contexte dans lequel notre étude s'inscrit, ainsi que les tendances émergentes dans le domaine.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation du drone, où nous avons développé des modèles mathématiques précis pour décrire son comportement dynamique. Ces modèles sont essentiels pour la conception et l'analyse des algorithmes de contrôle qui garantissent la stabilité et les performances souhaitées du drone.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons mis en œuvre nos connaissances acquises pour construire et programmer un drone quadrirotor. Ce processus a nécessité une combinaison d'expertise technique, de compétences en ingénierie et de compréhension approfondie des principes de contrôle et de stabilisation.

En conclusion, cette étude représente une contribution significative à la recherche sur les drones, en mettant l'accent sur la réalisation pratique et l'étude approfondie de la stabilité d'un drone quadrirotor. Nous espérons que les résultats et les enseignements tirés de cette étude seront utiles pour les chercheurs, les ingénieurs et les passionnés travaillant dans ce domaine passionnant et en constante évolution.

Références

- [BEN13] : BEN BOUDAUD Lynda, ALBANE Saadia, « Contrôle d'un groupe d'avions sans pilote (UAVs) », Université A/Mira de Béjaia Faculté des Sciences Exactes Département Informatique, 2013.
- [Site web 01] : <https://www.senat.fr>
- [MAC21] : M. MACHET, Hammou, « Réalisation et Commande D'un Drone Quadrirotor », Thèse de doctorat, Université Ghardaia, 2021.
- [Site web 02] : Robotics | Experts in Man and Machine | Édition 2021
- [Site web 03] : <https://fr.wikipedia.org>
- [MOH 19] : MOHDEB leila«Etude d'une loi de commande Robuste pour le pilotage d'un drone quadri-rotor» Université de Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie Département d'automatique,2019
- [Site web 04]: <https://skyvuesolutions.com>
- [Site web 05]: <https://www.vie-publique.fr>www.dunod.com
- [Site web06]: <https://www.mr.be/wp-content/uploads/2019/10/Etude-CJG-Drones.pdf>
- [Site web07]: <https://dial.uclouvain.be>
- Miloudi Benyahia BENMOUHOHB IHAB, DELADJI HOCINE «Etude de stabilité d'un drone quadrirotor», Université 8Mai 1945 – GuelmaFaculté des sciences et de la Technologie Département d'Electronique et Télécommunications,2021
- [Site web 08]: <https://www.vie-publique.fr>
- [Site web 09]: [https:// www.iaminnovation.center](https://www.iaminnovation.center)
- [Site web10]: <https://www.memoireonline.com>
- Miloudi Benyahia Bouhadjela Rabah, Ali Louzri«Etude Structural D'un Drone (UAV) En Matériaux Composite», Université SAAD Dahleb de BlidaFaculté des Sciences de l'ingénieur Département D'Aéronautique,2009
- [Site web11]: <https://www.files.ethz.ch>
- [Site web12]: <https://www.dunod.com>
- [Site web13]: www.entreprises.gouv.fr
- [MIL19]: Miloudi Benyahia«Commande et réalisation de l'équilibre d'un drone birotor», L'institut d'Aéronautique et des études spatialesDépartement Des études spatiales,2019

[KAM19]: KAMEL BOUDJIT «Contribution à l'Etude des Commandes Multi-Moteurs en Temps Réel », ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, Thèse de Doctorat En Electronique,2019

[Site web15]: https://www.irsem.fr/data/files/irsem/documents/document/file/739/ADA_393.pdf

[Site web14]: <https://core.ac.uk/download/pdf/33801945.pdf>

[Site web16]: https://www.cairn.info/load_pdf.php?download=1&ID_ARTICLE=STRAT_105_0145

[ZIO20]: Abderrezzag ZIOU, «Réalisation d'un système de suivi d'objets basé sur les Drones», Université de 8 Mai 1945 – Guelma -Faculté des Mathématiques, d'Informatique et des Sciences de la matière Département d'Informatique,2020

[Site web17]: <https://www.drone-malin.com/pages/en-savoir-plus/questions-reponses/quels-sont-les-avantages-d-utiliser-un-drone.html>

[Site web18]: https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/14713/1/SELLAOUI_DHIYA%20EDDINE_F1.pdf

[AMR20]: Amrani Mohamed, Ounissi Nasreddine, «Etude et réalisation d'un drone quad » Université 8 Mai 1945 – GuelmaFaculté des Sciences et de la TechnologieDépartement d'Electronique et Télécommunications2020

[HAM]: Hamdanide Samir, , «Suivi de trajectoire d'un drone type quadri rotor approche par modèles flous

Takagi- Sugeno, » , UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOUFACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUEDEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

[Site web19]:<https://fr.scribd.com>.

[Site web20]:<https://www.apprendre-en-ligne.net>.

[Site web21]: Laïb and D.E. Maamria, "Commande d'un Quadrirotor". Mémoire d'ingénieur. École

Nationale Polytechnique, Alger. 2011

[Site web22]:A. Kadi. "Mécanique Rationnelle Cours et exercices résolus". (Pages 222-225). Université M'hamed Bougara, Boumerdès .

[Site web23]:Sedini Chahrazed et Cherigui Nasre-Eddine "Conception et commande d'un quadrirotor UAV à base d'Arduino". Mémoire de Master. Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

2018/2019.

- [Site web24]:Boughrara Samira Kawther et Boutrigue Sarah "Synthèse de régulateur PID pour un quadrirotor et génération de carte en fonction de l'indice de végétation". Mémoire de Master. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. 2019/2020.
- [Site web25]:S. Bouabdallah. "Design and Control of Quadrirotors with Application to Autonomous Flying".Thèse de Doctorat. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. 2007.
- [Site web26]: Mohammedi Feriel et Irbah Nouria "Conception d'un autopilote pour drone léger type quadrirotor". Mémoire de Master. Université Saad Dahleb de Blida 1. 2018/2019.
- [Site web27]:H.Khebbache. "Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires Application : Systeme UAV de type Quadrirotor". Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas de Setif. 2012
- [Site web28]:H. Bouadi, M. Bouchoucha, and M. Tadjine “Modelling and Stabilizing Control Laws Design Based on Sliding Mode for an UAV Type-Quadrirotor ”. Engineering Letters, London, England, Vol. 15, No. 2, pp. 15-24. 2007.
- [Site web29] : www.getfpv.com site web.
- [OUL20]: . OULD AMARA Nabil le boss ,SI SALAH Mohamed Salim la poufiassa,OURIACHI Massinissa, «CONCEPTION ET FABRICATION D’UN E-KART »UNIVERSITE DE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU,2020/2021
- [Site web30]: www.powertech-dz.net.
- [Site web31]: <https://fr.aliexpress.com>.
- [Site web32]: <https://www.securitepublique.gouv.qc.ca>.
- [Site web33]: <https://ca-marcy-savigny.fr>.
- [MACH20]: Machet Hammou,«Réalisation et Commande D’un Drone Quadrirotor » ,Université de Ghardaïa,2020-2021.
- [Site web34]: <https://fr.scribd.com>.
- [Site web35]: <https://www.algeria.ubuy.com>.
- [Site web36]: <https://www.calameo.com>.
- [Site web37]: <http://blog.gehan.simply-webspace.fr>.

[Site web38]: <https://www.powertech-dz.net>.

[Site web38]: <https://theses.hal.science>.

[Site web39]: <https://fr.scribd.com/document/655017977/BrakniImene-AkkouDehbia>.

[Site web40]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Quadrirotor>.