

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث  
العلمي

المدرسة العليا في العلوم  
التطبيقية  
-تلمسان-

## Mémoire de fin d'étude

### Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Automatique  
Spécialité : Automatique

Présenté par : **Mr. LAMRI Sofiane et Mr. MOHAMMEDI Ahref**

Thème

## Contribution à l'étude et réalisation d'un Quadrotor hybride UAV/UGV

Soutenu publiquement, le 01 / 10 /2020, devant le jury composé de :

Mme. DIDI Ibtissem	Maître de Conférences	ESSA. Tlemcen	Présidente
Mr.MEGNAFI Hicham	Maître de Conférences	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. BOUZID Yasser	Maître de Conférences	Ecole Militaire polytechnique EMP. Alger	Co-Directeur de mémoire
Mr. ABDELLAOUI Ghouti	Maître de Conférences	ESSA. Tlemcen	Examineur
Mr. ABDI Sidi Mohammed	Maître de Conférences	ESSA. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2019 / 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# **Dédicace**

*Je dédie ce travail:*

*A mes Parents, que le Dieu me les gardes,*

*A mes frères et ma sœur,*

*A la Mémoire de mon grand père et ma grande mère,*

*A tout les membres de ma Grande Famille*

*A tout mes amis, Ahcen, stillo, ....*

**LAMRI Sofiane**

*Je dédie ce travail:*

*A mes Parents, que le Dieu me les gardes,*

*A mes frères et ma sœur,*

*A la Mémoire de mon grand père et ma grande mère,*

*A tout les membres de ma Grande Famille*

*A tout mes amis, Bilel , Momo, Oussama ....*

**MOHAMMEDI Achref**

# **Remerciements**

*Nous remercions ALLAH, le tout puissant, pour nous avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de notre chemin, durant toutes nos années d'études.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos enseignants de L'ESSA Tlemcen, notamment à nos promoteurs Mr. MEGNAFI Hicham et Mr. BOUZID Yasser, d'avoir proposé le sujet sur lequel nous avons travaillé, et qui ont assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements à Mr. BOUZID Yasser, d'avoir bien voulu de nous faire profiter pleinement de ces compétences scientifiques et de ses idées pour l'accomplissement de ce travail. Aussi le chef de laboratoire Mr. GUIATNI Mohammed et tous les membres de l'école militaire polytechnique.*

*Nous tenons notamment, à adresser l'expression de notre sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen Mr. ABDELLAOUI Ghouti et Mr. ABDI Sidi Mohammed et Mme DIDI Ibtissem, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.*

*Cette page ne serait être complète sans remercier nos meilleurs collègues et frères : Mr. NAMAN Amar et Mr. BOUCETTA Yahia, sans leurs soutiens nous n'aurons sûrement pas pu mener à bien ce mémoire.*

*Enfin, nos remerciements vont à tous ceux qui nous ont soutenu de près ou de loin à réussir ce travail.*

*Nos vives salutations.*

---

## Résumé

Ce memoire est dédiée a l'étude et la réalisation d'un drone de type quadrotor hybride dont la spécificité est de pouvoir voler aussi bien que se déplacer sur le sol. Ce concept hybride permet d'économiser les batteries lorsqu'il n'est pas nécessaire de voler puisque le drone profite des surfaces planes pour se déplacer sans avoir à compenser la gravité. Nous avons fait l'étude sur les drones hybrides air-sol, puis nous avons développé mathématiquement les modèles dynamiques qui caractérisent les mouvements pour la navigation aérienne et terrestre. Grace à logiciel Matlab et à la commande backstepping, nous avons réussi de simuler nos deux modèles avec quelque scenarios de mouvement. Ces derniers nous permettent de réaliser un drone hybride selon un prototype de notre choix pour la partie hardware et aussi software, et nous avons fini par les différents essaies effectués pour tester notre engin.

**Mots clés :** Drone hybride, Drone air-sol, Robot.

---

## Abstract

This thesis is dedicated to the study and the realization of a hybrid quadrotor type drone whose specificity is to be able to fly as well as to move on the ground. This hybrid concept saves batteries when it is not necessary to fly since the drone takes advantage of flat surfaces to move without having to compensate for gravity. We did the study on hybrid air-ground drones, then we developed mathematically the dynamic models that characterize the movements for air and land navigation. Thanks to Matlab software and the backstepping command, we managed to simulate our two models with some movement scenarios. These allow us to make a hybrid drone according to a prototype of our choice for the hardware part and also the software, and we ended up with the various tests carried out to test our machine.

**Keywords :** Hybrid Drone, Air-to-Ground Drone, Robot.

---

## ملخص

---

هذه الأطروحة مخصصة لدراسة وتحقيق طائرة بدون طيار هجينة من النوع الرباعي والتي تتمثل خصوصيتها في القدرة على الطيران وكذلك التحرك على الأرض. هذا المفهوم الهجين يوفر البطاريات عندما لا يكون من الضروري الطيران لأن الطائرة بدون طيار تستفيد من الأسطح المسطحة للتحرك دون الحاجة إلى تعويض الجاذبية. قمنا بالدراسة على الطائرات الهجينة جو-أرض ، ثم طورنا رياضياً النماذج الديناميكية التي تميز حركات الملاحة الجوية والبرية. بفضل برنامج Matlab وأمر backstepping ، تمكنا من محاكاة نموذجين مع بعض سيناريوهات الحركة. يسمح لنا ذلك بصنع طائرة بدون طيار هجينة وفقاً لنموذج أولي من اختيارنا لجزء الأجهزة وأيضاً البرنامج ، وانتهى بنا الأمر مع الاختبارات المختلفة التي تم إجراؤها لاختبار أجهزتنا.

**الكلمات الرئيسية:** طائرة بدون طيار هجينة ، طائرة بدون طيار جو-أرض ، روبوت ،

# Table des matières

DEDICACE	
REMERCIEMENT	
RESUME	I
ABSTRACT	II
ملخص	III
LIST DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX	V
ABRIVIATION	VI
INTRODUCTION GENERALE	1
1 L'état de l'art des drones	4
Introduction . . . . .	5
1.1 Definition . . . . .	5
1.2 Historique des drones . . . . .	5
1.3 Classification des UAVS . . . . .	7
1.3.1 Classification selon la taille . . . . .	8
1.3.2 Classification selon le mode de propulsion . . . . .	10
1.4 Drones hybride . . . . .	15
1.4.1 Les drones hybrides air sol . . . . .	16
1.4.2 Application des drones hybrides . . . . .	19
1.4.3 Les limits des drones conventionnels . . . . .	20

<b>Conclusion</b>	<b>21</b>
<b>2 Conception du drone hybride</b>	<b>22</b>
Introduction . . . . .	23
2.1 Description general . . . . .	23
2.2 Conception de premier prototype . . . . .	24
2.2.1 Architecture matérielle . . . . .	24
2.2.2 Châssis Hobbyking SK450 . . . . .	24
2.2.3 Moteur DC Brushless . . . . .	25
2.2.4 Contrôleur électronique de vitesse (ESC) . . . . .	25
2.2.5 Contrôleur de vol Pixhawk . . . . .	26
2.2.6 Les Hélices . . . . .	28
2.2.7 Batterie Lithium (LiPo) . . . . .	29
2.2.8 Radio Contrôleur (Futaba RC) . . . . .	30
2.2.9 Récepteur radio . . . . .	30
2.2.10 Arduino MEGA 2560 . . . . .	31
2.2.11 Shield L298P . . . . .	32
2.3 Softwares utilisés . . . . .	33
2.3.1 Mission planner . . . . .	33
2.3.2 Logiciel SOLIDWORKS . . . . .	34
2.3.3 L'éditeur ARDUINO . . . . .	35
2.3.4 Logiciel MATLAB . . . . .	36
2.4 Caractéristiques du véhicule . . . . .	37
Conclusion . . . . .	38
<b>3 Modelisation et simulation du drone hybride</b>	<b>39</b>
Modelisation du drone hybride . . . . .	40
3.1 Modelisation . . . . .	40
3.1.1 Mode aerien . . . . .	40
3.1.2 Effets physiques agissants sur le quadrotor . . . . .	43
3.1.2.1 Les forces . . . . .	43
3.1.2.2 Les moments . . . . .	44
3.1.2.3 Effet gyroscopique . . . . .	45

3.1.3	Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler . . . . .	46
3.1.4	Equations de mouvement de translation . . . . .	48
3.1.5	Equations de mouvement de rotation . . . . .	48
3.1.6	Représentation d'état du système . . . . .	50
3.2	Mode terrestre . . . . .	52
3.2.1	Géométrie de robot . . . . .	52
3.2.2	Modèle cinématique du robot . . . . .	52
3.3	Simulation . . . . .	53
3.3.1	Commande par backstepping de notre systeme . . . . .	53
3.3.1.1	Synthèse des lois de commande pour le quadrotor . . . . .	53
3.3.2	Mode de navigation aérienne . . . . .	54
3.3.3	Mode de navigation terrestre . . . . .	57
3.4	Simulation numerique . . . . .	58
3.4.1	Mode aérien . . . . .	58
3.4.1.1	Vol linéaire . . . . .	58
3.4.2	Mode terrestre . . . . .	62
	Conclusion . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Realisation de notre vehicule hybride</b>	<b>65</b>
	Introduction . . . . .	66
4.1	Principe globale de fonctionnement . . . . .	66
4.2	R . . . . .	68
4.2.1	La réalisation de quadrotor . . . . .	68
4.2.1.1	Assemblage complet de drone . . . . .	68
4.2.1.2	La structure générale (complète) de notre drone quadrotor . . . . .	71
4.2.1.3	Configuration et calibrage . . . . .	71
4.2.1.4	Les tests effectués sur terrain . . . . .	76
4.2.2	La réalisation du robot . . . . .	77
4.2.2.1	Matérielles utilisés . . . . .	77
4.2.2.2	Le câblage : . . . . .	79
4.2.3	Le dernier montage et testes finaux : . . . . .	80
	Conclusion . . . . .	83
	Conclusion general . . . . .	84

Annexe . . . . .	86
Bibliographie . . . . .	89

# Table des figures

1.1	a) modèle de Vinci – b) toupie Chinoise . . . . .	6
1.2	Pigeon George Cayley . . . . .	6
1.3	Le Global hawk . . . . .	8
1.4	a) Predator - b ) Eagle 1 . . . . .	9
1.5	a ) Dragon Eye - b ) Hovereye . . . . .	9
1.6	PicoFlyer (ProxyFlyer) . . . . .	9
1.7	dirigeable . . . . .	10
1.8	La libellule artificielle . . . . .	11
1.9	Avion 3D . . . . .	12
1.10	hélicoptère classique . . . . .	12
1.11	a) tricopter - b) vectron - c) hélicoptère auto stable . . . . .	14
1.12	Quadrotor . . . . .	15
1.13	Des drones hybrides air-sol : (a) quadruple chasseur de char , (b) robot DALER , et (c) MALV . . . . .	16
1.14	Drones hybrides air-eau : (a) Hydroptère perroquet , (b) Drone de l’université Rutgers, (c) HexH20 , et (d) AquaMAV. . . . .	16
1.15	Quadroller roulant à l’extérieur. . . . .	17
1.16	FSTAR est un robot nouvellement développé qui peut s’étendre sur ses jambes et en bas. . . . .	18
1.17	Quadcopter air-sol . . . . .	18
2.1	Châssis SK450 . . . . .	25
2.2	Moteur DC Brushless . . . . .	25
2.3	(ESC) Contrôleur électronique de vitesse . . . . .	26
2.4	autopilote PIXHAWK . . . . .	27
2.5	Hélices 12 pouces . . . . .	28
2.6	Batterie Lipo 7.4v 1100 mAh . . . . .	29

2.7	Radio Contrôleur (Futabarc) . . . . .	30
2.8	Emetteur-récepteur Futaba . . . . .	31
2.9	Arduino MEGA 2560 . . . . .	32
2.10	Shield L298P . . . . .	33
2.11	Interface Mission planner . . . . .	34
2.12	Conception du quadrotor par solidworks . . . . .	35
2.13	Conception de la partie du robot par solidworks . . . . .	35
2.14	Conception du véhicule hybride(quadrotor +robot)par solidworks . . . . .	36
2.15	deuxième conception . . . . .	36
3.1	Géométrie du quadrotor . . . . .	41
3.2	Paramétrisation de l'orientation du drone dans l'espace. . . . .	42
3.3	Identification du sens de rotation des rotors . . . . .	46
3.4	Paramètres du robot . . . . .	52
3.5	Illustration de la structure de commande du quadrotor . . . . .	54
3.6	Schéma synoptique de la proposition contrôleur . . . . .	54
3.7	Illustration de la structure de commande du quadrotor par bachstepping . . . . .	56
3.8	Poursuite des commandes en vol linéaire . . . . .	60
3.9	Poursuite des positions angulaires en vol linéaire. . . . .	61
3.10	Poursuite de position en vol linéaire . . . . .	61
3.11	La trajectoire effectuée en 3D . . . . .	62
3.12	Présentation du robot sur matlab . . . . .	63
3.13	Navigation du robot dans un terrain . . . . .	63
3.14	Les mouvements principaux du robot . . . . .	64
4.1	Mécanisme de fonctionnement de quadrirotor . . . . .	66
4.2	Mécanisme de fonctionnement de quadrirotor . . . . .	67
4.3	Différents composants de drone . . . . .	69
4.4	Le soudeur des ESCs . . . . .	69
4.5	Le pixhawk . . . . .	70
4.6	Les Entrées/Sorties d'un PixHawk . . . . .	71
4.7	état finale du drone . . . . .	71
4.8	Configuration du débit . . . . .	72

---

4.9	Chargement du firmware . . . . .	73
4.10	Chargement terminé . . . . .	73
4.11	Choix du type de quadrotor . . . . .	74
4.12	Configuration du compas . . . . .	74
4.13	Calibrage d'accéléromètre . . . . .	75
4.14	Calibration de la radio-commande . . . . .	76
4.15	Les premiers tests . . . . .	76
4.16	Les tests finaux de drone . . . . .	77
4.17	Les tests finaux de drone . . . . .	77
4.18	Les tests finaux de drone . . . . .	78
4.19	Moteur pour un roue motrice . . . . .	78
4.20	Les roues motrices . . . . .	79
4.21	Le contrôle du robot avec joystick . . . . .	79
4.22	le contrôle du robot avec joystick . . . . .	80
4.23	a,b : Le contrôle du robot avec la radio commande . . . . .	80
4.24	a,b : Le contrôle du robot avec la radio commande . . . . .	81
4.25	a,b : La conception de l'interface de combinaison par solidworks . . . . .	81
4.26	a,b : La conception de l'interface de combinaison par solidworks . . . . .	82
4.27	a,b : La conception de l'interface de combinaison par solidworks . . . . .	83

# Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques du PixHawk . . . . .	28
2.2	Fiche technique de arduino mega . . . . .	32
2.3	caractéristiques du quadrotor . . . . .	38
3.1	Les paramètres du quadrotor . . . . .	59

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

**APM** :Automated People Mover  
**AC**:AlternativCurrent  
**AT&T** :AmericanTelephone and Telegraph  
**CG** :Center of Gravity  
**CAO**:Conception Assistée par Ordinateur  
**DARPA** :Defense Advanced ResearchProjects Agency  
**DHL** :Dalsey, Hillblom and Lynn  
**DC** :Direct Current  
**EEPROM** :ElectricallyErasableProrammmable Read-Only Memory  
**ESC** :Electrical Speed Controller  
**E/S** : Entrer / Sortie  
**EDI**: espace de développement intégré  
**FWMAV** :Flappingwing micro airvehicle  
**GCS** :GROUND CONTROL STATION  
**GPS** : GlobalPositining System  
**HYTAQ** :HybridTerrestrial and Aerial Quadrirotor  
**HTOL** :Horizontal Take-Off and Landing  
**ICSP** : in-circuit serial programming  
**LSB** :bulle de séparation laminaire  
**LTE** : Long Term Evolution  
**LIPO** :Lithium Polymer  
**MAV** :Micro air vehicle  
**MALV** :Miniature Air-LaunchedVehicle  
**NASA** :National Aeronautics and Space Administration  
**NAV** :Nano Air Vehicle  
**NOTAR** :no tail rotor  
**OTAN** :Organisation du Traité de l'Atlantique Nord  
**PWC** : PricewaterhouseCoopers  
**PWM** :Pulse-Width Modulation  
**PAV** :Personal Air Vehicle  
**RAM** :Random Access Memory  
**RTL** : Return-to-lancement  
**RC** :Radio Systems

**RAND** :AMERICAN RESEARCH AND DEVELOPMENT

**RPA** :Roboticprocess automation

**STOL** :Short Take-Off & Landing

**SQL** :StructuredQueryLanguage

**TTL** :Transistor–transistor logic

**UAV** :Unmanned Aerial Vehicle

**UGV** :unmannedgroundvehicle

**UAS** :Unmannedaircraft system

**USAAF** :United States Army Air Forces

**URSS** Union des républiques socialistes soviétiques

**USB** :Universal Serial Bus

**UART** :universalasynchronousreceiver-transmitter

**VTOL** :vertical take-off and landing

**3D** :ThreeDimensional

**2D** : two-dimensional

# Introduction générale

Au cours de ces dernières années, le monde a connu des avancements technologiques dans des différents domaines tels que la robotique, l'automatisation et l'aéronautique.

De nombreuses applications potentielles ont suscité un intérêt croissant pour les engins volants à voilures tournantes « les hélicoptères » dont la sustentation et la propulsion sont assurées par la rotation d'une ou plusieurs voilures tournantes « les rotors ». Un UAV ou drone est défini comme un robot volant sans pilote. Il peut être contrôlé de manière semi-autonome ou complètement autonome. Son utilisation est principalement militaire pour des missions de reconnaissance ou de surveillance.

Les quadrotors qui sont partie des systèmes multi-rotors sont l'objet de ce mémoire. Ces quadrotors sont des robots volants ayant quatre rotors placés à l'extrémité d'une croix qui sont contrôlées en agissant sur les vitesses de rotation des quatre rotors. En effet, le problème des quadrotors est lié à leur dynamique fortement non linéaire et totalement couplée, d'où la nécessité d'une approche de contrôle puissante pour assurer la stabilité et la robustesse, ainsi pour assurer un suivi parfait des trajectoires souhaitées.

Les études de la commande des robots mobiles à roues remontent aux années 80. Ces robots mobiles sont destinés à réaliser les tâches considérées comme pénibles ou les tâches s'accomplissant dans des milieux hostiles à l'être humain comme les milieux marin (tel que la recherche de la boîte noire des avions), spatiale (tel que l'exploration planétaire), etc. Le robot peut aussi être utile dans le domaine médical pour compenser les handicaps physiques.

En raison de la limitation de ses deux engins pour la navigation et pour les problèmes énergétiques des drones, on doit intéresser par un autre choix des véhicules qui s'appellent les véhicules hybrides (UAV/UGV).

Il en découle le besoin de véhicules hybrides capables de surmonter les problèmes énergétiques et aussi avoir une plus grande adaptabilité. Lors de la conception de ces nouveaux véhicules, il est également nécessaire de concevoir l'algorithme de contrôle pour la position ou le suivi dans chaque mode de fonctionnement. La conception d'un véhicule doit être telle que les performances de chaque mode de locomotion soient égales ou presque égales à un véhicule à stratégie de locomotion unique.

L'objectif de ce travail est d'étudier les drones et les drones hybrides, puis faire la conception hardware et software de notre prototype, modéliser et simuler notre système pour les deux modes de navigation (navigation aérienne et terrestre) et construire un véhicule hybride air-sol

facile à naviguer en mode terrestre et aérien, et en même temps résistant à des atterrissages un peu brutaux.

Ce manuscrit se décompose en quatre chapitres qui sont introduits brièvement dans les paragraphes suivants :

**Chapitre 1 :** Ce chapitre est une présentation sur les drones conventionnels et convertible. Nous parlerons sur l'historique des drones, ensuite nous montrons ses classifications selon plusieurs critères, aussi nous parlerons sur les différentes applications et quelques limites des drones conventionnelles et nous terminerons par une conclusion.

**Chapitre 2 :** Ce chapitre comporte quatre titres essentiels, le premier titre concerne la description générale de notre système. Le deuxième titre comporte la partie hardware c'est-à-dire l'architecture matérielle pour réaliser le véhicule. Pour le troisième titre, nous concentrerons sur la partie software c'est-à-dire les différents logiciels qui nous permettent de commander, configurer et simuler nos différents codes. Puis, dans la quatrième titre, nous présenterons une nouvelle conception qui a été souhaité de réaliser , puis nous terminerons par une conclusion.

**Chapitre 3 :** Dans ce chapitre, nous ferons la modélisation de notre véhicule pour extraire le model dynamique pour les deux modes de vol. Ensuite, nous synthétiserons une loi de commande (backstepping) pour simuler le modèle dynamique par la création des différents scénarios possible qui caractérisent les deux modes de déplacement (déplacement aérien et terrestre) , nous interpréterons les résultats de simulation et nous terminerons par une conclusion.

**Chapitre 4 :** Dans le quatrième chapitre nous parlerons sur la réalisation de notre véhicule, depuis la familiarisation de matérielle jusqu'à le test final en passant par toutes les étapes en détails. Nous terminerons par une conclusion.

# Chapitre 1

## L'état de l'art des drones

## Introduction

Les drones sont des engins volants capables de transporter des caméras, des capteurs, des équipements de communications ou d'autres dispositifs. Ils sont utilisés pour réaliser des missions de reconnaissances, de recherche d'informations ou des opérations militaires. Ce chapitre consiste à présenter les drones et leurs classifications selon des critères, puis nous allons nous concentrer sur les drones hybrides air-sol et ses applications.

### 1.1 Définition

Le mot drone est un terme militaire d'origine anglaise qui signifie le bourdon ou bourdonnement en référence au bruit que font certains d'entre eux en volant, appelé aussi « UAV : Unmanned Aerial Vehicle », soit « véhicule aérien sans pilote » ou « UAS : Unmanned Aerial System », soit « système d'aéronef(s) sans pilote(s) ». L'organisation de l'aviation civile internationale a quant à elle retenu l'appellation « RPA » (pour « Remotely Piloted Aircraft », soit « avion piloté à distance »). L'OTAN (Organisation du Traité de l'Atlantique Nord), définit les UAVs comme : « un véhicule aérien motorisé, qui ne transporte pas d'opérateur humain, utilise la force aérodynamique pour assurer sa portance, peut voler de façon autonome ou être piloté à distance, être non réutilisable ou récupérable et emporter une charge utile qui lui permet de réaliser des missions diverses et variées [1].

### 1.2 Historique des drones

Le monde des drones est très vaste et très important, c'est pour cela que ses appareils ont vu plusieurs changements et modifications dans la forme et dans ses différentes composantes pour arriver toujours à un appareil moderne qui va bien avec les derniers développements technologiques de ce domaine. Premièrement, c'est les chinois qui ont inventé le premier jouet qui s'élevait en le faisant tourner rapidement entre les mains, dit « toupie chinoise » illustré sur Figure I.1. En 1480, Léonard de Vinci avait dessiné une machine, sorte de vis aérienne, dont la voilure tournait autour d'un axe vertical comme il est illustré sur Figure 1.1 [2].

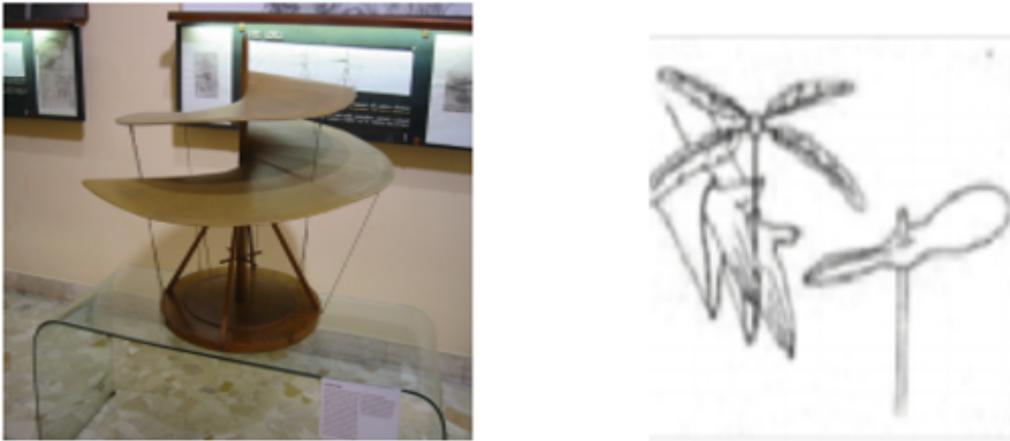


FIGURE 1.1: a) modèle de Vinci – b) toupie Chinoise

En 1754, le russe Lomonosov (Lomonosov) a essayé un modèle complexe avec deux rotors coaxiaux contrarotatifs sous le mécanisme d'horlogerie devant une institution scientifique, et a utilisé cet appareil pour prouver la force de levage La présence. Le 28 avril 1784, le naturaliste Launoy réalisa une maquette simplifiée devant l'Académie des Sciences sous l'action d'un mécanisme à ressort à arc, et simplifia la maquette en deux hélices contrarotatives. Cette découverte fut faite en 1795. L'année a été entreprise par George Cayley, comme le montre Figure 1.2.

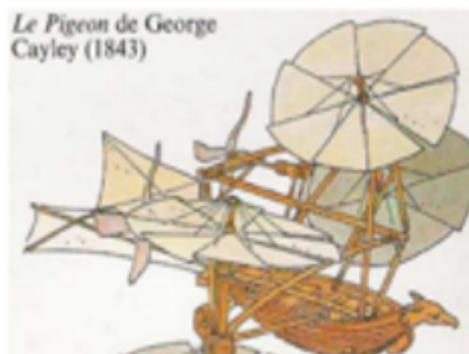


FIGURE 1.2: Pigeon George Cayley

En 1849, Venise a été bombardée depuis le volcan Volcano à travers des ballons sans pilote équipés de bombes à retardement. En 1877, Forlanini en Italie a construit des équipements entraînés par une machine à vapeur. Dix ans plus tard, le Français Ponton a présenté un modèle équipé d'un moteur électrique, dont la puissance est obtenue à partir du sol grâce à de fins fils de cuivre [3], [4].

En 1914, le fils de Sperry a démontré publiquement la fonction de stabilisation automatique de l'avion, puis en 1916 et aux États-Unis, l'avion est né avec l'avion cible Arial Target, au cours duquel de nombreuses améliorations ont été apportées après la Seconde Guerre mondiale. Ces améliorations ont conduit des avions torpilleurs télécommandés sans pilote à tenter de contrôler à distance la torpille dans les airs par des gyroscopes intégrés (embarqués). Le premier drone a été produit et testé en 1923 par les ingénieurs Maurice Percheron et le capitaine Max Boucher, mais l'armée française a déclaré que cette invention technologique était sans intérêt ni importance.

La phase suivante dans les années 1930 fut l'emploi d'avions-cibles autonomes tant au Royaume-Uni qu'aux États-Unis d'Amérique où le Radio plane OQ-2, avion de taille réduite télé piloté, fut construit en grande série. L'armée allemande développa à partir de 1938 des vecteurs guidés à distance sous la forme de bombes planantes antinavires, de bombes antichars radioguidées et de véhicules à chenilles filoguidés [3].

Le grand essor des drones date de la guerre de Corée et de celle du Viêtnam. À cette époque de la guerre froide, le drone a été développé de façon confidentielle par les États-Unis d'Amérique comme un moyen de supériorité stratégique et de rupture capacitaire pour permettre la surveillance et l'intervention militaire chez l'ennemi sans encourir les risques humains que l'opinion ne supportait pas. Cette supériorité a été acquise à travers de l'innovation technologique, surtout dans les domaines de l'automatique et des transmissions. Les transferts vers Israël de certains systèmes ont permis à ce pays de développer de façon pragmatique une collection de drones à vocation tactique à courte et moyenne portées et à transmissions directes de données. Les drones ont été ensuite de tous les conflits et opérations de maintien de la paix. Il a notamment été utilisé au Kosovo ou au Tchad, lors des attaques aériennes américaines au Pakistan ou contre la piraterie maritime, par les Américains qui l'ont introduit en 2009.

### 1.3 Classification des UAVS

Il est très difficile de faire la classification des drones car il existe plusieurs critères qu'il faut respecter pour distinguer les différents types des drones. Ces véhicules peuvent être classifiés selon : l'altitude de croisière, les missions, système de contrôle, la taille, etc.

### 1.3.1 Classification selon la taille

Dans cette échelle on peut distinguer quatre types : MALF, HALF, les minis drones et les micros drones [5], [6].

- **Hale (HAUTE ALTITUDE LONGUE ENDURANCE)**

Ce sont les drones de grande taille, le plus souvent a voilure fixe. Ils sont capables de rester très longtemps en vol et de collecter des informations sur des très longues périodes (12 à 48). Tels que le Global Hawk (Northrop Gumman) illustré sur Figure I.3 de la taille d'un avion de ligne et volants a des altitudes pouvant atteindre 20 km pour un rayon d'action de plusieurs milliers de kilomètres.



FIGURE 1.3: Le Global hawk

- **Male (MOYENNE ALTITUDE LONGUE ENDURANCE)**

Ils sont utilisés pour des vols de longues durées à moyenne altitude opérationnelle, ayants une grande autonomie. Tels que le Eagle 1 (EADS) illustré sur la Figure I.4 b) ou le Predator (General Atomics) comme le montre Figure I.4a), d'envergure de l'ordre d'une dizaine de mètres et volants à des altitudes comprises entre 5 km et 12 km pour un rayon d'action allant jusqu'à 1000 km.

- **Mini-drone**

Ce sont des drones plutôt légers et de taille réduite (jusqu'à quelques kilogrammes et d'une envergure jusqu'à 1 à 2 mètres) facilitant la mise en œuvre d'une autonomie relativement faible (de 10 à 30 minutes) et généralement utilisés pour l'observation de zones difficiles d'accès. Tels que le Hovereye (Bertin Technologies) illustré sur Figure I.5 b) ou le Dragon Eye (AeroVironment) illustré sur Figure I.5a) dont la dimension maximale n'excède pas le mètre.



FIGURE 1.4: a) Predator - b ) Eagle 1



FIGURE 1.5: a ) Dragon Eye - b ) Hovereye

- **Micro-drones**

Ce sont des drones ayant des tailles variantes du centimètre à quelques dizaines de centimètres. Généralement propulsés électriquement. Ainsi, ils permettent de faire des vols à l'intérieur. Tels que le PicoFlyer (Proxyflyer) illustré sur Figure I.6 dont la dimension maximale n'excède pas 15 cm.



FIGURE 1.6: PicoFlyer (ProxyFlyer)

### 1.3.2 Classification selon le mode de propulsion

Ce critère donne une autre possibilité de classification des drones, donc elle nous donne en générale trois structures [3], [7].

- **Drone a voilures fixes**

Ce sont des drones utilisant des ailes fixes dans leur mode de déplacement, ils peuvent être : plus lourds que l'air : type avion, plus léger que l'air : type dirigeable qui utilise de l'hélium pour générer une poussée verticale et des rotors pour générer des couples. Ayant un volume important, il se déplace lentement et est relativement plus sensible au vent comme il est illustré sur Figure I.7. Mais les dirigeables ont l'avantage d'être stables et d'avoir des vibrations mécaniques moindres [7].



FIGURE 1.7: dirigeable

- **Drones a voilures battantes**

Les ailes battantes constituent un système de propulsion alternatif pour les mini et micro-aéronefs, les battements d'ailes reproduisent le vol des oiseaux ou des insectes de plus en plus fidèlement. En France le laboratoire Femto de Besançon et la Société Silmach travaillent sur un projet de libellule artificielle d'une centaine de grammes comme il est illustré sur la Figure I.8.

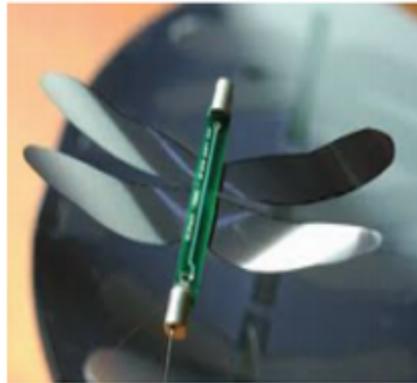


FIGURE 1.8: La libellule artificielle

- **Drones a voilures tournantes**

Les engins à voile tournante sont des appareils volants ayant la capacité de décoller, voler et atterrir verticalement (ADAV, en anglais Vertical Take-off and Landing Aircraft ou VTOL) et donc n'ont pas besoin de piste de décollage d'atterrissage. Ils utilisent des voilures tournantes ou rotors multiples pour voler en état stationnaire au-dessus d'une zone précise ou encore des vols à basse vitesse et à basse altitude. Ils peuvent réaliser une très grande variété de missions. Cette catégorie se devise de plusieurs configurations :

a). **Configuration ayant un seul rotor**

Dans cette configuration nous trouvons essentiellement les avions appelés 3D comme il est illustré sur Figure 1.9. Ces avions ont un seul moteur comme actionneur principal, suffisamment puissant pour décoller verticalement et des ailerons d'une grande surface pour assurer des couples de commande suffisamment grands afin que l'appareil soit facile à piloter. Ils se développent de plus en plus et ils ont l'avantage de pouvoir voler comme un avion normal, ce qui donne la possibilité de se déplacer rapidement et de manière très économique en termes d'énergie [7].



FIGURE 1.9: Avion 3D

**b). Configuration ayant deux rotors**

Dans ce type de configuration nous pouvons distinguer ceux qui utilisent un ou deux plateaux cycliques et ceux qui utilisent des pales à pas fixe [3] et [7]. Parmi ceux qui utilisent des plateaux cycliques nous avons l'hélicoptère classique avec un rotor principal et un rotor illustré sur Figure I.10. Dans cette catégorie on peut citer aussi l'hélicoptère en tandem qui possède deux rotors qui tournent en contre sens mais dans des axes différents. En ce qui concerne des appareils sans plateaux cycliques, il est clair qu'avec seulement deux rotors on ne peut pas générer une force et trois couples indépendants. Il faut donc ajouter soit des ailerons, soit des mécanismes pour faire pivoter les rotors.



FIGURE 1.10: hélicoptère classique

### c). Configuration ayant trois rotors

Dans cette catégorie nous trouvons le tricoptère illustré sur Figure I.11 a), le vectron illustré sur Figure I.11 b) et aussi l'hélicoptère auto stable illustré sur Figure I.11 c). Le tri-rotor est constitué de deux rotors à l'avant qui tournent dans des sens opposés et un rotor à l'arrière avec orientation réglable. Le fonctionnement est similaire à celui d'un quadrotor mais la performance en vol n'est pas aussi satisfaisante [3] et [7].

Le vectron est constitué de trois rotors qui tournent dans le même sens, le corps circulaire de l'appareil tourne par conséquent dans le sens contraire, les vitesses des moteurs sont variées à des instants très précis de manière à obtenir des couples de tangage et de roulis.

L'hélicoptère auto stable (blade-runner) a été inventé récemment par un norvégien, il est constitué de deux rotors à pas fixe qui sont montés sur le même axe et qui tournent dans des sens opposés.

Un petit rotor de queue permet d'obtenir le couple de tangage. Cet hélicoptère a la propriété d'être stable grâce au fait qu'il existe une articulation entre les pales du rotor principal et l'axe du rotor. Étant donné son mode de fonctionnement, cet appareil peut être utilisé uniquement en intérieur



a)



b)



c)

FIGURE 1.11: a) tricopter - b) vectron - c) hélicoptère auto stable

#### d). Configuration ayant quatre rotors

Le quadrotor est un aéronef soulevé et propulsé par quatre rotors comme le montre la Figure I.12. Comme son nom l'indique, il se compose de quatre moteurs situés aux extrémités d'une armature. Son mouvement est contrôlé par la variation de vitesse de chaque rotor pour changer la force de portance et le couple créé par chacun. Deux rotors du même axe tournent dans le sens horaire, alors que les deux autres tournent dans le sens antihoraire pour compenser le couple créé par les rotors sur l'armature. En considérant que les quatre moteurs tournent à la même vitesse et que tous les éléments sont identiques (hélices, dimensions, équilibre des masses), les couples de rotation générés par une paire de moteurs du même axe s'annulent. Donc, le quadrotor est théoriquement en vol stationnaire (stable sur ses 3 axes). Il existe aussi une version de X4 dans laquelle tous les rotors tournent dans le même sens ou 2 rotors sont inclinés par rapport à l'horizontale de manière à créer un couple de lacet. L'inclinaison peut être fixe ou variable et permet de commander la rotation autour de l'axe Z [6] et [7].



FIGURE 1.12: Quadrotor

## 1.4 Drones hybride

Aujourd'hui, des efforts sont faits pour concevoir et fabriquer des drones aux capacités différentes pouvant être appliquées dans des environnements variés. Différents drones ont été inventés ayant la capacité de marcher et de se déplacer sur le sol et dans l'eau ou de nager et de plonger sous l'eau. Un quadri-citerne hybride a été créé par une société appelée "B" qui, en réponse à la peut transformer le drone d'un char d'assaut en un quadriporteur volant dans le ciel comme le montre Figure I.13(a). Le robot DALER est un drone qui vole et marche [8], qui consiste en une aile volante à morphologie adaptative qui permet au robot d'effectuer à la fois le vol longue distance et la marche dans des environnements cibles pour des explorations locales. Ce drone est inspiré de la chauve-souris vampire *Desmodus rotundus* qui peut effectuer des déplacements aériens et terrestres avec des compromis limités comme le montre Figure I.13(b) [8]. En outre, le micro véhicule aéroterrestre (MALV), conçu par Bachmann, est un autre drone capable de voler et de marcher sur des terrains accidentés grâce à un train de roulement à roues souples illustré sur Figure I.13(c). Le Parrot Hydrofoil est un drone considéré comme un remarquable robot hybride dans l'air et dans l'eau comme le montre Figure I.14(a) [8]. Des chercheurs de l'université Rutgers ont mis au point un drone volant et plongeur pour faciliter les opérations de recherche et de sauvetage, désamorcer les menaces de mines sous-marines et surveiller les marées noires comme le montre Figure I.14(b). En outre, il existe un autre type de drone hybride appelé HexH20, qui a la capacité de voler et de plonger sous l'eau comme le montre la Figure I.14(c) [9]. Les chercheurs du Laboratoire de robotique aérienne de l'Imperial College de Londres ont conçu un MAV à ailes battantes multimodal, inspiré

d'un oiseau amphibie qui peut voler, plonger dans l'eau et reprendre son vol. Le Micro-véhicule Aquatique Aérien (AquaMAV) est censé surveiller la qualité de l'eau, et effectuer des opérations de recherche et de sauvetage et des explorations sous-marines illustré sur FigureI.14(d) [9]. Les figures I.13 et 1.14 présentent les drones hybrides air-sol et air-eau.



FIGURE 1.13: Des drones hybrides air-sol : (a) quadruple chasseur de char , (b) robot DALER , et (c) MALV .

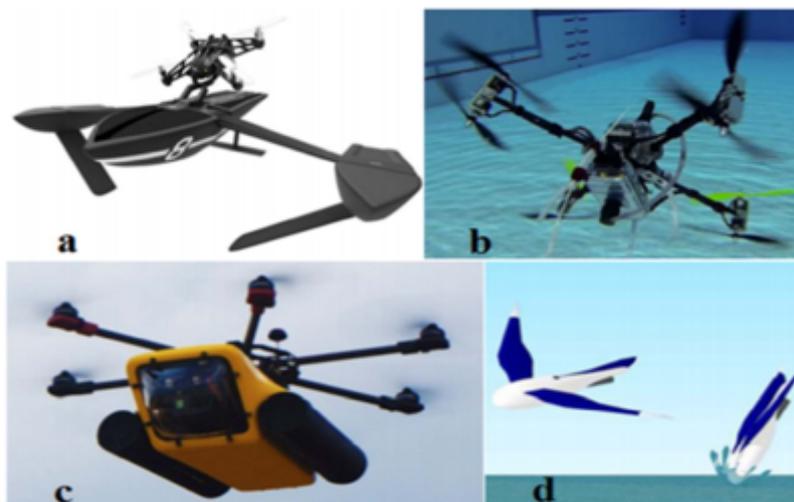


FIGURE 1.14: Drones hybrides air-eau : (a) Hydroptère perroquet , (b) Drone de l'université Rutgers, (c) HexH20 , et (d) AquaMAV.

### 1.4.1 Les drones hybrides air sol

Le dernier développement de drones en mode hybride a été utilisé une approche complètement différente. L'Omni-Flymobile de l'Université nationale de Chungnam utilise quatre roues fixes pour fournir une fonction de glissement omnidirectionnel à quatre rotors au sol [10] ; il utilise un actionneur pour incliner son rotor sur le côté pour l'application Poussée directionnelle. Cependant, la complexité accrue du rotor incliné compromet la robustesse du quadrotor UE. En revanche, le quadrotorHyTAQ de l'Illinois Institute of Technology utilise un système de

cage roulante pour rouler sur la surface. La configuration à de nombreuses avantages - notamment une structure simple et peu frustrante et la protection contre les collisions - mais au prix d'une augmentation substantielle du poids et de l'inertie de roulement. Un système financé par la foule et en cours de développement, la voiture volante "B", utilise des roues encerclant les rotors à entraîner le sol [11]. Cela promet de bonnes performances au sol mais ajoute le poids et la complexité de un actionneur pour chaque roue.



FIGURE 1.15: Quadroller roulant à l'extérieur.

- **Flying STAR**, un robot hybride rampant et tentaculaire

Les robots rampants miniatures ont été développés depuis longtemps pour se déplacer dans des environnements non structurés pour la recherche et les missions de sauvetage, d'excavation et de reconnaissance. Leurs petites tailles, leur faible poids et leur grande navigabilité permettent déploiement en grand nombre pour inspecter rapidement de vastes zones. Beaucoup d'efforts ont été investis dans la réduction de leur taille, augmenter leur vitesse et diminuer leur énergie de consommation. Le nouveau robot volant hybride FSTAR appartient à la famille des robots STAR . il peut également varier son angle d'étalement. FSTAR se caractérise par des capacités uniques en ce qu'il peut se transformer d'un quadriporteur volant à un robot en marche en utilisant son mécanisme d'étalement. La longueur totale du robot est de 24,6 cm et sa largeur en mode de vol est de 37,1 cm.



FIGURE 1.16: FSTAR est un robot nouvellement développé qui peut s'étendre sur ses jambes et en bas.

- **RC voiture volante Quadcopter 2 en1 Drone Air sol Jouets télécommande w / Lumières LED\_ onaeatza495**

RC voiture volante quadcopter 2 in1 Drone Air sol Jouets télécommande w / LED Lights  
Caractéristiques : Ce drone unique, ne peut que voler dans les airs, mais aussi conduire sur le terrain. lumières LED fraîches font drone attrayant et beau, qui ajoutent beaucoup de plaisir pour le vol la nuit. Avec la fonction haut / bas commutateur de vitesse, vous pouvez choisir le mode à faible vitesse à l'intérieur et le mode à grande vitesse pour obtenir beaucoup de plaisir en plein air de vol. rouler 3D avec une action parfaite et une excellente performance vous offre une expérience de vol impressionné. Une touche de fonction de retour aide le drone volé à lieu d'origine facilement.



FIGURE 1.17: Quadcopter air-sol

## 1.4.2 Application des drones hybrides

### • Applications militaires

Les lourdes pertes subies pendant la seconde guerre mondiale par les aviations d'observation de chacun des antagonistes suscitérent l'idée d'un engin d'observation militaire sans équipage (ni pilote, ni observateur). Pendant la guerre du Vietnam, les Américains ont utilisé des drones (Firebee) pour localiser les rampes de lancement des missiles sol-air soviétiques "SAM-2"<sup>0</sup>.

Lors de la guerre du Golfe, les britanniques, les français commencèrent à se servir de drones et les américains l'ont fait appel au drone (Pioneer) pour la surveillance jour/nuit, l'acquisition des objectifs, et les réglages de l'artillerie.

De leur côté, les Israéliens ont saturé les défenses aériennes le long du canal de Suez lors de la guerre du Kippour (1973) et ce, avec un grand nombre de drones bon marché.

Mais c'est surtout au cours des trois derniers conflits majeurs impliquant les forces internationales de l'OTAN (intervention au Kosovo, en Afghanistan et en Irak) que les drones ont vraiment pu démontrer leurs capacités opérationnelles, accomplissant indifféremment des missions d'observation aérienne ou d'attaque au sol. En règle générale, on peut décomposer en trois grandes catégories, les missions militaires confiées aux drones [12],[13] :

- la surveillance et le renseignement,
- le support au combat
- le combat proprement dit

### • Applications civiles

Tous les avantages reconnus des drones pour les applications militaires sont transposables aux applications civiles. On peut citer :

- Dans le domaine de la sécurité : surveillance de l'espace aérien, du trafic urbain et interurbain.
- Dans la gestion des risques naturels : surveillance de l'activité des volcans ;
- La protection de l'environnement : mesure de la pollution de l'air, surveillance des forêts .
- L'intervention dans des sites hostiles : milieux radioactifs, déminage des terrains (cartographie de terrains minés).

- Télécommunications mobiles, publicité et radiodiffusion (télévision, ...) Géodésie et mesures atmosphériques.

- **Drones dans l'industri des telecoms**

Les drones peuvent être utilisés pour la planification radio et les tests de ligne de visée, où la ligne de vue fait référence à un chemin dégagé entre deux antennes. Par exemple, cette technologie peut identifier et éviter les obstacles qui réduisent la qualité des signaux radio, tels que les arbres, les bâtiments et les sommets des montagnes. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour déterminer l'emplacement et la hauteur idéale de l'antenne [14], dans les applications IOT [15].

### 1.4.3 Les limits des drones conventionnels

Les drones conventionnels présentent quelques points faibles dans de nombreuses situations pratiques, comme suit :

- 1 .Une collision légère peut causer de graves dommages aux rotors et un accident dangereux.
- 2 .Dans un espace extérieur venteux et un espace intérieur étroit, le vol est susceptible d'être instable.
- 3 .En cas d'attitude basse à l'atterrissage et au décollage, le vol peut s'écraser.
- 4 .Le décollage autonome à partir d'un lieu accidenté et d'une pente au sol n'est pas facile.
- 5 .La façon de se déplacer est limitée au seul vol aérien, qui nécessite une énergie supplémentaire pour soulever le corps. Par conséquent, il n'est pas adapté à un travail de longue durée.
- 6 .Le bruit des ailes et s'écraser dans des endroits étroits.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement présenté le contexte historique lié à l'apparition des robots volants et examiné pilote et de ses dérivés. Nous avons également vu les formules des drones existants et leurs applications. On constate que le monde des drones en général et celui des drones hybrides en particulier a connu ces dernières années un intérêt croissant vu les développements et les avancées technologiques, et ils sont doués de réelles capacités de navigation autonome à des multiples applications civiles et militaires.

Dans le prochain chapitre on va présenter tous les matériels et les logiciels utiliser pour la réalisation de notre système.

# Chapitre 2

## Conception du drone hybride

## Introduction

Dans cet chapitre, nous nous sommes intéressés au concept de notre véhicule hybride (véhicule terrestre et aérien) de petite taille sans pilote humain. Donc nous allons présenter la partie hardware et software de notre prototype

### 2.1 Description general

Dans notre projet qui consiste à réaliser un véhicule hybride pour la navigation terrestre et aérien, nous avons proposé deux conceptions très différentes pour extraire le meilleur choix qui nous permet de réaliser le drone hybride le plus avantageux.

La première conception que nous avons proposée c'est été se notre choix, elle nous permet de voir un drone hybride qui peut voler grâce à un quadrotor et rouler grâce à un robot mobile unicycle.

Quand nous avons terminé et testé la première proposition, nous avons vu qu'il y a des soucis comme le poids et le désigne qui a empêché le déplacement idéal du drone. Nous avons proposé une autre conception qui consiste à éliminer plusieurs composants par rapport à la première comme les moteurs de robot, l'arduino et le shield pour éviter le problème de poids [14].

- **Le quadrotor**

Le quadrotor est un objet volant qui a la particularité de posséder 4 rotors placés aux extrémités d'un corps rigide en forme de croix. L'électronique de contrôle est en général placée au centre de la croix (comme PIXHAWK, GPS) qui constitue le centre de gravité de l'engin. Pour éviter au quadrotor de tourner sur lui-même autour de son axe de lacet, il faut que les hélices appartenant au couple des moteurs avant-arrières tournent dans un sens et que les hélices appartenant au couple gauche-droite tournent dans un autre sens. Le quadrotor étant une configuration complètement instable, il faut développer des algorithmes permettant de contrôler chaque moteur séparément pour contrer l'inclinaison sur chaque axe et ainsi le stabiliser.

- **Robot mobile unicycle**

Un robot de type unicycle est actionné par deux roues indépendantes, il possède éventuel-

lement une roue folle pour assurer sa stabilité. Son centre de rotation est situé sur l'axe reliant les deux roues motrices. il est en effet assez facile de le déplacer d'un point à un autre par une suite de rotations simples et de lignes droites. Le projet que nous avons déjà réalisé a une structure de notre choix ( la première conception), il se compose d'un robot mobile a 2 roues avec une roue folle (robot mobile unicycle) et un drone quadrotor de forme x. Nous avons réalisé une surface métallique pour faire la combinaison entre les deux grandes parties, puis on a essayé de faire l'équilibre de système pour le poids par la distribution des composants sur tout le système.

## 2.2 Conception de premier prototype

### 2.2.1 Architecture matérielle

Notre architecture pour le coté de matérielle c'est un groupe des composantes très importants pour le montage du véhicule. nous avons utilisé le châssis SK450 qui est le support de drone, quatre (4) moteurs brushless combiné avec quatre(4) ESCs qui ont le droit de faire tourner les quatre(4) hélices. Nous avons utilisé aussi l'autopilote PIXHAWK qui joue le rôle principale pour le vole, un arduino et une shield a été utilisé pour le coté de robot mobile. nous avons guidé notre montage par la radio commande RC et un récepteur futaba.

### 2.2.2 Châssis Hobbyking SK450

Ce châssis de 450 mm et de 80 mm de hauteur est fabriqué en fibre de verre résistante, quant aux bras ils sont faits en nylon polyamide. Il contient un plateau inferieure, supérieur et quatre bras (quadrotor) comme le montre figure 2.1.



FIGURE 2.1: Châssis SK450

### 2.2.3 Moteur DC Brushless

Les moteurs brushless sont beaucoup plus avantageux comparés au moteurs brushed, aux moteurs de force et aux servo moteurs car ils sont plus efficaces, plus fiables, ont une plus grande durée de vie, ont plus de puissance, ont un facteur de bruit réduit, ne font pas d'étincelles ionisantes du commutateur, et ont une réduction de l'interface électromagnétique.

Les moteurs utilisés doivent être identiques car même si une paire des moteurs sont de la même marque, du même modèle et de la même production, leur vitesse peut varier légèrement, et c'est là où le contrôleur de vol joue son rôle comme le montre Figure2.2.



FIGURE 2.2: Moteur DC Brushless

### 2.2.4 Contrôleur électronique de vitesse (ESC)

Un contrôleur électronique de vitesse est un circuit électronique utilisé pour varier la vitesse d'un moteur électrique et il sert aussi comme frein dynamique du système. L'ESC contrôle le moteur brushless en convertissant le courant continu provenant de la batterie en un courant

triphase alternatif. L'ESC doit gérer le courant maximum que le moteur peut consommer, et pouvoir l'alimenter au bon voltage comme il est illustré sur Figure 1.20.



FIGURE 2.3: (ESC) Contrôleur électronique de vitesse

## 2.2.5 Contrôleur de vol Pixhawk

PixHawk est un contrôleur de vol comme le montre Figure 2.4, est un système de pilotage automatique avancé conçu par le projet PX4, et une nouvelle solution Open Source de haute performance fabriqué par le constructeur Robotics 3D. PixHawk est un module adapté sur plusieurs matériels à voilure fixe, rotors multiples, hélicoptères, voitures, bateaux et toute autre plate-forme robotique qui peut se déplacer. Il est destiné à la recherche.

Les avantages du système PixHawk comprennent un multithreading intégré, un environnement de programmation identique à Unix/Linux, des fonctions du pilote automatique totalement nouvelles telles que le langage de script pour les missions et les comportements de vol, et une couche conductrice PX4 personnalisée garantissant des délais très courts dans tous les processus. Ces fonctionnalités avancées garantissent qu'il n'y a pas de limites à votre véhicule autonome. PixHawk permet aux opérateurs existants d'APM et de PX4 d'assurer une transition de façon transparente vers ce système, et facilite l'accès aux nouveaux utilisateurs souhaitant découvrir le monde passionnant des véhicules autonomes.



FIGURE 2.4: autopilote PIXHAWK

Le tableau 2.1 représente les caractéristiques du PixHawk :

Processor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 32-bit ARM Cortex M4 core with FPU</li> <li>• 168 Mhz/256 KB RAM/2 MB Flash .</li> <li>• 32-bit failsafe co-processor</li> </ul>
Sensors	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MPU6000 as main accel and gyro</li> <li>• ST Micro 16-bit gyroscope .</li> <li>• ST Micro 14-bit accelerometer /compass (magnetometer)</li> <li>• MEAS barometer</li> </ul>
Power	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ideal diode controller with automatic failover</li> <li>• Servo rail high-power (7V) and high-current ready</li> <li>• All peripheral outputs over-current protected</li> <li>• All inputs ESD protected</li> </ul>
Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5x UART serial ports, 1 high-power capable, 2 with HW flow control</li> <li>• Spektrum DSM/DSM2 DSM-X Satellite input</li> <li>• Futaba S.BUS input (output not yet implemented)</li> <li>• PPM sum signal</li> <li>• RSSI (PWM or voltage) input</li> <li>• I2C, SPI, 2x CAN, USB</li> <li>• 3.3V and 6.6V ADC inputs</li> </ul>
Dimensions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weight 38g</li> <li>• Width 50mm</li> <li>• Height 15.5mm</li> <li>• Length 81.5mm</li> </ul>

TABLE 2.1: Caractéristiques du PixHawk

### 2.2.6 Les Hélices

Ces hélices de 12 pouces sont fabriquées en fibre de carbone, ce qui garantit une solidité et une légèreté maximale. La première paire d'hélices est au sens des aiguilles d'une montre tandis que l'autre paire est au sens inverse des aiguilles d'une montre comme le montre la figure 2.5.



FIGURE 2.5: Hélices 12 pouces

### 2.2.7 Batterie Lithium (LiPo)

Les piles au lithium polymère (ci-après dénommées "LiPo"), sont un nouveau type de piles utilisées dans de nombreux appareils électroniques grand public. Elles ont gagné en popularité dans l'industrie des radiocommandes au cours des dernières années, et sont maintenant le choix le plus populaire pour tous ceux qui recherchent une longue durée de vie et une grande puissance.

Les batteries LiPo offrent un large éventail d'avantages. Mais chaque utilisateur doit décider si les avantages l'emportent sur les inconvénients. Pour un nombre croissant de personnes, c'est le cas, il n'y a rien à craindre des batteries LiPo, pour autant que vous respectiez les règles et que vous traitiez les batteries avec le respect qu'elles méritent comme le montre figure 2.6.



FIGURE 2.6: Batterie Lipo 7.4v 1100 mAh

### 2.2.8 Radio Contrôleur (Futaba RC)

La radiocommande est le système indispensable pour piloter et contrôler tout engin radio-commandé à distance. La commande s'effectue grâce à la transmission d'ondes radioélectriques appelées également ondes hertziennes. Concernant le drone, elle permet de réguler la vitesse, de contrôler chaque mouvement du drone comme le tangage, l'élévation, le lacet ou le roulis comme le montre Figure 2.7.

Concernant la composition du système de commande, il faut nécessairement un émetteur radio. Celui-ci se trouve normalement à l'intérieur du boîtier de radiocommande appelé TX, cet émetteur radio permet de convertir les signaux électriques en signaux radio, sur la fréquence réglementée des 2,4 GHz. Ensuite, pour la transmission du signal entre la radiocommande et le drone, il faut nécessairement un récepteur, également connu sous le terme RX. Il s'agit d'un composant électrique fixé sur le drone qui reçoit les ordres du pilote en provenance de la radiocommande et les transmet au contrôleur de vol. L'émetteur et le récepteur doivent nécessairement être compatibles pour pouvoir fonctionner ensemble. Cette compatibilité dépend de deux données : le protocole de communication radio et la fréquence d'émission.



FIGURE 2.7: Radio Contrôleur (Futabarc)

### 2.2.9 Récepteur radio

Afin que l'émetteur et le récepteur fonctionnent ensemble, ils doivent être reliés l'un à l'autre par le memo codage numérique. A la livraison ils concordent l'un avec l'autre et peuvent être utilisés immédiatement. Il est indispensable de renouveler le réglage de la liaison en premier

lieu après un remplacement de cet émetteur ou pour un dépannage. Figure 2.8 représente un Emetteur-récepteur Futaba.



FIGURE 2.8: Emetteur-récepteur Futaba

### 2.2.10 Arduino MEGA 2560

L'Arduino Mega 2560 comme le montre Figure 2.9 est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega2560, il dispose de 54 broches d'entrée/sortie numériques (dont 14 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur à cristal de 16 MHz, un port USB une prise d'alimentation, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation. Il contient tout nécessaire pour prendre en charge le microcontrôleur, il suffit de le connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB ou l'alimenter avec un adaptateur AC/DC ou une batterie pour démarrer. Le Mega est compatible avec la plupart des boucliers conçus pour l'ArduinoDuemilanove ou Diecimila. Le tableau 2.2 représente une fiche technique d'Arduino MEGA 2560.

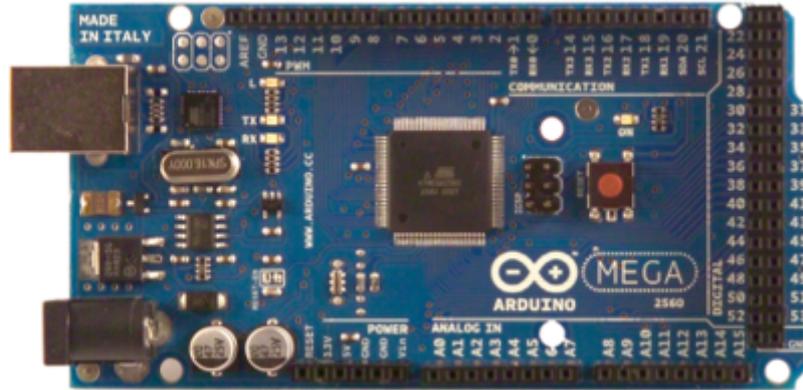


FIGURE 2.9: Arduino MEGA 2560

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by boot-loader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

TABLE 2.2: Fiche technique de arduino mega

### 2.2.11 Shield L298P

L298P comme le montre figure 2.10 est une composante utilisée pour les motrices hautes puissances, elle peut commander directement 2 moteurs à courant continu et le courant d'entraînement pouvant atteindre 2A. Les interfaces utilisent 8 diodes Schottky à haute vitesse comme protection. Il peut être directement branché sur l'Arduino. L298P Shield DC motor driver avec mode de contrôle de vitesse PWM et le mode PLL à l'aide d'un cavalier.



FIGURE 2.10: Shield L298P

## 2.3 Softwares utilisés

Pour l'architecture software, on a utilisé les logiciels nécessaires qui nous permettent de configurer et de simuler nos programmes et nos composantes configurables.

### 2.3.1 Mission planner

Mission Planner est un programme open source conçu pour servir la station de contrôle au sol virtuel pour les appareils hélicoptères, avions ou rovers. Cette application nous permet de configurer les différents paramètres de notre appareil autonome et d'assurer ses performances optimales.

La configuration de Mission Planner est simple et rapide, en particulier dans la mesure où elle implique de suivre des instructions fournies dans le kit d'installation après avoir décompressé le fichier. Une fois que vous avez ouvert l'application, vous pouvez la connecter à l'AutoPilot (Pixhawk) pour prendre le contrôle du véhicule terrestre ou aérien via le programme.

Grâce à elle, nous pouvons créer des missions pas à pas pour notre gadget. Nous pouvons commencer par configurer un point d'origine et de spécifier un paramètre d'altitude. Ensuite, nous pouvons entrer les points de cheminement et autres commandes souhaités, selon ce que nous préférons que l'appareil fasse pendant la mission. Figure 2.11 représente une interface Mission planner.



FIGURE 2.11: Interface Mission planner

### 2.3.2 Logiciel SOLIDWORKS

SolidWorks est un logiciel de modélisation 3D disposant d'une version gratuite. Il permet de concrétiser des idées de conception via une interface simple et intuitive. Le logiciel CAO intègre de puissantes fonctionnalités. Il est un logiciel très complet de modélisation en 3D. Il permet de concevoir des objets en 3D de manière très précise. C'est une solution pour développer des produits, vérifier la conception d'un fichier, profiter d'une bibliothèque de fichiers 3D, mettre en place des plans en 2D, créer des images et animations des objets en 3D ou encore estimer le coût de fabrication de ces objets en 3D. SolidWorks permet d'utiliser de nombreux outils de dessin et d'édition. Il permet de créer rapidement des mises en plan avec une mise à jour automatique des modèles. Des tests virtuels de conception sont à disposition pour vérifier la résistance, le poids, les matériaux, etc. Il est aussi possible de vérifier que les produits sont écoresponsables. Pour notre projet, on a utilisé solidworks pour la conception détaillé comme le montrent figures 2.12 , 2.13 et 2.14 pour la première conceptions et figure 2.15 pour la deuxième conception.



FIGURE 2.12: Conception du quadrotor par solidworks



FIGURE 2.13: Conception de la partie du robot par solidworks

### 2.3.3 L'éditeur ARDUINO

et d'envoyer du code sur le circuit imprimé du même nom. Pour rappel, la carte Arduino contient un microcontrôleur que l'on peut programmer dans le but d'effectuer des tâches variées, comme la domotique par exemple.

Grâce à Arduino, nous sommes en mesure de communiquer et transférer des données facilement à notre circuit imprimé. Après avoir installé le programme, notez que l'interface du logiciel se présente de manière simple et structurée. Outre les traditionnelles barres d'outils et de boutons, nous retrouvons une fenêtre d'édition depuis laquelle nous rédigeons le code de nos programmes. Supportant plusieurs onglets, l'éditeur d'Arduino nous permet de travailler sur plusieurs programmations à la fois. Sous la fenêtre d'édition, une zone de message nous indique les actions en cours. Enfin, une console de texte affiche les informations concernant les résultats de compilation des programmes.



FIGURE 2.14: Conception du véhicule hybride(quadrotor +robot)par solidworks



FIGURE 2.15: deuxième conception

Enfin, après avoir rédigé nos programmes dans l'environnement dédié, vous pouvez vérifier et compiler notre code source, puis l'envoyer à notre carte dans le cas où aucune erreur de programmation ne serait détectée par Arduino.

### 2.3.4 Logiciel MATLAB

Partout dans le monde, des millions d'ingénieurs et de scientifiques utilisent MATLAB pour analyser et concevoir les systèmes et produits de demain. MATLAB est présent dans des systèmes automobiles de sécurité active, des véhicules spatiaux, des appareils de surveillance médicale, des réseaux électriques intelligents et des réseaux mobiles LTE. Il est utilisé dans les domaines de l'apprentissage automatique, le traitement du signal, la vision par ordinateur, les communications, la finance computationnelle, la conception de contrôleurs, la robotique et bien plus.

La plate-forme MATLAB est optimisée pour résoudre les problèmes scientifiques et techniques. Il basé est sur les matrices qui est le moyen le plus naturel au monde pour exprimer les mathématiques computationnelles. Les graphiques intégrés permettent de visualiser facilement les données afin d'en dégager des informations. Grâce à la vaste bibliothèque de boîtes à outils prédéfinies. Donc on peut citer des fonctionnalités principales pour ce logiciel.

- Langage de haut niveau pour le calcul scientifique et technique.
- Environnement bureau pensé pour l'exploration itérative, la conception et la résolution de problèmes.
- Graphiques destinés à la visualisation de données et outils conçus pour créer des tracés personnalisés.
- Applications dédiées à l'ajustement de courbes, la classification de données, l'analyse de signaux et bien d'autres tâches spécialisées.
- Boîtes à outils additionnelles conçues pour répondre à de nombreux besoins spécifiques aux ingénieurs et aux scientifiques.
- Outils permettant la création d'applications avec interface utilisateur personnalisée.
- Interfaces vers C/C++, Java, .NET, Python, SQL, Hadoop et Microsoft Excel
- Options de déploiement libre de droits permettant de partager des programmes MATLAB avec les utilisateurs finaux.

## 2.4 Caractéristiques du véhicule

Dans ce travail, nous allons utiliser un modèle dont ses paramètres sont présenté dans le tableau 2.3.

Variables	Valeurs	Unité	Description
m_mot	0.039	Kg	Masse d'un moteur avec l'hélice
dm_mot	0.240	m	La distance du moteur par rapport au centre du quadrotor
h_mot	0.046	m	Hauteur d'un moteur par rapport au bras qu'il le porte
r_mot	0.0140	m	Rayon d'un moteur
m_ESC	0.035	Kg	Mass d'un ESC
a_ESC	0.025	m	Largeur d'un ESC
b_ESC	0.068	m	Langueur d'un ESC
ds_ESC	0.150	m	Distance d'un ESC par rapport au quadcopter
m_chas	0.450	Kg	Masse du châssis
r_chas	0.150	m	Hauteur du châssis
m_bras	0.085	Kg	Masse d'un bras
r_bras	0.010	m	Rayon d'un bras
l_bras	0.150	m	Longueur d'un bras
db_bras	0.1768	m	Distance entre le centre du quadrotor au début d'un bras
$I_x$	0.0155	$Kg/m^2$	Valeurs de la matrice d'inertie
$I_y$	0.0155	$Kg/m^2$	Valeurs de la matrice d'inertie
$I_z$	0.0247	$Kg/m^2$	Valeurs de la matrice d'inertie
g	9.8100	$m.s^{-2}$	Force de gravité
mass	1.400	Kg	Masse totale

TABLE 2.3: caractéristiques du quadrotor

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la partie hardware qui consiste a montré les différentes composantes essentielles pour la réalisation finale de notre véhicule hybride. D'un autre coté nous avons présenté aussi la partie software qui a montré les différents logiciels utilisés pour la programmation, la configuration et la simulation de nos différents codes.

Pour le prochain chapitre, nous allons parler sur la modélisation détaillée de notre système.

# Chapitre 3

## Modelisation et simulation du drone hybride

## Introduction

La modélisation de véhicule hybride est une tâche délicate puisque la dynamique du système est fortement non linéaire et pleinement couplée. Afin de pouvoir comprendre au mieux le modèle dynamique développé ci-dessous, et aussi pour faire ce travail, il faut mettre plusieurs hypothèses pour simplifier la modélisation pour les deux modes (mode aérien et mode terrestre) :

- Le centre de gravité du quadrotor coïncide avec le centre de gravité du robot mobile.
- La charge est répartie régulièrement sur la zone du corps.

Nous allons présenter la modélisation de notre prototypes proposé. Pour le mode de déplacement aérien et terrestre.

### 3.1 Modelisation

#### 3.1.1 Mode aerien

Pour ce mode, notre système est considéré comme un drone quadrotor. Pour évaluer le modèle mathématique du quadrotor nous utilisons deux repères, un repère fixe lié à la terre et un autre mobile. Le passage entre le repère mobile et le repère fixe est donné par une matrice dite matrice de transformation  $T$  qui contient l'orientation et la position de repère mobile par rapport au repère fixe. Pour simplifier plusieurs trucs nous avons posé les hypothèses suivantes :

- La structure du quadrotor est supposée rigide et symétrique, ce qui induit que la matrice d'inertie sera supposée diagonale.
- Les hélices sont supposées rigides pour pouvoir négliger l'effet de leur déformation lors de la rotation.
- Le centre de masse et l'origine du repère lié à la structure coïncident.
- Le poids total de drone avec le robot mobile considère comme une seule masse (un quadrotor)

Pour décrire la position et l'orientation du quadrotor, nous avons recours à deux repères. Le premier est nommé le repère inertiel. Il s'agit d'un référentiel  $R_i = \{O, ii, ji, ki\}$  orthogonal fixe de type galiléen, dans le sens que celui-ci n'accélère pas et ne tourne pas par rapport à un observateur. On utilise souvent le repère (North,East,Dows), l'axe  $ii$  pointe vers le nord, l'axe

ji pointe vers l'est et ki pointe vers le centre de la Terre. Nous considérerons ici que la surface de la Terre est plate, donc ii et ji sont parallèles au sol et ki est perpendiculaire au sol.

Le second repère est absolument nécessaire pour décrire l'orientation du quadrotor. En effet, ce référentiel est lié au châssis du quadrotor. Celui-ci est identifié par  $R_b = \{O, b, jb, kb\}$ . On suppose que l'origine coïncide avec le centre de gravité du quadrotor,  $i_b$  pointe vers l'avant,  $j_b$  pointe vers le bras droit et  $k_b$  pointe vers le bas du quadrotor.

Pour évaluer le modèle mathématique du quadrotor on utilise deux repères, un repère fixe lié à la terre  $R_b$  et un autre mobile  $R_m$ . Le passage entre le repère mobile et le repère fixe est donné par une matrice dite matrice de transformation T qui contient l'orientation et la position de repère mobile par rapport au repère fixe.

On choisit la convention d'axes suivants illustrée sur Figure 3.1 :

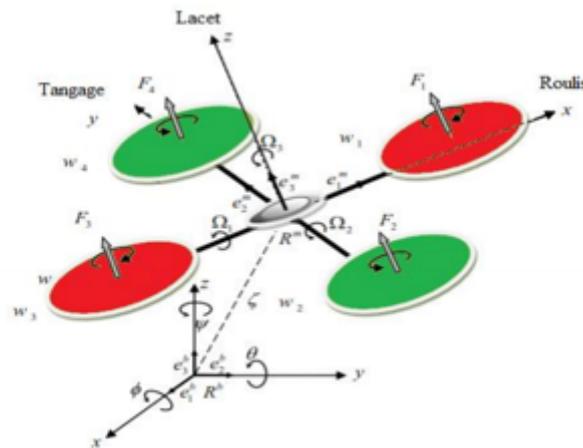


FIGURE 3.1: Géométrie du quadrotor

$$T = \begin{bmatrix} R & \xi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Avec R la matrice de rotation (décrit l'orientation de l'objet mobile),  $\xi = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  est le vecteur de position. Pour déterminer les éléments de la matrice de rotation R, on utilise les angles d'Euler.

### • Angles d'Euler

Au début le repère mobile est coïncide avec le repère fixe, après le repère mobile fait un mouvement de rotation autour de l'axe x d'un angle de roulis ( $-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2}$ , suivi d'une rotation autour de l'axe y d'un angle de tangage ( $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$ , suivi d'une rotation autour de l'axe z d'angle de lacet ( $-\frac{\pi}{2} < \psi < \frac{\pi}{2}$ . donc on a la formule de la matrice de rotation R[16][17] :

$$R = Rot_z(\psi) * Rot_y(\theta) * Rot_x(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \sin\psi\cos\phi & \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\psi\sin\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\psi\cos\theta & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\sin\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Figure 3.2 représente la Paramétrisation de l'orientation du drone dans l'espace.

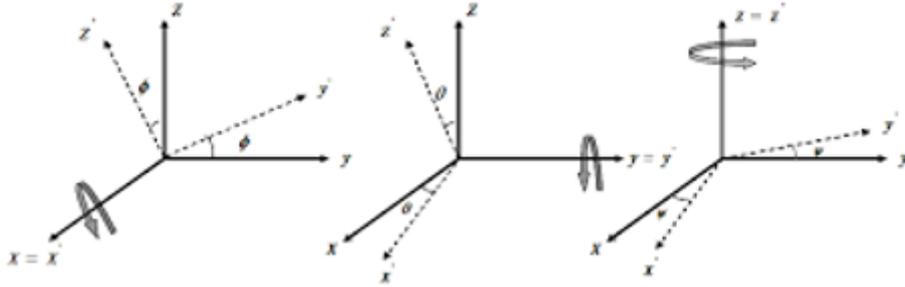


FIGURE 3.2: Paramétrisation de l'orientation du drone dans l'espace.

### • Vitesses angulaires

Les vitesses de rotations  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  dans le Repère fixe sont exprimés en fonction des vitesses de rotations  $\dot{\theta}, \dot{\phi}, \dot{\psi}$  dans le repère mobile, donc on a :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot_x(\phi)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + (Rot_y(\theta)Rot_x(\phi))^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \cos\phi \\ -\dot{\theta} \sin\phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\psi} \sin\theta \\ \dot{\psi} \sin\phi \cos\theta \\ \dot{\psi} \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin\theta \\ \dot{\theta} \cos\phi + \dot{\psi} \sin\phi \cos\theta \\ \dot{\psi} \cos\phi \cos\theta - \dot{\theta} \sin\phi \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Pour les petites rotations, on peut faire les approximations suivantes :

$$\cos\phi = \cos\theta = \cos\psi = 1, \text{ et } \sin\phi = \sin\theta = \sin\psi = 0$$

Donc la vitesse angulaire sera :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T \quad (3.7)$$

#### • Vitesses linéaires

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 :

$$V = \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} v_x^m \\ v_y^m \\ v_z^m \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

### 3.1.2 Effets physiques agissants sur le quadrotor

#### 3.1.2.1 Les forces

Les différentes forces agissant sur ce système sont :

- **Le poids du quadrotor**

il est donné par  $P = mg$ , où :  $m$  est la masse totale et  $g$  la gravité.

- **Les forces de poussée**

Qui sont des forces provoquées par la rotation des moteurs, elles sont perpendiculaires sur le plan des hélices. Ces forces sont proportionnelles au carré de la vitesse de rotation des moteurs [18] et [19] :

$$F_i = b\omega_i^2 \quad (3.9)$$

Avec  $i = \overline{1:4}$  et  $b$  le coefficient de portance, il dépend de la forme et le nombre des pales

et la densité de l'aire.

- **Les forces de traînée**

La force de traînée est le couplage entre une force de pression et la force de frottement visqueux, dans ce cas on a deux forces de traînée agissant sur le système qu'elles sont :

- \* La traînée dans les hélices

Elle agisse 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 la relation suivante :

$$T_h = d\omega^2 \quad (3.10)$$

Avec  $d$  est le coefficient de drag, il dépend de la fabrication des hélices.

- \* La traînée selon les axes (x, y, z) : elle est due au mouvement du corps du quadrotor

$$F_i = K_{ft}v \quad (3.11)$$

Avec :  $K_{ft}$  le coefficient de traînée de translation et  $v$  la vitesse linéaire.

### 3.1.2.2 Les moments

Il y a plusieurs moments agissants sur le quadrotor, ces moments sont dus aux forces de poussée et de traînée et aux effets gyroscopiques.

- **Moments dus aux forces de poussée**

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

$$M_x = l(F_4 - F_2) = lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (3.12)$$

Avec  $l$  la longueur de bras entre le rotor et le centre de gravité du quadrotor.

- \* La rotation autour de l'axe y : elle est due au moment créée par la différence entre les forces de portance des rotors 1 et 3, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_y = l(F_4 - F_2) = lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (3.13)$$

• **Moments dus aux forces de traînée**

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

$$M_2 = d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \tag{3.14}$$

\* Moment résultant des frottements aérodynamiques, il est donné par :

$$M_a = K_{fa}\Omega^2 \tag{3.15}$$

Avec,  $K_{fa}$  : Le coefficient des frottements aérodynamiques et  $\Omega$  est la vitesse angulaire.

**3.1.2.3 Effet gyroscopique**

L'effet gyroscopique se définit comme la difficulté de modifier la position ou l'orientation du plan de rotation d'une masse tournante. Il est ainsi nommé en référence au mode de fonctionnement du gyroscope, appareil de contrôle de mouvement utilisé dans l'aviation (du grec gyro qui signifie rotation et scope, observer). Dans notre cas il y a deux moments gyroscopiques, le premier est causé par les hélices, l'autre est causé par le mouvement de quadrotor.

• Moment gyroscopique des hélices : il est donné par la relation suivante :

$$M_{gh} = \sum_1^4 \Omega \wedge J_r [00(-1)^{j+1}\omega_j]^T \tag{3.16}$$

Avec,  $J_r$  est l'inertie des rotors

• Moment gyroscopique dû aux mouvements de quadrotor : il est donné par la relation suivante :

$$M_{gm} = \Omega \wedge j\Omega \tag{3.17}$$

### 3.1.3 Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler

Grace à l'utilisation de la formulation de Newton-Euler, les équations sont écrites sous la forme suivante :

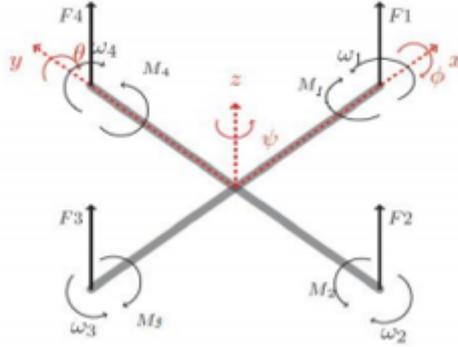


FIGURE 3.3: Identification du sens de rotation des rotors

$$o = g(h) = \begin{cases} \dot{\xi} = v \\ m \ddot{\xi} \\ \dot{R} = RS(\Omega) \\ J \dot{\Omega} = -\Omega \wedge J\Omega + M_f - M_a - M_{gh} \end{cases} \quad (3.18)$$

Avec  $\xi$  : est le vecteur de position du quadrotor  $m$  : la masse totale (quadrotor + robot)  $\omega$  : La vitesse angulaire exprimée dans le repère fixe  $R$  : La matrice de rotation  $\wedge$  : Le produit vectoriel  $J$  : matrice d'inertie symétrique de dimension (3x3), elle est donnée par :

$$J = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

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

$$S(\Omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

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

$$F_f = R \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sum_{i=1}^4 F_i \end{bmatrix}^T \quad (3.21)$$

$F_t$  : la force de traînée selon les axes (x, y, z), elle est donnée par :

$$F_t = \begin{bmatrix} -K_{ftx} & 0 & 0 \\ 0 & -K_{fty} & 0 \\ 0 & 0 & -K_{ftz} \end{bmatrix} \dot{\xi} \quad (3.22)$$

$K_{ftx}, K_{fty}, K_{ftz}$  : Les coefficients de traînée de translation.

$F_g$  : force de gravité, elle est donnée par :

$$F_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$M_f$  : moment provoqué par les forces de poussée et de traînée.

$$M_f = \begin{bmatrix} l(F_4 - F_2) \\ l(F_3 - F_1) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$M_a$  : moment résultant des frottements aérodynamiques, il est donnée par :

$$M_a = \begin{bmatrix} K_{fax} \dot{\phi} \\ K_{fay} \dot{\theta} \\ K_{faz} \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$K_{fax}, K_{fay}, K_{faz}$  : les coefficients des frottements aérodynamiques.

### 3.1.4 Equations de mouvement de translation

Après avoir présenté les équations des forces dans les sections précédentes, nous pouvons actuellement passer au modèle complet du quadrotor, nous utilisons la deuxième loi de Newton dans le cas de mouvement linéaire on a la formule suivante :

$$m \ddot{\xi} = F_f + F_t + F_g \quad (3.26)$$

On remplace chaque force par sa formule, on trouve :

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\psi\sin\theta + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i - \begin{bmatrix} K_{ftx} \dot{x} \\ K_{fity} \dot{y} \\ K_{ftz} \dot{z} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

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

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m}(\cos\phi\cos\psi\sin\theta + \sin\phi\sin\psi)(\sum_1^4 F_i) - \frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = \frac{1}{m}(\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi)(\sum_1^4 F_i) - \frac{K_{fity}}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m}(\cos\phi\cos\theta) - \frac{F_{ftz}}{m} \dot{z} - g \end{cases} \quad (3.28)$$

### 3.1.5 Equations de mouvement de rotation

Nous avons appliqué le même principe de Newton pour le cas de rotation, on trouve la formule suivante :

$$J \dot{\Omega} = -\Omega \wedge J\Omega + M_f - M_a - M_{gh} \quad (3.29)$$

On remplace chaque moment par l'expression correspondant, on trouve :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \\
 - \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \wedge \left( \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} \\ -J_r \bar{\Omega}_r \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{fax} \dot{\phi}^2 \\ K_{fay} \dot{\theta}^2 \\ K_{faz} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ d(\omega_2^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

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

$$\begin{cases} I_x \ddot{\phi} = -\dot{\theta} \dot{\psi} (I_z - I_y) - J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} - K_{fax} \dot{\phi}^2 + lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ I_y \ddot{\theta} = \dot{\phi} \dot{\psi} (I_z - I_x) + J_r \bar{\Omega}_r \dot{\phi} - K_{fay} \dot{\theta}^2 + lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ I_z \ddot{\psi} = \dot{\phi} \dot{\theta} (I_y - I_x) - K_{faz} \dot{\psi}^2 + d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \tag{3.31}$$

Avec :

$$\bar{\Omega} = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 \tag{3.32}$$

En conséquence, le modèle dynamique complet qui régit le quadrotor est le suivant :

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \dot{\phi} \dot{\psi} - \frac{J_r}{I_x} \bar{\Omega}_r \dot{\theta} - \frac{K_{fax}}{I_x} \dot{\phi}^2 + \frac{l}{I_x} U_2 \\ \ddot{\theta} = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J_r}{I_y} \bar{\Omega}_r \dot{\phi} - \frac{K_{fay}}{I_y} \dot{\theta}^2 + \frac{l}{I_y} U_3 \\ \dot{\psi} = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\theta} \dot{\phi} - \frac{K_{faz}}{I_z} \dot{\psi}^2 + \frac{l}{I_z} U_4 \\ \ddot{x} = -\frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} + \frac{1}{m} U_y U_1 \\ \ddot{y} = -\frac{K_{fty}}{m} \dot{y} + \frac{1}{m} U_x U_1 \\ \ddot{z} = -\frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g + \frac{\cos(\phi)\cos(\theta)}{m} U_1 \end{cases} \tag{3.33}$$

Avec :

$$\begin{cases} U_x = (\cos\phi \cos\psi \sin\theta + \sin\phi \sin\psi) \\ U_y = (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \end{cases} \tag{3.34}$$

Pour la matrice d'allocation, nous avons :

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb \\ d & -d & d & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Où les entrées sont choisi tels que :

$U_1$  : est la commande de la puissance.

$U_2$  : est la commande du roulis.

$U_3$  : est la commande du tangage.

$U_4$  : est la commande du lacet.

### 3.1.6 Représentation d'état du système

Pour un système physique il existe une multitude de représentations d'état, dans notre cas on choisit le vecteur d'état comme suit [16-1-2-27] :

$$X = \begin{bmatrix} \phi & \dot{\phi} & \theta & \dot{\theta} & \psi & \dot{\psi} & x & \dot{x} & y & \dot{y} & z & \dot{z} \end{bmatrix}^T$$

$$= \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} & x_{11} & x_{12} \end{bmatrix}^T$$

On obtient la représentation d'état suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3 \bar{\Omega}_T x_4 + b_1 U_2 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = a_4 x_2 x_6 + a_5 x_4^2 + a_6 \bar{\Omega}_T x_2 + b_2 U_3 \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = a_7 x_2 x_4 + a_8 x_6^2 + b_2 U_4 \\ \dot{x}_7 = x_8 \\ \dot{x}_8 = a_9 x_8 + \frac{1}{m} U_k U_1 \\ \dot{x}_9 = x_{10} \\ \dot{x}_{10} = a_{10} x_{10} + \frac{1}{m} U_y U_1 \\ \dot{x}_{11} = x_{12} \\ \dot{x}_{12} = a_{11} x_{12} + \frac{\cos(\phi)\cos(\theta)}{m} U_1 - g \end{array} \right. \quad (3.36)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{(I_y - I_z)}{I_x}, a_2 = -\frac{K_{fax}}{I_x}, a_3 = -\frac{I_r}{I_x}, \\ a_5 = -\frac{K_{fay}}{I_y}, a_6 = \frac{I_r}{I_y}, a_7 = \frac{(I_x - I_y)}{I_7}, \\ a_8 = -\frac{K_{faz}}{I_z}, a_9 = -\frac{K_{ftx}}{m}, a_{10} = -\frac{K_{fity}}{m}, \\ a_{11} = -\frac{K_{ftz}}{m}, b_1 = \frac{l}{l_x}, b_2 = \frac{l}{l_y}, \\ b_3 = \frac{l}{l_7} \end{array} \right.$$

## 3.2 Mode terrestre

Dans cette partie, notre système est considéré comme un robot mobile a roues (robot mobile unicycle) et aussi on a considéré que le drone c'est une charge sur le robot. Notre système c'est un véhicule terrestre à deux roues et aussi une roue folle donc on peut faire la modélisation a partir des deux roues qui sont reliées aux moteurs.

### 3.2.1 Géométrie de robot

Le schéma d'un robot de type unicycle est donné sur Figure 3.4. Nous avons supprimé la roue folle qui n'intervient pas dans la cinématique.

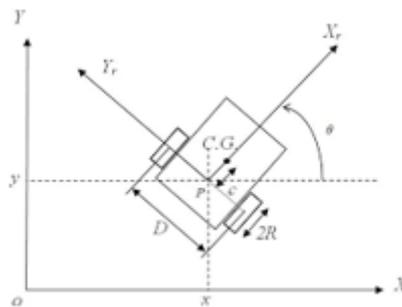


FIGURE 3.4: Paramètres du robot

Figure montre la géométrie d'un robot de type unicycle pour faire obtenir les paramètres suivants :

- La distance entre les deux roue motrice  $D$ .
- Le rayon des roues motrices  $R_a$ .

### 3.2.2 Modèle cinématique du robot

En appliquant les conditions de roulement sans glissement, nous pouvons écrire la vitesse longitudinale et la vitesse de rotation en fonction des vitesses de rotations de la roue motrice, nous obtenons [20] :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (3.37)$$

$$\omega = \frac{v_2 + v_1}{D} \quad (3.38)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} v_1 = R_a \omega_1 \\ v_2 = R_a \omega_2 \end{cases}$$

Et on utilise des capteurs montés sur les roues pour obtenir les vitesses de rotations  $(\omega_1, \omega_2)$ .

Le modèle cinématique du robot à trois degrés de liberté est représenté comme suit :

$$\begin{cases} x = \int v \cos(\theta) dt \\ y = \int v \sin(\theta) dt \\ \theta = \int \omega dt \end{cases} \quad (3.39)$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

## 3.3 Simulation

### 3.3.1 Commande par backstepping de notre systeme

#### 3.3.1.1 Synthèse des lois de commande pour le quadrotor

On propose, dans cette section, une stratégie de commande basée principalement sur deux boucles (boucle interne et boucle externe). La boucle interne contient quatre lois de commande : commande de roulis ( $\phi$ ), commande de tangage ( $\theta$ ), commande de lacet ( $\psi$ ) et commande d'altitude Z. La boucle externe inclut deux lois de commande de positions x et y. La boucle de commande externe génère une désirée pour le mouvement de roulis ( $\theta_d$ ) et de tangage ( $\phi_d$ ) en passant par le bloc de correction. Ce bloc corrige la rotation de roulis et de tangage en fonction du désiré de lacet ( $\psi_d$ ). Le Figure 3.5 ci-dessous représente la stratégie de commande du quadrotor :

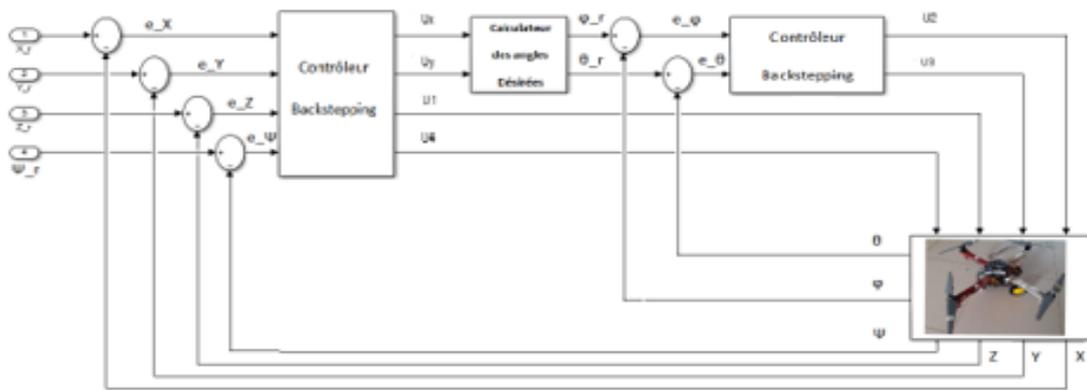


FIGURE 3.5: Illustration de la structure de commande du quadrotor

### 3.3.2 Mode de navigation aérienne

Dans cette section, la technique de marche sera appliquée au modèle quadrotor développé dans le chapitre précédent. Le choix de cette méthode n'est pas fortuit compte tenu des avantages majeurs qu'elle présente :

- Elle assure la stabilité de Liapounov.
- Elle assure la robustesse et toutes les propriétés de la dynamique souhaitée.
- Elle assure la gestion de tous les systèmes non-linéaires.

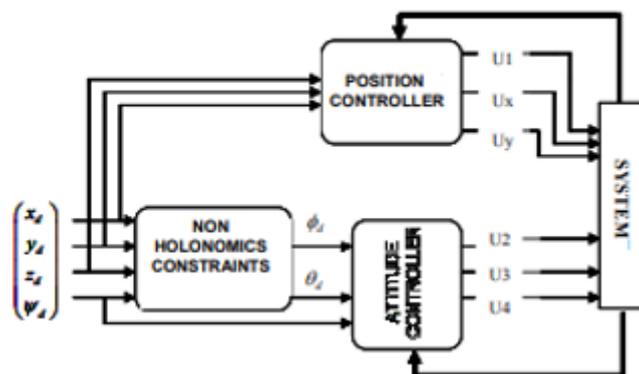


FIGURE 3.6: Schéma synoptique de la proposition contrôleur

**Etape 1**

Pour le sous système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3 \bar{\Omega}_r x_4 + b_1 U_2 \end{cases} \quad (3.41)$$

On a :

$$\begin{cases} e_1 = \phi_d - x_1 \\ V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \end{cases} \quad (3.42)$$

La dérivée de la fonction de lyaponov est donnée par :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (\dot{\phi}_d - x_2) \quad (3.43)$$

La stabilisation de  $e_1$  peut être garantie par l'introduction d'une nouvelle entrée de commande virtuelle  $x_2$

$$x_{2d} = \dot{\phi}_d + k_1 e_1 \quad (3.44)$$

Et (4.55) devient :

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0 \quad (3.45)$$

**Etape 2**

On considère la deuxième variable d'erreur :

$$\begin{cases} e_2 = \dot{\phi}_d + k_1 e_1 - x_2 \\ V_2 = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2) \end{cases} \quad (3.46)$$

La dérivée de la nouvelle fct est :

$$\dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 = e_1 (-k_1 e_1 + e_2) + e_2 (\ddot{\phi}_d + k_1 \dot{e}_1 - a_1 x_4 x_6 - a_2 x_2^2 - a_3 \bar{\Omega}_r x_4 - b_1 U_2) \quad (3.47)$$

Alors la loi de commande  $U_2$  est déduite en satisfaisant  $\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0$  :

$$U_2 = \frac{1}{b_1} (-a_1 x_4 x_6 - a_2 x_2^2 - a_3 \bar{\Omega}_r x_4 + \ddot{\phi}_d + k_1 (-k_1 e_1 + e_2) + k_2 e_2 + e_1) \quad (3.48)$$

Les mêmes étapes sont reprises afin d'extraire  $U_1, U_3, U_4, U_x$  et  $U_y$

$$\begin{cases} U_1 = \frac{m}{\cos x_1 \cos x_2} (g - a_{11} x_{12} + \ddot{z}_d + k_{11} (-k_{11} e_{11} + e_{12}) + k_{12} e_{12} + e_{11}) \\ U_3 = \frac{1}{b_2} (-a_4 x_2 x_6 - a_5 x_4^2 - a_6 \bar{\Omega}_r x_2 + \ddot{\theta}_d + k_3 (-k_3 e_3 + e_4) + k_4 e_4 + e_3) \\ U_4 = \frac{1}{b_3} (-a_7 x_2 x_4 - a_8 x_6^2 + N \ddot{\psi}_d + k_5 (-k_5 e_5 + e_6) + k_6 e_6 + e_5) \\ U_x = \frac{m}{U_1} (-a_9 a_8 + \ddot{x}_d + k_7 (-k_7 e_7 + e_8) + k_8 e_8 + e_7 / U_1 \neq 0) \\ U_y = \frac{m}{U_1} (-a_{10} a_{10} + \ddot{y}_d + k_9 (-k_9 e_9 + e_{10}) + k_{10} e_{10} + e_9 / U_1 \neq 0) \end{cases} \quad (3.49)$$

Tel que :

$$e_i = \begin{cases} x_{id} - x_i / i \in [3, 5, 7, 9, 11] \\ \dot{x}_{(i-1)d} + k_{(i-1)} e_{(i-1)} - x_i / i \in [4, 6, 8, 10, 12] \end{cases} \quad (3.50)$$

Les fonctions prennent la forme suivante :

$$V_i = \begin{cases} \frac{1}{2} e_i^2 - x_i / i \in [3, 5, 7, 9, 11] \\ V_{(i-1)} = \frac{1}{2} e_i^2 / i \in [4, 6, 8, 10, 12] \end{cases} \quad (3.51)$$

Figure 3.7 représente l'illustration de la structure de commande du quadrotor par bachstepping.

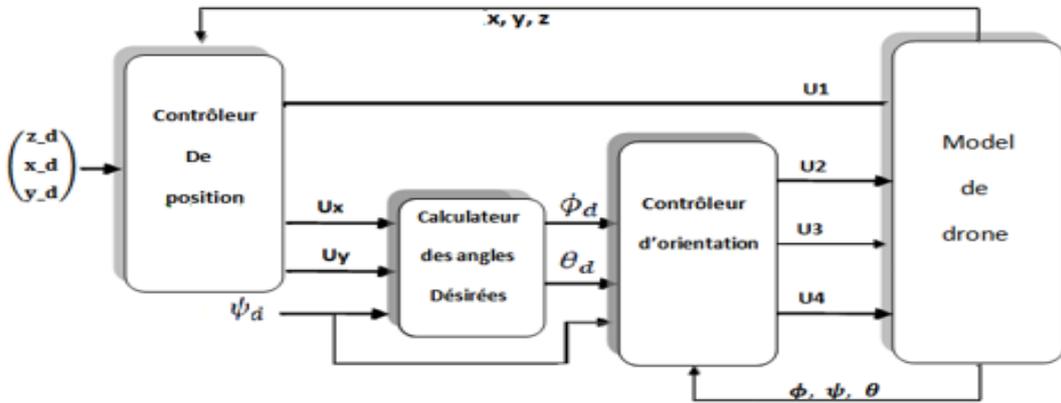


FIGURE 3.7: Illustration de la structure de commande du quadrotor par bachstepping

### 3.3.3 Mode de navigation terrestre

Considérons le robot mobile de type unicycle a une position arbitraire  $[x_0, y_0, \theta]$  a une distance non nulle de la position désirée  $[x_d, y_d, \theta]$  définit par rapport au cadre inertiel global.

Nous avons vus dans la section (3.40) que le modèle cinématique du robot est représenté par les équations suivantes :

$$\begin{cases} x = \int v \cos(\theta) dt \\ y = \int v \sin(\theta) dt \\ \theta = \int \omega dt \end{cases} \quad (3.52)$$

Où :  $v \cos \theta$  et  $v \sin \theta$  sont les composantes de vitesse le long de ses axes X et Y respectivement. La position x,y et l'orientation  $\theta$  sont mesurées par rapport au cadre inertiel de référence. L'algorithme de contrôle par bachstepping être conçu pour piloter le robot a partir de sa configuration actuelle. Considérons la forme quadratique définit positive de la fonction de lyapunov :

$$V = V_1 + V_2 = \frac{1}{2} \rho^2 + \frac{1}{2} a^2 \quad (3.53)$$

Où les paramètres  $V_1, V_2$  representent la moitié des normes pondérées au carré d est vecteur d' erreur de distance", Où  $\rho$  et le(vecteur d'erreur d'orientation)et  $\alpha$  présentée par le robot au cours de mouvement. La dérivée temporelle est donnée comme suit :

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \dot{\rho} + \dot{a} \quad (3.54)$$

Tel que :

$$\dot{\rho} = -v \cos(a) \quad (3.55)$$

$$\dot{a} = -\omega + \frac{v \sin a}{\rho} \quad (3.56)$$

Donc :

$$\dot{V} = \rho(-v \cos a) + a(-\omega + \frac{v \sin a}{\rho}) \quad (3.57)$$

A partir de l'équation précédente, le premier terme peut être rendu non positif en laissant la vitesse linéaire de la forme :

$$v = k_\rho \rho \cos a, k_\rho > 0 \quad (3.58)$$

$$\dot{V}_1 = \rho(-k_\rho \rho \cos^2 a) = -k_\rho \rho^2 \cos^2 a \leq 0 \quad (3.59)$$

Cela signifie que le terme  $\dot{V}_1$  est toujours semi-défini négatif non croissant dans le temps et par conséquent, il converge vers une limite finie non négative. De même, le second terme  $\dot{V}_2$  peut être rendu positif en laissant la vitesse angulaire prendre la forme :

$$\begin{cases} \omega = k_\rho \sin a \cos a + k_a a \\ k_a > 0 \end{cases} \quad (3.60)$$

$$\dot{V}_2 = a(-k_\rho \sin a \cos a - k_a a + \frac{k_\rho \rho \sin a \cos a}{\rho}) = -k_a a^2 \leq 0 \quad (3.61)$$

Conduisant finalement à l'expression suivante pour la dérivée temporelle de la fonction de Lyapunov V :

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = -k_\rho \rho^2 \cos^2 a - k_a a^2 \leq 0 \quad (3.62)$$

Le résultat est une forme définie négative, donc la stabilité selon Lyapunov est assurée pour notre système.

## 3.4 Simulation numérique

### 3.4.1 Mode aérien

Ces résultats ont été obtenus en utilisant les paramètres du Tableau 3.1 :

#### 3.4.1.1 Vol linéaire

Pour la deuxième tâche, nous avons simulé une trajectoire linéaire composée de plusieurs déplacements, qui est le résultat de changements rapides de position linéaire. Pour  $t \in [0, 5s]$  :

Paramètres	Valeurs
$I_{xx}$	$3.8278e-3 \text{ kg } m^2$
$I_{yy}$	$3.8288e-3 \text{ kg } m^2$
$I_{zz}$	$7.6566e-3 \text{ kg } m^2$
$J_r$	$2.8385e-5 \text{ kg } m^2$
$g$	$9.81 \text{ m/s}^2$
$d$	$0.25 \text{ m}$
$m$	$1.45 \text{ KG}$
$W_r$	$1$

TABLE 3.1: Les paramètres du quadrotor

déplacement vertical vers le haut.

$$x_d(t) = 0;$$

$$y_d(t) = 0;$$

$$z_d(t) = t;$$

Pour  $t \in [5s, 10s]$  : déplacement horizontal suivant x à une altitude de 5m.

$$x_d(t) = t - 5;$$

$$y_d(t) = 0;$$

$$z_d(t) = 5;$$

Pour  $t \in [10s, 15s]$  : déplacement horizontal suivant y à une altitude de 5m.

$$x_d(t) = 5;$$

$$y_d(t) = t - 10;$$

$$z_d(t) = 5;$$

Pour  $t \in [15s, 20s]$  : déplacement horizontal pour le retour à x=0

$$x_d(t) = 20 - t;$$

$$y_d(t) = 5;$$

$$z_d(t) = 5;$$

Pour  $t \in [20s, 25s]$  : déplacement horizontal pour le retour à y=0

$$x_d(t) = 0;$$

$$y_d(t) = 25 - t;$$

$$z_d(t) = 5;$$

Pour  $t \in [25s, 30s]$  : déplacement vertical vers le bas pour le retour à z=0  $x_d(t) = 0;$

$$y_d(t) = 0;$$

$$z_d(t) = 30 - t;$$

La courbe décrivant la reponse de système pour les commandes est représenté sur Figure 3.8.

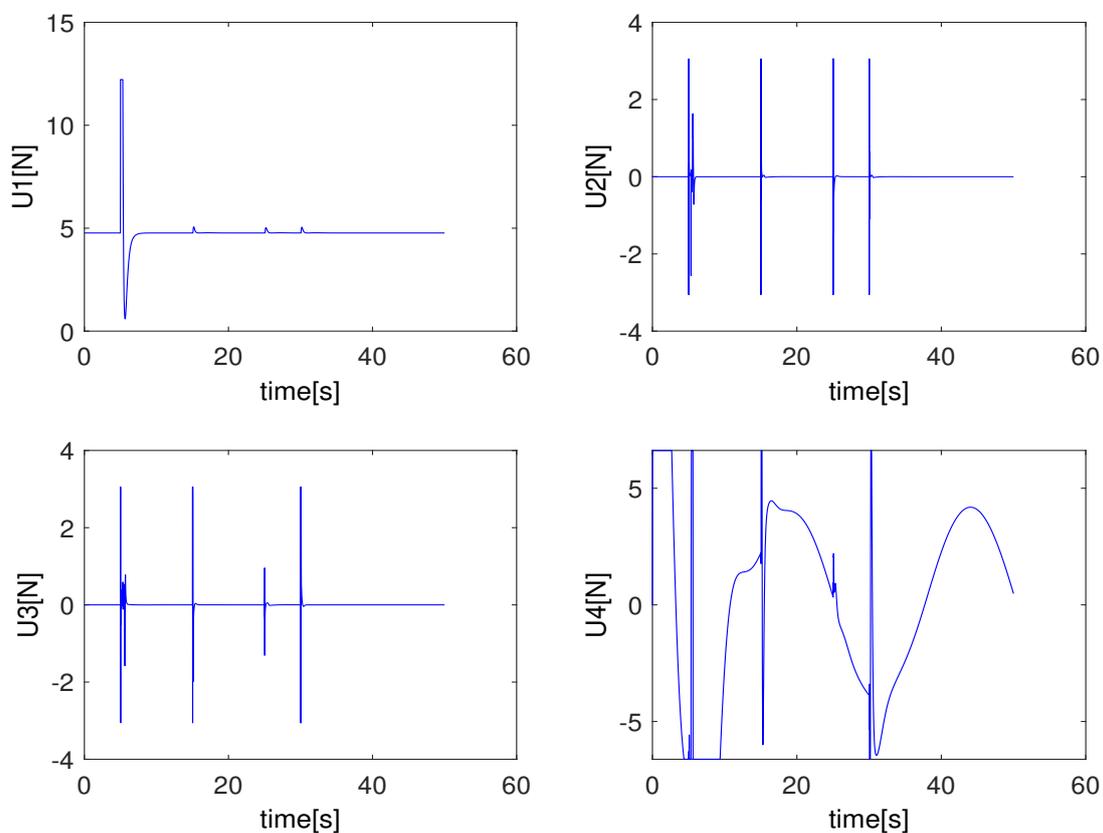


FIGURE 3.8: Poursuite des commandes en vol linéaire

La poursuite de la position angulaire en vol linéaire est illustrée à Figure 3.9

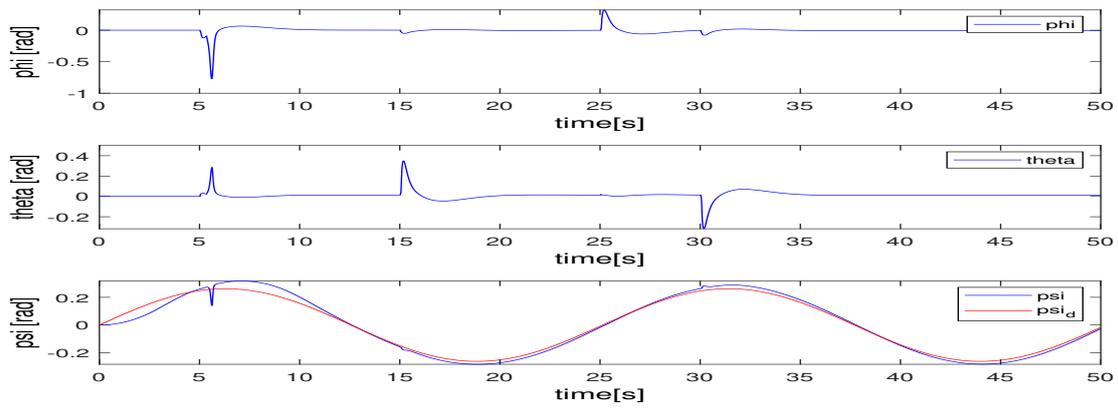


FIGURE 3.9: Poursuite des positions angulaires en vol linéaire.

La poursuite de la position angulaire en vol linéaire est illustrée à Figure 3.10.

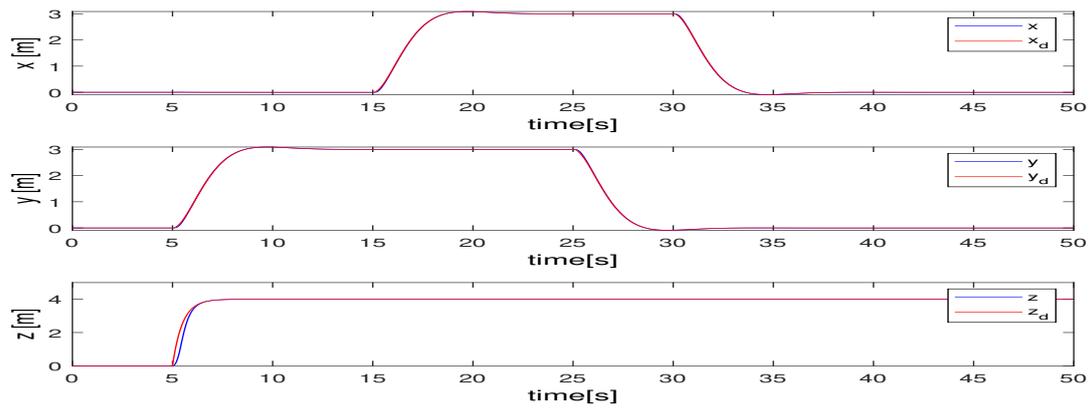


FIGURE 3.10: Poursuite de position en vol linéaire

Comme le montrent les figures 3.8,3.9,3.10 nous avons remarqué que le contrôleur peut effectuer ce type de manœuvre tout en assurant la continuité de la trajectoire et en maintenant les angles de roulis et de tangage dans une plage raisonnable. , Le taux d'erreur est faible. Figure 3.11 montre la trajectoire de référence ainsi que la trajectoire effectuée par le quadrotor en simulation 3D sur MATLAB :

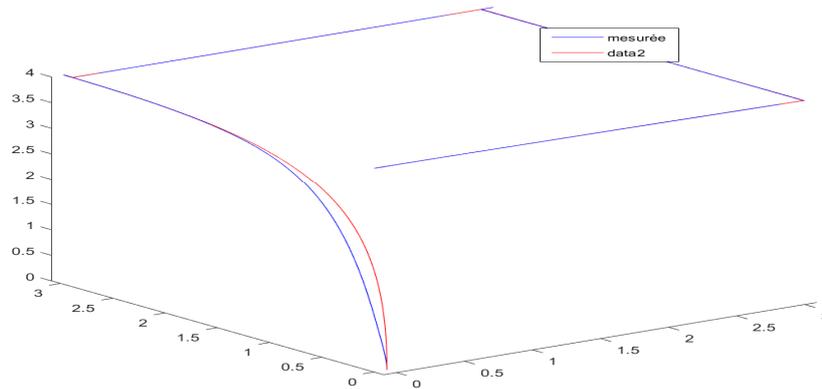


FIGURE 3.11: La trajectoire effectuée en 3D

### 3.4.2 Mode terrestre

Dans cette tâche, nous avons considéré que notre véhicule est un robot mobile prenant une charge. Nous avons fait des scénarios qui montrent les mouvements qui sont effectués à partir des paramètres suivants :

$$\alpha = 1.996e - 07$$

$$k_a = 0$$

$$k_\rho = 0$$

$$\rho = 8.1911$$

On a fait une forme de triangle pour le robot en choisissant les points centrale des trois roues (les deux roues motrices avec la roue folle) comme le montre dans Figure 3.9.

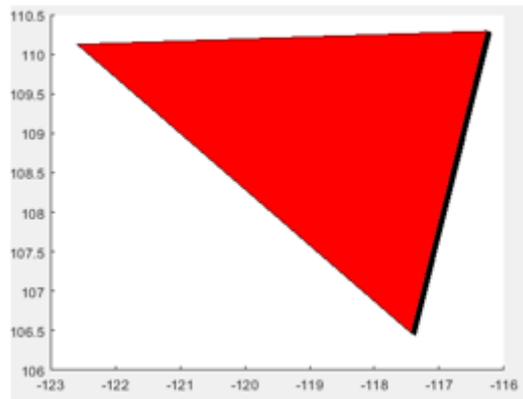


FIGURE 3.12: Présentation du robot sur matlab

Figure (3.13 ,a et b) montre la trajectoire et l'évolution du mouvement du robot qui se déplace dans un espace ou il n'y a aucun obstacle.

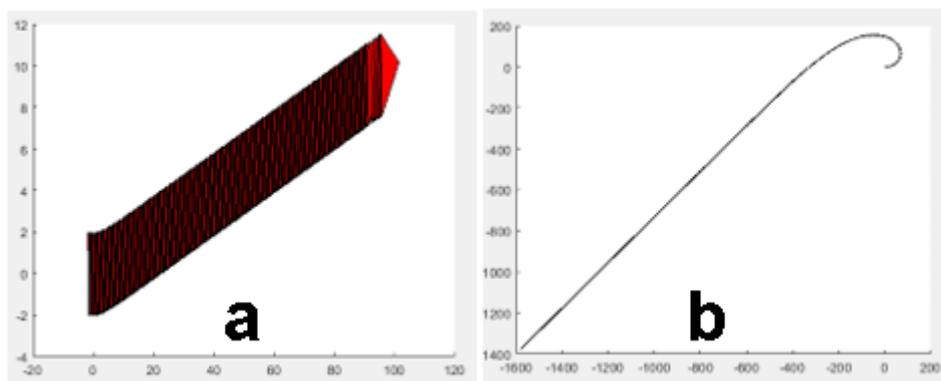


FIGURE 3.13: Navigation du robot dans un terrain

Les trois mouvements principaux qui peuvent s'effectuer par le robot sont : avancer, tourner a gauche et tourner a droite comme montre la Figure 3.14.

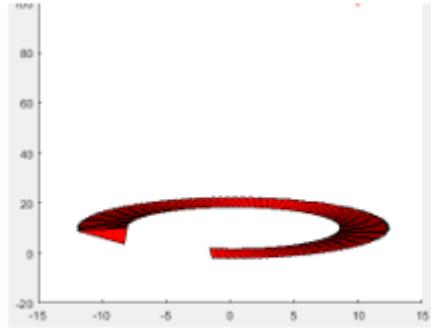


FIGURE 3.14: Les mouvements principaux du robot

## Conclusion

Ce chapitre présente le modèle dynamique pour le mode aérien (drone) et le mode terrestre (robot mobile) selon des hypothèses qui nous permet de simplifier notre système.

Pour le mode aérien et qui est le même , on a modélisé le système selon le formalisme de Newton–Euler afin de s’approcher le plus possible de la dynamique réelle du quadrotor.

Nous avons contrôler notre système par la commande backstepping afin de visualiser les différents sinario effectué par le drone les deux mode.

Dans le prochaine chapitre, nous allons présenter toute les étape et les testes de la réalisation.

# Chapitre 4

## Realisation de notre vehicule hybride

## Introduction

Dans ce chapitre nous présentons brièvement le matériel utilisé qui est disponible dans la plateforme et les étapes de la construction de notre véhicule, ainsi que le système de commande embarqué utilisé pour son contrôle. Puis, nous présentons les étapes de configuration et calibrage de notre système, et enfin, nous faisons un test de vol sur terrain.

### 4.1 Principe globale de fonctionnement

Dans cette partie nous allons présenter le mode général de fonctionnement de notre véhicule hybride. Le système se compose de deux grandes parties qui sont le quadrirotor et le robot unicycle et qui sont télécommandés par une radio commande T8J.

- Cas de navigation aérienne :

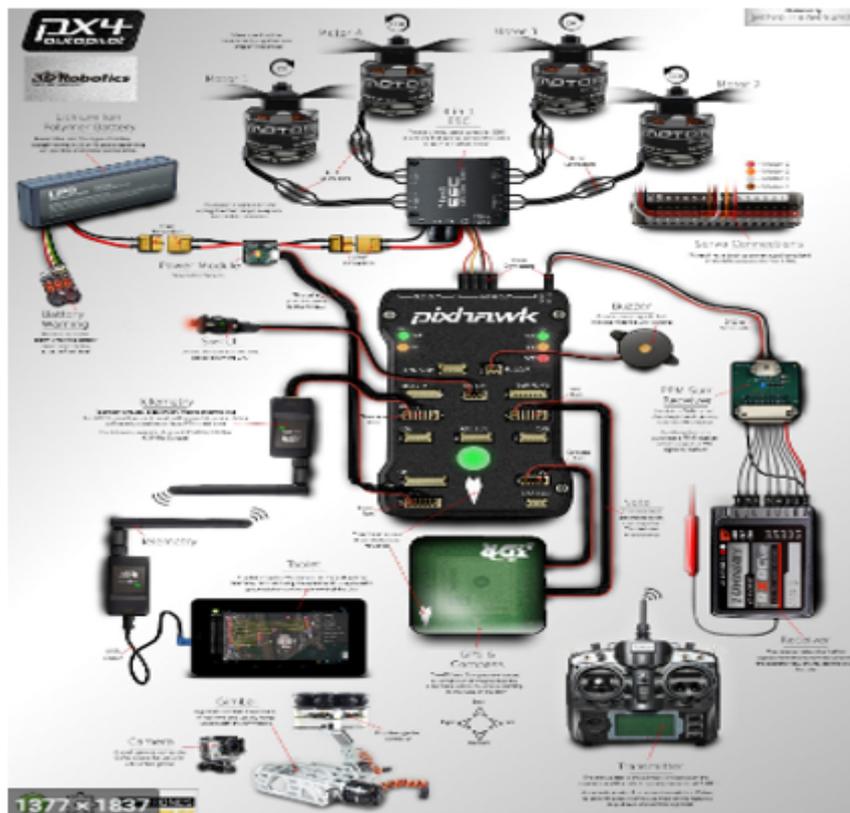


FIGURE 4.1: Mécanisme de fonctionnement de quadrirotor

La figure 4.1 représente le mécanisme de fonctionnement du quadrirotor. Une radiocommande se compose tout d'abord d'un boîtier mécanique doté de sticks. Ceux-ci peuvent

revêtir d'autres formes comme un volant, une gâchette, etc. Ces dispositifs mécaniques envoient des signaux électriques à un boîtier qui lui-même les transforme en signaux numériques. Enfin, ces signaux seront convertis en signaux radio par le biais d'un émetteur radio se trouvant dans le boîtier. Toutes les radiocommandes en sont pourvues. Mais ces émetteurs ne sont programmés que pour une seule fréquence. Donc par utilisation de cette commande et à partir de ses chaînes on peut envoyer nos angles désirés grâce à son émetteur qui est capable d'envoyer plusieurs signaux simultanément.

Le récepteur va recevoir en même temps les signaux envoyés par la radio commande. Il est capable de les différencier et de les réaffecter à l'action qui lui incombe. Ce récepteur peut recevoir jusqu'à 8 instructions différentes, ce qui permet un pilotage de plus en plus précis.

Ce dernier envoie ces ordres vers le contrôleur de vol qui est le pixhawk et le responsable sur le vol c'est-à-dire le pixhawk va traiter ses données pour connaître le mode de vol désiré donc il envoie autrefois ses commandes sous forme de vitesses vers les ESCs puis vers les moteurs brushless. Le moteur va tourner selon des vitesses désirées donc cette rotation est la cause pour la rotation des hélices qui sont les derniers composants qui assurent le vol ou le mouvement désiré.

- **Cas de navigation terrestre :**

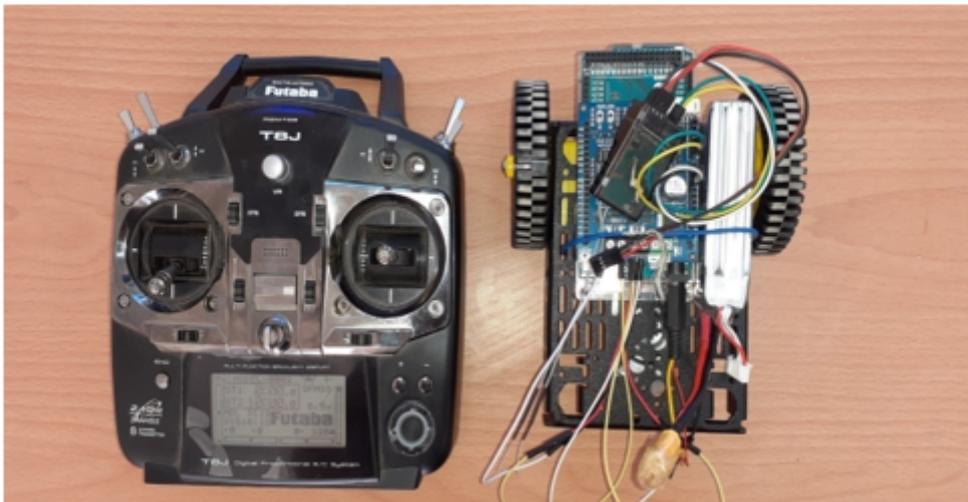


FIGURE 4.2: Mécanisme de fonctionnement de quadrirotor

## 4.2 R

Au début de notre projet, on a commencé à réaliser les deux parties séparément c'est-à-dire nous avons réalisé le quadrotor puis le robot mobile puis nous avons fait l'assemblage au niveau hardware et software.

### 4.2.1 La réalisation de quadrotor

Un quadrotor est un objet volant composé de quatre moteurs munis d'hélices disposés aux quatre extrémités d'une croix en métal, ou un autre matériau (le composite carbone). Chaque moteur est relié à un variateur de vitesse, les quatre variateurs étant pilotés par une carte de commande, qui reçoit leurs ordres d'un récepteur de radio-commande.

#### 4.2.1.1 Assemblage complet de drone

Dans cette partie, nous allons parler des différents composants qui entrent dans la réalisation de notre quadrotor comme le montre la figure 4.3. La fabrication d'un quadrotor nécessite un nombre important de composants. Nous pouvons citer entre autres :

- 1) Le châssis avec une conception en modèle " X ".
- 2) Quatre moteurs brushless CF2822.
- 3) Quatre hélices (2 pour le sens horaire et 2 autres pour le sens anti-horaire).
- 4) Quatre Contrôleurs de vitesse (ESC).
- 5) Un Contrôleur de vole(pixhawk).
- 6) Une batterie LIPO.
- 7) Uneradio-commande.
- 8) Récepteur, buzzer, distributeur d'énergie.

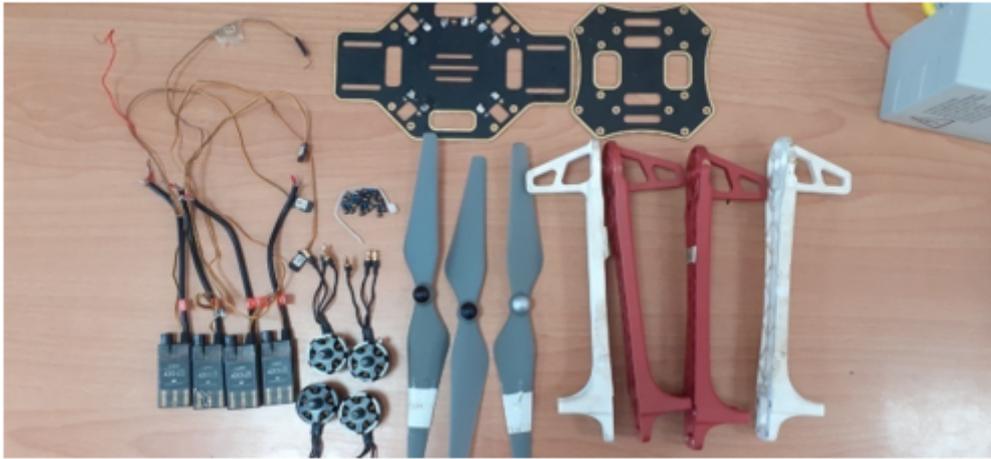


FIGURE 4.3: Différents composants de drone

- **Assemblage du châssis seul**

**Etape 1 :** Assembler le plateau centrale avec les quatre bras en fibre de verre en utilisant les vis, pour ensuite monter les quatre pieds à chaque bras et enfin les supports moteurs. Nous avons soudé les quatre ESCs sur le plateau inférieur comme le montre la figure 4.4, puis on a lié ses derniers avec les quatre moteurs et à chaque moteur on a monté une hélice.

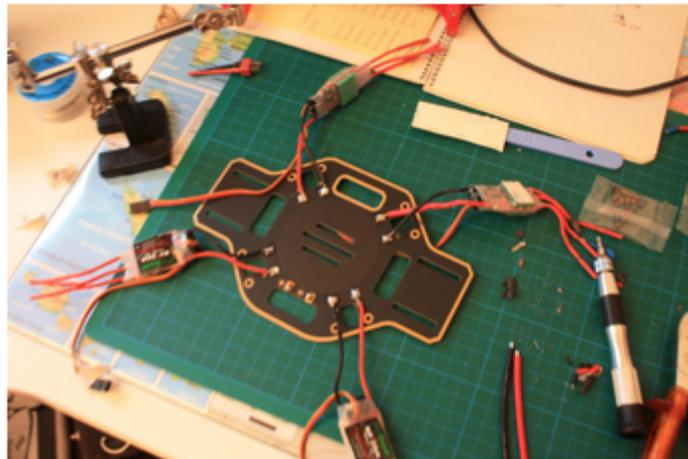


FIGURE 4.4: Le soudeur des ESCs

**Etape 2 :** Monter le plateau supérieur à l'aide des vis. A la fin d'assembler le châssis nous avons monté les autres pièces comme suit :

Monter la carte de vol PIXHAWK comme le montre la figure 4.5 sur le plateau supérieur du châssis, nous respectons les mêmes directions (le drone et le PIXHAWK sont vers la même direction). Aussi nous avons monté le récepteur Futaba et le GPS sur le pixhawk.



FIGURE 4.5: Le pixhawk

- **Rôle du PixHawk**

Le pilotage automatique fournit une plateforme de vol stable qui permet un contrôle manuel et automatique précis, sur la position, la vitesse, l'orientation et les actions du véhicule. Les comportements de contrôle pris en charge sont disponibles via des modes de vol/contrôle du pilote automatique

- \* Modes de vol manuels (par RC) comme Stabilise, Alt Hold et Loiter, fournissent différents types de stabilisation et rendre les véhicules plus faciles à voler et positionner. D'autres modes manuels comme Follow Me et RTL (Return-to-lancement) d'automatisation des tâches nécessiteraient des ajustements manuels complexes.
- \* AUTO mode permet d'exécuter des missions complexes qu'on peut définir à l'aide d'une station de contrôle au sol (GCS).
- \* Un ordinateur compagnon peut communiquer et effectuer des tâches. La stabilité, la précision et la flexibilité en termes du contrôle manuel et automatisé, font la plateforme idéale pour de nombreuses applications des drones.

La figure 4.6 représente les entrées et les sorties d'un PixHawk.



FIGURE 4.6: Les Entrées/Sorties d'un PixHawk

#### 4.2.1.2 La structure générale (complète) de notre drone quadrotor

La figure 4.7 représente l'état final du drone réalisé :

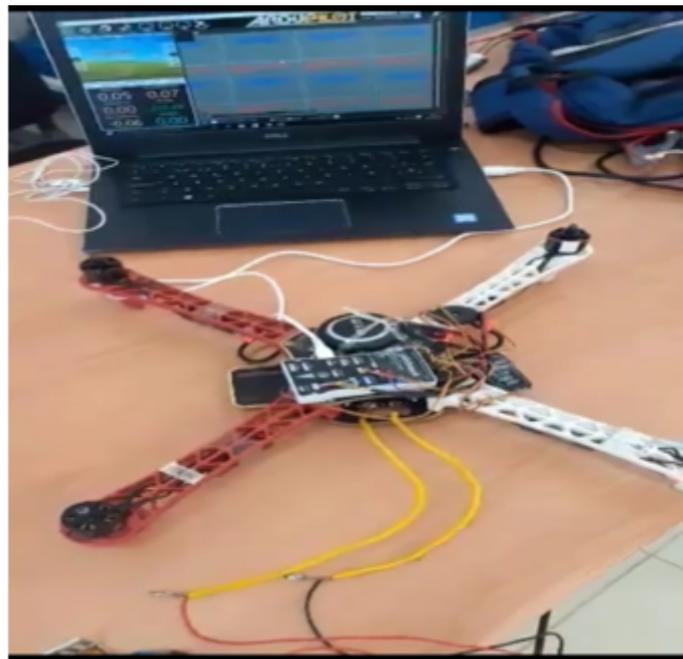


FIGURE 4.7: état finale du drone

#### 4.2.1.3 Configuration et calibrage

- Pour commencer, il nous faut un logiciel gratuit « Mission Planner » qui est une station de contrôle au sol pour Plane, Copter et Rover. Il est compatible avec Windows uniquement.

Mission Planner peut être utilisé comme utilitaire de configuration ou comme supplément de contrôle dynamique pour notre véhicule autonome. Puis le driver de l'autopilote PixKawk.

- Étapes de configuration de la carte PixHawk

Il nous reste ensuite à lancer l'assistant et connectez PixHawk en USB sur notre PC pour commencer son paramétrage. Pour faire un bon calibrage et configuration il faut passer par les étapes suivantes :

#### \* Connexion de la carte pixhawk au PC

Après avoir installé le driver et le logiciel Mission Planner, nous allons lancer Mission Planner et brancher notre carte PixHawk au port USB de notre PC. Ensuite il faut renseigner le numéro du port COM de PixHawk en haut à droite du Mission Planner comme le montre la figure 4.8. La vitesse de transmission est de 115200 par le port USB. Puis un clic sur le logo « connect » pour connecter la carte au PC. Si ça ne se connecte pas, c'est qu'il y a un problème avec le numéro de port COM ou la vitesse de transmission n'est pas bonne.



FIGURE 4.8: Configuration du débit

#### \* Chargement du firmware

Ensuite, nous allons sur le menu « INITIAL SETUP » / installfirmware et un clic sur le type de multicoptère qu'on a pour charger la dernière version du firmware dans notre carte PixHawk. Le logo « CONNECT » doit rester rouge (mode déconnecté). Lorsque toutes les étapes sont réalisées, le drone est alors prêt pour qu'il soit piloté où faire une mission. On peut ensuite le suivre, et récupérer les données en utilisant

les mêmes logiciels de la station au sol comme le montre la figure 4.9. Note : Si le firmware ne se charge pas, il faut débrancher les ESC de la PixHawk.



FIGURE 4.9: Chargement du firmware

Puis la barre de progression va se remplir en vert deux fois, une fois pour le chargement du firmware, et l'autre pour la vérification, puis, il faut cliquer sur « OK » quand la procédure est terminée comme le montre la figure 4.10.



FIGURE 4.10: Chargement terminé

Ensuite, reconnectez la carte PixHawk en haut à droite de Mission Planner (le logo doit repasser en vert). Allez dans INITIAL SETUP/ Mandatory Hardware/ Frame Type pour configurer le type de multicoptère qu'on a (+, x ou H) comme il est illustré sur la figure 4.11.



FIGURE 4.11: Choix du type de quadrotor

#### \* Configuration du compas :

- Allez dans INITIAL SETUP/ Mandatory Hardware/ Compass, puis sélectionnez le type de compas qu'on a « PixHawk with onboard compass » si on a une PixHawk avec compas intégré « PixHawk with external compass » si on a un GPS + compas en dehors de la carte .
- Puis un clic sur le bouton « Live Calibration » et on a 60 secondes pour faire les mouvements qui vont servir à calibrer notre compas. Ensuite on va valider la valeur trouvée par Mission Planner pour la calibration de notre compas avant de passer à l'étape suivante comme le montre la figure 4.12.



FIGURE 4.12: Configuration du compas

#### \* Calibration de l'accéléromètre

il faut aller dans INITIAL SETUP/ Mandatory Hardware/ Accel Calibration, puis un clic sur le bouton « CalibrateAccel ». Suivons les instructions pour calibrer l'accéléromètre de PixHawk. Assurons-nous d'attendre quelques secondes avant et après

le changement de position du véhicule comme il est illustré sur la figure 4.13.

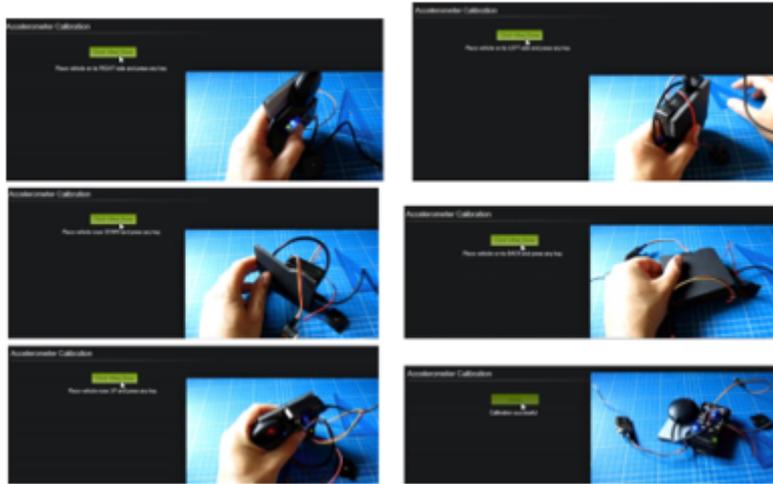


FIGURE 4.13: Calibrage d'accéléromètre

**\* Calibration de la radio sur Mission Planner :**

- Avant de calibrer la radio, il faut attribuer les inters 2 et 3 positions mixés entre eux sur le CH6 de la radio pour des différents modes de vol.
- Allez dans le menu INITIAL SETUP/ Mandatory Hardware/ Radio Calibration.
- Faites un clic sur le bouton « Click whendone » et bougez les manches et les inters dans tous les sens pour calibrer leurs courses dans Mission Planner (figure 4.14).
- Répondre ok au différents message puis cliquez sur le bouton « Saving » et ensuite « Completed » que les voies de la radio sont dans le bon sens.
- Si on monte les gaz, le barregraphe vert dans Mission Planner doit monter.
- Si on pousse le manche du Roll vers la droite, le barregraphe vert du Roll doit aller vers la droite.
- Si on pousse le manche du Yaw vers la droite, le barregraphe vert du Yaw doit aller vers la droite. Vérifiez :
- En revanche, si on monte le manche du pitch, le barregraphe vert du pitch doit descendre.



FIGURE 4.14: Calibration de la radio-commande

#### 4.2.1.4 Les tests effectués sur terrain

Pour la tâche des tests en vol, nous avons installé premièrement un support fixe de notre choix et notre installation, et qui fixe notre drone pour avoir la stabilisation de tous les mouvements désirés par le réglage des gains sur mission planner comme le montre la figure 4.15 a et b.



a



b

FIGURE 4.15: Les premiers tests

Après la stabilisation dans le laboratoire, nous avons effectué plusieurs essais en vol comme le montre la figure 4.16.



FIGURE 4.16: Les tests finaux de drone

## 4.2.2 La réalisation du robot

Le robot c'est la partie terrestre de notre vehicule, il est attaché au frame de drone quadrotor. Nous avons programmer notre robot grace a un arduino avec un shield et aussi la radio commande qui nous permet de contrôler les mouvement possibles qui peuvent effectués.

### 4.2.2.1 Matérielles utilisés

#### a) Arduino MEGA 2560 :



FIGURE 4.17: Les tests finaux de drone

**b) ShieldL298P :**

Le FunduMoto L298P Motor Driver Shield comme le montre la figure 4.18 est un bouclier moteur multi-fonctionnel basé sur la puce du pilote L298P et s'adapte aux Arduino mega ou autres Arduino avec des broches d'E/S compatibles.

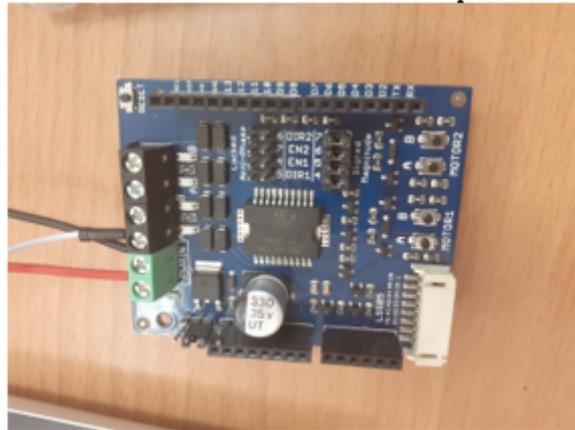


FIGURE 4.18: Les tests finaux de drone

**c) Deux moteurs**

FIGURE 4.19: Moteur pour un roue motrice

d) **Deux roues motrices**

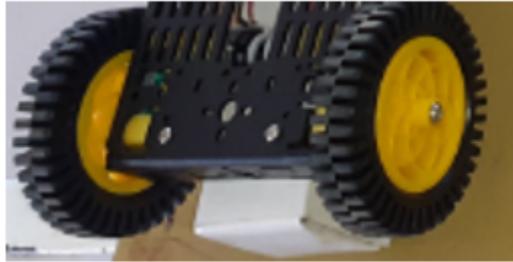


FIGURE 4.20: Les roues motrices

e) **Roue folle**



FIGURE 4.21: Le contrôle du robot avec joystick

#### 4.2.2.2 Le câblage :

Avant de commencer le câblage, nous avons fait une familiarisation sur les cartes informatique de commande utilisées et aussi sur les moteurs.

Dans la première tâche, nous avons crée un programme qui fait commander les deux moteurs avec un joystick illustré sur la figure 4.22 a, b et c.

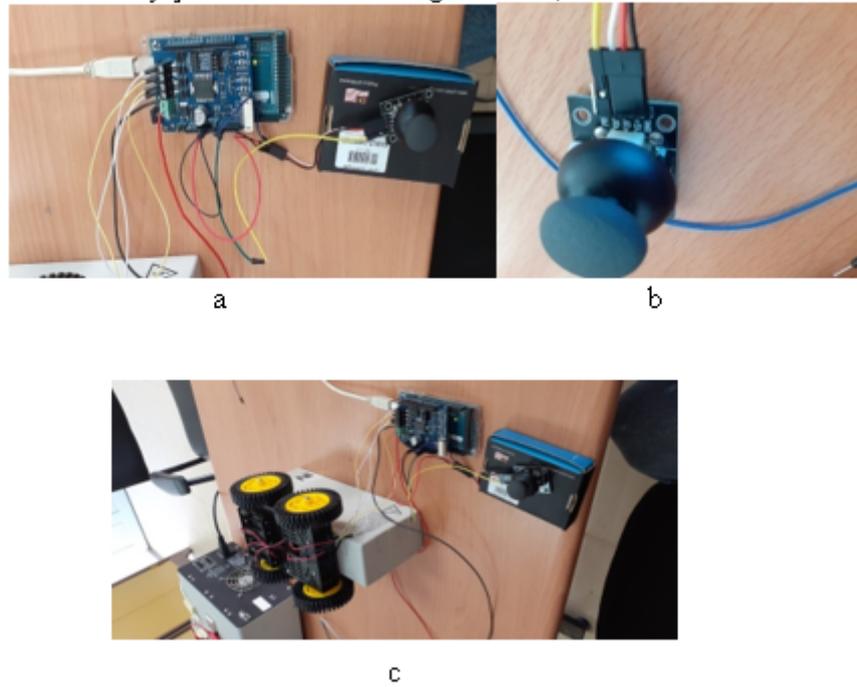


FIGURE 4.22: le contrôle du robot avec joystick

Dans la deuxième étape nous avons remplacé le joystick par la radio commande Futaba T8J et aussi un récepteur Futaba comme le montre la figure 4.23 a,b. On a créé le nouveau programme et nous avons injecté ce dernier à l'arduino, donc nous avons contrôlé le robot à partir d'un nouveau programme.

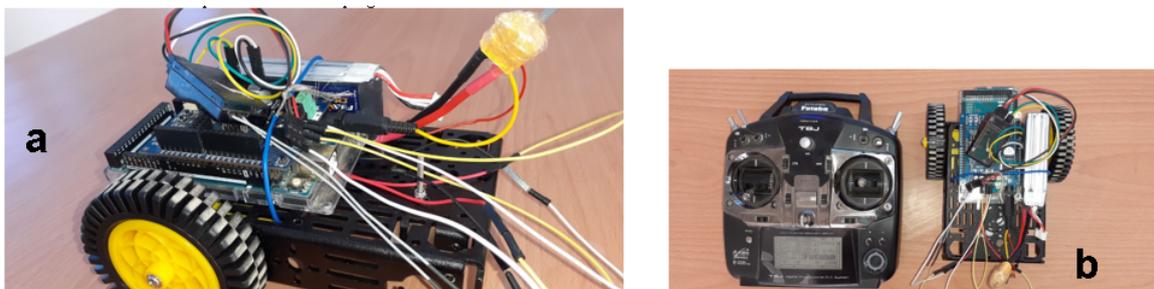


FIGURE 4.23: a,b : Le contrôle du robot avec la radio commande

### 4.2.3 Le dernier montage et testes finaux :

Après avoir testé le robot avec la radio commande et après avoir les résultats désirés comme le montre la figure 4.24, on a rectifié le programme pour switcher les deux modes de navigations. On a programmé la chaîne 5 de la radio commande pour avoir l'hybridation air-sol de notre véhicule.

A partir de cette nouvelle version de programme on a pu faire un nouveau câblage et on a fait une nouveau essaie avant de faire le montage final.



FIGURE 4.24: a,b : Le contrôle du robot avec la radio commande

Nous avons a trouvé de bons résultats donc nous avons commencé à faire le montage final. Pour faire le montage final que nous souhaitons, nous somme obligé de choisir une interface qui relie les deux grandes parties de notre véhicule (quadrirotor +robot). Tout d'abord et après de schématisé notre interface, on a fait sa conception par solidworks et toutes ses mises en plan, finalement elle est réalisée dans l'atelier mécanique local comme le montre la figure 4.25.

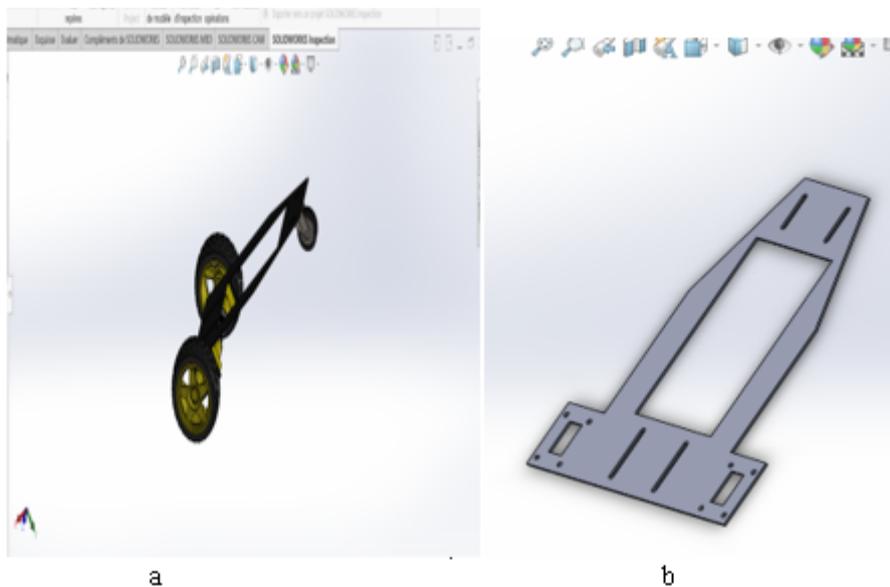


FIGURE 4.25: a,b : La conception de l'interface de combinaison par solidworks

Après la réalisation de l'interface, on a fait le montage final de notre véhicule comme il est montré dans les figures suivantes 4.26 (.a et .b).



a



b

FIGURE 4.26: a,b : La conception de l'interface de combinaison par solidworks

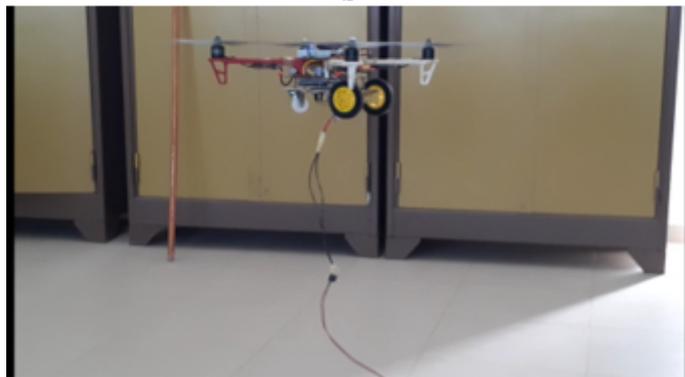
- Le teste final :



a



b



c

FIGURE 4.27: a,b : La conception de l'interface de combinaison par solidworks

## Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à une présentation de chacun des éléments qui entrent dans la conception de notre véhicule aérien. Nous avons aussi donné des détails sur le réassemblage indispensables à faire au préalable afin que l'ensemble puisse communiquer. Enfin, nous avons détaillé les étapes de configuration et de calibrage de notre réalisation avec tous les tests effectués.

# Conclusion general

Dans notre projet de fin d'études ingénieur « contribution à l'étude et la réalisation d'un quadrotor UAV / UGV », nous nous sommes intéressés à l'étude et la réalisation d'un véhicule hybride. Nous avons souhaité que ce travail soit d'abord un complément à notre stage que nous avons fait à l'école militaire polytechnique. Nous avons choisie ce projet multidisciplinaire dans le but de maîtriser et de comprendre les jonctions possibles entre notre spécialité et d'autres spécialités techniques différentes. A cet effet, nous avons élaboré un travail théorique comprenant le modèle mathématique du véhicule air-sol, la synthèse d'une loi de commande stabilisante basée sur l'approche backstepping, après nous avons validé nos résultats théoriques par des simulations numériques sous l'environnement Matlab/Simulink, et nous avons fini notre travail par la réalisation de notre quadrotor hybride en détaillant toutes les étapes de réalisation et tous les tests qui sont effectués. Par ailleurs, ce projet nous a permis d'appliquer et d'approfondir les connaissances théoriques que nous avons étudiées. Les travaux effectués durant ce PFE nous ont permis de familiariser avec les logiciels Matlab, Mission Planner et arduino. Pour finir, le projet de fin d'études que nous avons entrepris à un grand intérêt. Ce dernier est pluridisciplinaire et fait appel à plusieurs domaines de l'ingénierie et les domaines d'application ne cessent pas d'accroître.

Comme perspectives, on vise à :

- Réaliser notre propre contrôleur de vol (software et hardware).
- Proposer un prototype qui optimise le poids et l'énergie.
- Créer et sécuriser notre propre protocole de communication station sol/air-robot.

# Annexe

Le programme qui nous permet de contrôler notre véhicule en mode de navigation terrestre:

ROBOT_switch	ROBOT_switch	ROBOT_switch
<pre>digitalWrite(pin2,HIGH); digitalWrite(pin3,HIGH); digitalWrite(pin4,HIGH); }  void loop() {    ch1=pulseIn(rc1,HIGH);   ch2=pulseIn(rc2,HIGH);   ch5=pulseIn(rc5,HIGH);    if(ch5&gt;1530)   {      if(ch1&gt;1700)     {       digitalWrite(pin1,HIGH);       digitalWrite(pin2,HIGH);       digitalWrite(pin3,LOW);       digitalWrite(pin4,LOW);}      else if (ch1&lt;1400)     {       digitalWrite(pin1,LOW);       digitalWrite(pin2,LOW);       digitalWrite(pin3,HIGH);       digitalWrite(pin4,HIGH);}</pre>	<pre>#define rc1 A0 #define rc2 A1 #define rc5 A2  #define pin1 4 #define pin2 5 #define pin3 6 #define pin4 7  int ch1; int ch2; int ch5;  void setup() {    pinMode(rc1,INPUT);   pinMode(rc2,INPUT);   pinMode(rc5,INPUT);    pinMode(pin1,OUTPUT);   pinMode(pin2,OUTPUT);   pinMode(pin3,OUTPUT);   pinMode(pin4,OUTPUT);    digitalWrite(pin1,HIGH);   digitalWrite(pin2,HIGH);</pre>	<pre>else if ( ch2&gt;1350) {   digitalWrite(pin1,LOW);   digitalWrite(pin2,LOW);   digitalWrite(pin3,LOW);   digitalWrite(pin4,LOW);}  else if (ch2&lt;1300) {   digitalWrite(pin1,HIGH);   digitalWrite(pin2,HIGH);   digitalWrite(pin3,HIGH);   digitalWrite(pin4,HIGH);}  else if(ch5&lt;1514) {   digitalWrite(pin1,LOW);   digitalWrite(pin2,LOW);   digitalWrite(pin3,LOW);   digitalWrite(pin4,LOW);  }  }</pre>

# Bibliographie

- [1] RAHMOUNEHiba ET MENEMMECHE Yousra « Dynamique, Contrôle et Simulation d'un UAV » projet de fin d'études, institut de l'aéronautique et des études aérospatiales,2015
- [2] D. Rachedi Nedjmi, "Commande hybride avec observation d'un UAV de type quadrotor", Thèse de Magistère, École Militaire Polytechnique, Alger,Algérie,2010.
- [3] Van de Rostyne, Alexander Jozef Magdalena, and Chi Pok Billy Wai. "Helicopter propeller." U.S. Patent Application No. 29/283,934.
- [4] European Aeronautic Defence and Space Company, EADS N.V. [www.eads.net/1024/fr/eads/history/airhist/1900-1909/Breguet1-1907](http://www.eads.net/1024/fr/eads/history/airhist/1900-1909/Breguet1-1907).
- [5] Bertrand, Sylvain. Commande de drone miniature à voilure tournante. Diss. 2007.
- [6] Mr. Mokhtari Mohammed Rida "Observation et Commande de Drones Miniatures à voilures tournantes" .Université Aboubekr Belkaid Tlemcen.2015
- [7] Salazar-Cruz, Sergio. Modélisation et conception de commandes robustes pour la stabilisation de véhicules aériens multi-rotor. Diss. Compiègne, 2005.
- [8] Daler, Ludovic, et al. "A bioinspiredmulti-modal flying and walking robot." *Bioinspiration & biomimetics* 10.1 (2015) : 016005.
- [9] Hassanalian, Mostafa, and AbdessattarAbdelkefi. "Classifications, applications, and design challenges of drones : A review." *Progress in Aerospace Sciences* 91 (2017) : 99-131.
- [10] Jeong, Seung Ho, and Seul Jung. "Novel design and position control of an omnidirectional flying automobile (Omni-flymobile)." ICCAS 2010. IEEE, 2010.
- [11] Page, Jared R., and Paul EI Pounds. "The Quadroller : Modeling of a UAV/UGV hybrid-quadrotor." 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014.

- 
- [12] Rodríguez, Rosa M., et al. "Autonomous management of an UAV Airfield." proceedings of the 3rd international conference on application and theory of automation in command and control systems, Naples, Italy. 2013.
- [13] Evsevlev, Sergei, et al. "Stress-induced damage evolution in cast AlSi12CuMgNi alloy with one-and two-ceramic reinforcements. Part II : effect of reinforcement orientation." *Journal of materials science* 55.3 (2020) : 1049-1068.
- [14] ABDELLAOUI, Ghouthi, Hicham MEGNAFI, and Fethi Tarik BENDIMERAD. "A novel model using Reo for IoT self-configuration systems." 020 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP). IEEE, 2020.
- [15] Megnafi, Hicham. "Frequency Plan Optimization Based on Genetic Algorithms for Cellular Networks." *Journal of Communications Software and Systems* 16.3 (2020).
- [16] Bouadi, Hakim, et al. "Adaptive sliding mode control for quadrotor attitude stabilization and altitude tracking." 2011 IEEE 12th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI). IEEE, 2011.
- [17] Khebbache, Hicham. Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires : application système UAV de type quadrirotor. Diss. 2018.
- [18] Cowling, Ian D., et al. "A prototype of an autonomous controller for a quadrotor UAV." 2007 European Control Conference (ECC). IEEE, 2007.
- [19] Khatoon, Shahida, Mohammad Shahid, and Himanshu Chaudhary. "Dynamic modeling and stabilization of quadrotor using PID controller." 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). IEEE, 2014.
- [20] Afonso, P., et al. "Challenges and solutions in an autonomous driving mobile robot competition." Proceedings of the Control Portuguese Conference in Automatic Control, Lisbon. 2006.