

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 de Master

Filière : Automatique  
Spécialité : Automatique

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

Thème

## Modélisation d'un Système UAV de type Quadrotor hybride

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

Mr. ABDI Sidi Mohammed	Maître de Conférences	ESSA. Tlemcen	Président
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
Mme DIDI Ibtisem	Maître de Conférences	ESSA. Tlemcen	Examineur
Mr. ABDELLOUI Ghouti	Maître de Conférences	ESSA. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2019 / 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

---

## Dédicaces

---

*Du fond du cœur je dédie ce travail,  
à mon père qui m'a encouragé,  
à ma mère que Dieu la protège,  
à mes frères et ma sœur,  
à mon binôme et tous mes amis, Ishak, Zakariya, Amar, Yahia B6, Yacine,...  
à tous ce qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.*

***LAMRI Sofiane***

---

## Dédicaces

---

*Du fond du cœur je dédie ce travail,  
à mon père qui m'a encouragé,  
à ma mère que Dieu ait pitié d'elle,  
à mes frères et mes sœurs,  
à mon binôme et tous mes amis, Yahia, Louz, Ishak, Adel...  
à tous ce qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.*

***MOHAMMEDI Achref***

---

## Remerciements

---

*A cette occasion, nous remercions le bon dieu tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce mémoire.*

*Nos sincères remerciements vont à nos deux encadrants Mr. BOUZID Yasser et Mr. MEGNAFI Hicham d'avoir proposé et dirigé ce travail, pour leurs aides, leurs conseils, leurs orientations et leurs intérêts.*

*Nous tenons à remercier également Mr. GUIATNI Mohamed. pour son aide et sa patience avec nous, et tout les gens de l'école militaire polytechnique.*

*Nous tenons également à remercier Mr. ABDI Sidi Mohammed, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Nous exprimons notre sincère gratitude aux examinateurs de notre mémoire : Mr.ABDELLOUI Ghouti. et Mme. DIDI Ibtissem*

*Nous remercions Mr. SAIDI Sifeddine, Mr. ABDEREZZAK Zakariya et Mr. BOUKEFFOUS Houssam Eddine pour ses patiences avec nous.*

*Nous remercions aussi toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, en particulier nos parents.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*Merci à tous et à toutes.*

---

## Résumé

Ce travail porte sur l'étude et la conception d'un véhicule hybride qui puisse rouler ou voler. Nous avons proposé deux prototypes pour un nouveau type de véhicule avec des propriétés améliorées, le premier prototype consiste à étudier et modéliser un drone hybride air-sol qui compose d'un quadrotor et un robot mobile unicycle, le problème de poids est affecté de façon négative sur notre conception donc nous avons proposé un autre prototype qui conserve la même fonctionnement on éliminons plusieurs composantes (réduire le poids). Les modèles de ces deux conceptions ont été développés selon des hypothèses simplificatrices pour chaque mode d'opération : par terre ou dans l'air. Les modèles de premier prototype ont été validés via des simulations numériques. Ils ont été faits pour valider le fait que le véhicule peut suivre des trajectoires terrestres et aériennes grâce à la commande backstepping. Mots clés :

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

---

## Abstract

This work focuses on the study and design of a hybrid vehicle that can run or fly. We have proposed two prototypes for a new type of vehicle with improved properties, the first prototype consists of studying and modeling a hybrid drone air-ground that consists of a quadrotor and a unicycle mobile robot, the weight problem is negatively affected on our design so we proposed another prototype that retains the same operation we eliminate several components (reduce weight). The models of these two designs have been developed according to simplifying assumptions for each mode of operation : on the ground or in the air. The models of the first prototype have been validated through numerical simulations. They were made to validate the fact that the vehicle can follow ground and air trajectories thanks to backstepping control.

**Key words :** Hybrid Drone, Air-to-Ground Drone, Robot, The control, The design

## ملخص

يركز هذا العمل على دراسة وتصميم مركبة هجينة يمكنها القيادة أو الطيران. لقد اقترحنا نموذجين أوليين لنوع جديد من المركبات بخصائص محسنة ، النموذج الأول يتكون من طائرة بدون طيار مدروسة ونمذجة جو-أرضي هجين يتكون من رباعي المحرك وروبوت متحرك أحادي الدراجة ، تتأثر مشكلة الوزن بطريقة ما سلبياً على تصميمنا ، لذلك اقترحنا نموذجاً أولياً آخر يحافظ على نفس العملية ونقوم بإلغاء العديد من المكونات (تقليل الوزن). تم تطوير نموذجي هذين التصميمين وفقاً لافتراضات مبسطة لكل طريقة تشغيل: على الأرض أو في الجو. تم التحقق من صحة نماذج النموذج الأولي من خلال عمليات المحاكاة العددية. لقد تم إجراؤها للتحقق من حقيقة أن السيارة يمكن أن تتبع المسارات البرية والجوية بفضل أمر backstepping.

الكلمات المفتاحية: طائرة بدون طيار هجينة ، طائرة بدون طيار جو-أرض ، روبوت ، الأمر ، التصميم

# Table des matières

Dedicace	3
Remerciment	5
Résumé	I
Abstract	II
ملخص	III
Table des figures	IV
Liste des tableaux	IV
Abriviation	10
Introduction générale	1
<b>1 GENERALITES SUR LES ROBOTS MOBILES</b>	<b>4</b>
Introduction . . . . .	5
1.1 ROBOTIQUE MOBILE . . . . .	5
1.1.1 Définition . . . . .	5
1.1.2 Pourquoi la robotique mobile? . . . . .	6
1.1.3 Classification des robots mobiles . . . . .	7
1.1.3.1 Robots mobiles terrestres . . . . .	7
1.1.3.2 Robot mobiles aériens . . . . .	7
1.1.3.3 Robots mobiles marins . . . . .	8
1.2 UAVs (UNMANNED AERIAL VEHICLE) . . . . .	8
1.2.1 Définition . . . . .	8
1.2.2 Classification des UAVs . . . . .	9

1.2.2.1	Classification selon la taille . . . . .	9
1.2.2.2	Classification selon le mode de propulsion . . . . .	11
1.2.3	Mouvements de drone (quadrotor) . . . . .	16
1.2.4	Applications des drones . . . . .	19
1.2.5	Avantage et inconvénients des drones . . . . .	20
1.3	Les robots mobiles à roues . . . . .	21
1.3.1	différents types des robots mobiles à roues . . . . .	21
1.3.2	Application et usage de la robotique . . . . .	24
1.3.3	Avantage et inconvénients des robots mobiles . . . . .	26
1.4	DRONES HYBRIDES . . . . .	27
1.4.1	Définition . . . . .	27
1.4.2	Les véhicules hybrides terrestres et aériens . . . . .	27
1.4.3	LES AVANTAGES ET LES CARACTERISTIQUES DES DRONES HY- BRIDES . . . . .	30
	Conclusion . . . . .	31
<b>2</b>	<b>MODELISATION ET CONCEPTION</b>	<b>32</b>
	<b>MODELISATION ET CONCEPTION</b>	<b>32</b>
	MODELISATION DU DRONE . . . . .	33
2.1	MODE AERIEN . . . . .	33
2.1.1	Effets physiques agissants sur le quadrotor . . . . .	36
2.1.1.1	Les forces . . . . .	36
2.1.1.2	Les moments . . . . .	37
2.1.1.3	Effet gyroscopique . . . . .	38
2.1.2	Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler . . . . .	39
2.1.3	Equations de mouvement de translation . . . . .	41
2.1.4	Equations de mouvement de rotation . . . . .	41
2.1.5	Représentation d'état du système . . . . .	43
2.2	MODE TERRESTRE . . . . .	44
2.2.1	Premier modèle . . . . .	45
2.2.1.1	Géométrie de robot . . . . .	45
2.2.1.2	Modèle cinématique du robot . . . . .	46

---

2.2.2	Deuxieme modele . . . . .	46
2.2.3	Conception de deuxième prototype . . . . .	49
	Conclusion . . . . .	50
<b>3</b>	<b>COMMANDE ET RESULTATS</b>	<b>52</b>
	Introduction . . . . .	53
3.1	TECHNIQUE DE COMMANDE PAR BACKSTEPPING . . . . .	53
3.1.1	Définition . . . . .	53
3.1.2	Technique de la commande par backstepping . . . . .	57
3.1.2.1	Cas des systèmes d'ordre n . . . . .	60
3.2	COMMANDE PAR BACKSTEPPING DE NOTRE SYSTEME . . . . .	61
3.2.1	Synthèse des lois de commande pour le quadrotor . . . . .	61
3.2.2	Mode de navigation aérienne . . . . .	62
3.2.3	Mode de navigation terrestre . . . . .	65
3.3	SIMULATION NUMERIQUE . . . . .	66
3.3.1	Mode aérien . . . . .	66
3.3.1.1	Vol linéaire . . . . .	67
3.3.2	Mode terrestre . . . . .	70
	Conclusion . . . . .	72

# Table des figures

1.1	Des différents robots . . . . .	6
1.2	Robots dans des différents domaines . . . . .	6
1.3	Classification des robots marins . . . . .	8
1.4	Le Global hawk . . . . .	10
1.5	Le Predator - b ) Le Eagle 1 . . . . .	10
1.6	a ) Le Dragon Eye - b ) Le Hovereye . . . . .	11
1.7	Le PicoFlyer (ProxyFlyer) . . . . .	11
1.8	Le dirigeable . . . . .	12
1.9	La libellule artificielle . . . . .	12
1.10	Avion 3D . . . . .	13
1.11	L'hélicoptère classique . . . . .	14
1.12	a) Le tricoptère - b) Le vectron - c) L'hélicoptère auto stable . . . . .	15
1.13	quadrotor . . . . .	16
1.14	Illustration du mouvement vertical . . . . .	17
1.15	Illustration du mouvement de roulis . . . . .	18
1.16	Illustration du mouvement de tangage . . . . .	18
1.17	Illustration du mouvement de lacet . . . . .	19
1.18	Illustration du mouvement de translation . . . . .	19
1.19	Robot de type unicycle . . . . .	21
1.20	Robot de type tricycle . . . . .	22
1.21	Robot de type voiture . . . . .	22
1.22	Robot de type omnidirectionnel . . . . .	23
1.23	Des robots sur une chaîne de montage dans une usine automobile . . . . .	24
1.24	Le robot Mule de l'armée américaine . . . . .	25
1.25	Robot médicale . . . . .	25
1.26	Robot de nettoyage . . . . .	26

1.27	Prototype de robot d'exploration terrestre aérienne déployable (DALER) a ying	28
1.28	Image de la plate-forme Structure de quadrotor hybride développée par Thorel et al . . . . .	28
1.29	Robot terrestre aérien de forme sphérique développé par Dudley . . . . .	29
1.30	Le yTHAQ, quadrotor hybride terrestre et aérien . . . . .	30
2.1	Géométrie du quadrotor . . . . .	34
2.2	Paramétrisation de l'orientation du drone dans l'espace. . . . .	35
2.3	Identification du sens de rotation des rotors . . . . .	39
2.4	Premier conception . . . . .	45
2.5	Paramètres du robot . . . . .	45
2.6	Deuxieme conception . . . . .	46
2.7	a et b : nouvelle conception par solidworks . . . . .	50
3.1	Interprétation géométrique du théorème de Lyapunov. . . . .	55
3.2	Illustration de la structure de commande du quadrotor . . . . .	62
3.3	Schéma synoptique de la proposition contrôleur . . . . .	62
3.4	Illustration de la structure de commande du quadrotor par bachstepping . . . . .	64
3.5	Poursuite des commandes en vol linéaire . . . . .	68
3.6	Poursuite des positions angulaires en vol linéaire. . . . .	69
3.7	Poursuite de position en vol linéaire . . . . .	69
3.8	la trajectoire effectuée en 3D . . . . .	70
3.9	présentation du robot sur matlab . . . . .	71
3.10	navigation du robot dans un terrain . . . . .	71
3.11	les mouvements principaux du robot . . . . .	72

# Liste des tableaux

- 1.1 Les avantages et les inconvénients des robots mobiles à roues . . . . . 23
- 3.1 Les paramètres du quadrotor . . . . . 67

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>AC</b>	Alternativ Current
<b>ADC</b>	Analog-to-Digital Converter
<b>APM</b>	Automated People Mover
<b>ARM</b>	Advanced Risc Machine
<b>AUV</b>	Autonomous Underwater Vehicule
<b>CAO</b>	Conception Assistée par Ordinateur
<b>ROV</b>	Remotely Operated Undewater
<b>UAVs</b>	Unmanned Areal Vehicles
<b>UGV</b>	Unmanned Ground Vehicle
<b>USV</b>	Unmanned Surface Vehicule
<b>AUV</b>	Autonomous Underwater Vehicule
<b>DALER</b>	Deployable Air Land Exploration Robot
<b>DC</b>	Direct Current
<b>DHL</b>	Dalsey, Hillblom and Lynn
<b>DJI</b>	Da Jiang Innovation
<b>DSM</b>	Diagnostic and Statistical Manual
<b>EDI</b>	espace de développement intégré
<b>EEPROM</b>	Electrically Erasable Proramable Read-Only Memory
<b>ESC</b>	Electrical Speed Controller
<b>ESD</b>	Safety for Electronic Components
<b>FPU</b>	Floating-Point Unit
<b>GPS</b>	Global Positining System
<b>HALE</b>	Haute Altitude Longue Endurance
<b>HW</b>	Hot Wheels
<b>HYTAQ</b>	Hybrid Terrestrial and Aerial Quadrirotor
<b>MALE</b>	Moyenne Altitude Longue Endurance
<b>MEAS</b>	Marine, Earth and Atmospheric Sciences
<b>MMALV</b>	Morphing Micro Air-Land Vehicle
<b>PUMA</b>	Programmable Universal Manipulator Arm
<b>PWM</b>	Pulse-Width Modulation
<b>RAM</b>	Random Access Memory
<b>RC</b>	Radio Systems
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interfaccess
<b>SQL</b>	Structured Query Language
<b>UADS</b>	Unated African Diasporan States
<b>UART</b>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<b>UAS</b>	Unmanned Aerial System

# Introduction générale

Les systèmes avioniques jouent un rôle primordial dans la vie actuelle de l'humanité. Parmi ces systèmes on cite : les avions, les hélicoptères, etc. Les applications de ces systèmes quand ils sont pilotés par un pilote à bord sont multiples, entre autre on trouve : le transport des voyageurs, de la marchandise et des troupes, etc. Cependant, certaines applications exigent que l'engin volant doit être doté d'une certaine autonomie ou d'une autonomie totale. Ce sont les applications qui sont considérées comme pénibles physiquement pour l'équipage, ou ennuyeuses, sales et dangereuses, etc.

Le domaine de l'aviation a connu la naissance d'une nouvelle génération des engins volants afin d'accomplir la réalisation de ce type d'applications. Ces engins volants s'appellent drones.

Le drone désigne tout engin volant sans pilote à bord. Il peut être autonome ou commandé à distance. Selon leurs tailles, il existe plusieurs catégories, parmi lesquelles on trouve les micros drones et les mini drones.

Parmi les configurations qui ont connu un grand essor dans le monde de la recherche, le quadrotor offre beaucoup d'avantages, intérêts et applications. Le quadrotor qui est considéré comme un mini drone à décollage et atterrissage vertical présente plusieurs applications civiles et militaires telles que la surveillance, la reconnaissance, la prise de vue aérienne dans la production des films, etc.

D'un autre côté, on regroupe sous l'appellation robots mobiles l'ensemble des robots à base mobile, par opposition notamment aux robots manipulateurs. L'usage veut néanmoins que l'on désigne le plus souvent par ce terme les robots mobiles à roues. Les autres robots mobiles sont en effet le plus souvent désignés par leur type de locomotion, qu'ils soient marcheurs, sous-marins ou aériens.

A cause de plusieurs limites et plusieurs obstacles qui s'empêchent le déplacement de ces deux engins, nous avons visé un autre véhicule plus avantageux que les deux derniers et qui s'appelle le véhicule hybride air-sole (UAV/UGV). L'objectif de ce travail est de faire une étude sur un véhicule hybride air-sol de notre choix. Nous avons concentré sur la modélisation et la simulation du système étudié grâce à la commande backstepping puis nous avons proposé une autre conception plus avantageuse que la première (plus légère et plus moderne) et nous avons présenté sa modélisation. Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

**Chapitre 1** Ce premier chapitre comporte la partie théorique de notre travail, nous commencerons par le monde de la robotique avec ses différentes catégories et leur différentes applications

dans les domaines importants pour notre vie. Puis nous parlerons sur les drones par ses définitions et ses classifications et aussi nous citerons des différentes applications de ses merveilleux engins. Ensuite, nous viserons la section des véhicules hybrides et leur différents prototypes et terminerons par une conclusion.

**Chapitre 2** Dans ce chapitre nous concentrerons sur la conception de notre véhicule air-sol. Au début nous avons fait une description générale du système puis nous parlerons sur la partie hardware par la présentation de tout le matériel utilisé. Puis, nous présenterons la partie software par la présentation de tous les logiciels utilisés avec quelques caractéristiques de notre véhicule et nous terminerons par une conclusion.

**Chapitre 3** Dans le troisième chapitre, nous exposerons notre modélisation du deux systèmes étudié, nous distinguerons deux modes chaque prototypes pour des hypothèses simplificatrices. Dans cette partie, nous modéliserons notre deux conceptions pour une navigation aérienne puis pour une navigation terrestre et nous terminerons par une conclusion.

**Chapitre 4** Pour le quatrième chapitre, nous présenterons la commande backstepping. Puis nous la choisirons pour commander notre système et nous ferons son développement mathématique. Puis nous montrerons les résultats pour les deux modes de déplacement de premier prototype, nous les interpréterons et nous terminerons par une conclusion.

# Chapitre 1

## GENERALITES SUR LES ROBOTS MOBILES

## Introduction

La robotique mobile est un domaine dans lequel l'expérience pratique est particulièrement illustratrice et importante pour la compréhension des problèmes. Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les robots mobiles on spécifie les drones, les robots mobiles a roues et les drones hybrides

### 1.1 ROBOTIQUE MOBILE

La mobilité autonome des robots est devenue un sujet de recherche développé par tous les pays industrialisés. Qu'il s'agisse de robots mobiles à pattes, à roues ou même sous-marins et aériens, les applications sont vastes et multiples : robots de services, surveillance, construction, nettoyage, manipulation de charges, automobile intelligente, robots d'intervention, robots d'exploration planétaire ou de fonds marins, satellites, robots militaires, etc. Le marché potentiel de la robotique est considérable, même s'il faut pour cela résoudre des problèmes plus importants et plus fondamentaux que prévus initialement dans la quête vers la machine intelligente.

#### 1.1.1 Définition

IL existe diverses définitions du terme robot, mais elle tourne généralement autour de celle-ci : « un robot est une machine équipée des outils de perception, de décision et d'action qui lui permettant d'agir de manière autonome dans son environnement en fonction de la perception qu'il en a » [1]. Ou comme la définition de Brady " une connexion intelligente entre la perception et l'action " [2]. Figure 1.1 présente un ensemble des différents robots.



FIGURE 1.1: Des différents robots

### 1.1.2 Pourquoi la robotique mobile ?

La robotique occupera une place majeure dans notre quotidien. Elle possède de nombreux champs d'applications comme la robotique industrielle ou la robotique de service comme le montre Figure I.2. Qu'il s'agisse de robot civil ou militaire, il existe désormais des robots capables d'étonnantes prouesses dans de nombreux secteurs : robots-compagnons assistant les personnes à domicile ou en charge de la surveillance et des soins, robots assurant la logistique dans les hôpitaux, robots assistant les industriels dans la réalisation de gestes pénibles et répétitifs, ou encore permettant le développement de prothèses ou d'orthèses intelligentes.



FIGURE 1.2: Robots dans des différents domaines

Néanmoins, l'intérêt indéniable de la robotique mobile est d'avoir permettre d'augmenter

considérablement nos connaissances sur la localisation et la navigation de systèmes autonomes. La gamme des problèmes potentiellement soulevés par le plus simple des robots mobiles à roues en fait un sujet d'étude à part entière et forme une excellente base pour l'étude de systèmes mobiles plus complexes.

### **1.1.3 Classification des robots mobiles**

#### **1.1.3.1 Robots mobiles terrestres**

Les robots mobiles terrestres sont des machines qui peuvent naviguer ou qui peuvent faire ces mouvements sur terre. Ils sont par exemple actionnés par des roues, des chenilles ou encore des pattes. Dans notre travail, nous allons concentrer sur le robot terrestre à roue. Ceux-ci sont, en effet, particulièrement adaptés avec notre projet.

#### **1.1.3.2 Robot mobiles aériens**

La robotique aérienne est une branche de la robotique mobile. Elle concerne l'étude, la conception et l'expérimentation de véhicules aériens non-habités (UAV pour "Unmanned Aerial Vehicles"). La robotique aérienne a connu un essor important dans les années 1990 : les motivations militaires ont conduit au développement de drones automatiques (autonomie opérationnelle), principalement utilisés pour des missions de reconnaissance (et plus récemment pour des missions offensives) au cours des conflits d'Irak, d'Afghanistan et de l'ex-Yougoslavie en particulier. Parallèlement aux applications militaires, des aéronefs télé opérés ont aussi été développés pour des applications agricoles (hélicoptères R-MAX de Yamaha, utilisé dans ce but au Japon et aux États-Unis), et de surveillance civile, au cours de manifestations par exemple. D'autres applications telles que la production cinématographique, la cartographie, la surveillance ou reconnaissance de zones qui ont été l'objet d'un sinistre (catastrophes naturelles, catastrophes industrielles ou nucléaires. . .), sont autant d'applications potentielles qui soulèvent un intérêt majeur à la fois de la part des acteurs économiques et politiques, et sur la scène scientifique.

### 1.1.3.3 Robots mobiles marins

Les robots marins (sous l'eau, mais aussi sur l'eau) sont en plein essor. À l'aube du développement des flottilles de véhicules, ils ont acquis désormais une certaine maturité industrielle et scientifique. Leur usage est largement répandu, principalement pour des applications pétrolières off-shore, pour les applications militaires (surveillance, déminage, etc.) et pour les applications scientifiques (océanographie, climatologie, etc.). Plusieurs véhicules existants ( glider, robot voilier, robot bio-inspiré, profileur, etc.) [4], [5].

Les robots marins sont classés en deux principales catégories comme le montre Figure I.3, selon le milieu dans lequel ils évoluent. On distinguera par conséquent les véhicules de surface et les véhicules sous-marins

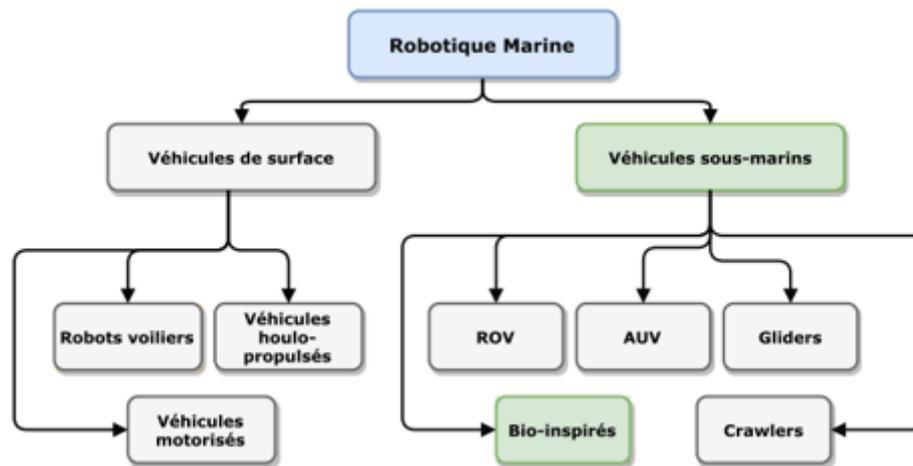


FIGURE 1.3: Classification des robots marins

## 1.2 UAVs (UNMANNED AERIAL VEHICLE)

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 de combat.

### 1.2.1 Définition

Un drone (on l'appelle aussi en anglais UAV : unmanned aerial vehicle ou UAS : Unmanned Aerial System) désigne tout aéronef sans pilote quelque soit sa taille, sa forme, sa fonction ou

ses caractéristiques [6], [7]. Dans la littérature on trouve la définition anglo-saxonne suivante « Drone : an aircraft without a pilot that is operated by remote control », de cette définition on peut remarquer qu'un drone :

- n'est pas complètement autonome, car il peut être contrôlé d'une station terrestre ou aérienne à partir d'un autre aéronef, dans le cas idéal il peut être complètement autonome.
- peut bien transporter des passagers. On parle de plus en plus souvent de « systèmes de drones ». En effet, le drone lui-même est le constituant d'un système qui est composé :
  - d'un ou plusieurs vecteurs aériens équipés de capteurs de détection.
  - d'une ou plusieurs stations au sol de commande et de recueil des détections.
  - de liaisons radioélectriques de données entre le vecteur aérien et la partie au sol. Le terme drone désigne la plupart du temps le seul vecteur aérien équipé

Il faudra en effet attendre les années 2010 pour voir apparaître les premiers vrais drones de loisirs, largement poussés par l'arrivée des actions Cam, ces caméras sportives capables de capturer les exploits les plus extrêmes. Combinées au châssis du drone, les pilotes ont dorénavant la possibilité de photographier et de filmer depuis les airs [8].

## 1.2.2 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.

### 1.2.2.1 Classification selon la taille

Dans cette échelle on peut distinguer quatre types : MALF, HALF, les minis drones et les micros drones [9], [10].

- **HALE (Haute Altitude Longue Endurance)**

Ce sont les drones de grande taille, le plus souvent à 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 Grumman) illustré sur Figure 1.4 de la taille d'un avion de ligne et volant à des altitudes pouvant atteindre 20 km pour un rayon d'action de plusieurs milliers de kilomètres.



FIGURE 1.4: Le Global hawk

- **MALE (Moyenne Altitude Langue Endurance)**

Ils sont utilisés pour des vols de longues durées à moyenne altitude opérationnelle, ayant une grande autonomie. Tels que le Eagle 1 (EADS) illustré sur Figure 1.5 b) ou le Predator (General Atomics) comme le montre Figure 1.5 a), 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.



FIGURE 1.5: Le Predator - b ) Le Eagle 1

- **Mini-drones**

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 1.6 b) ou le Dragon Eye (AeroVironment) illustré sur Figure 1.6 a) dont la dimension maximale

n'excède pas le mètre.



FIGURE 1.6: a ) Le Dragon Eye - b ) Le 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 1.11 dont la dimension maximale n'excède pas 15 cm.



FIGURE 1.7: Le PicoFlyer (ProxyFlyer)

### 1.2.2.2 Classification selon le mode de propulsion

Ce critère donne une autre possibilité de classification des drones, donc elle nous donne en générale trois structures [11],[12].

- **Drones à 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 1.8. Mais les dirigeables ont l'avantage d'être stables et d'avoir des vibrations mécaniques moindres [12].



FIGURE 1.8: Le dirigeable

- **Drones à 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 Figure 1.9.

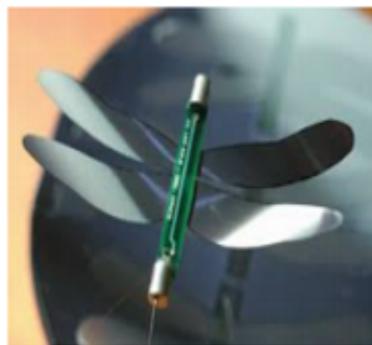


FIGURE 1.9: La libellule artificielle

- **Drones à voilures tournantes**

Les engins à voilure 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 divise de plusieurs configurations :

\* **Configuration ayant un seul rotor**

Dans cette configuration nous trouvons essentiellement les avions appelés 3D comme il est illustré sur Figure 1.10. 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 [12].



FIGURE 1.10: Avion 3D

\* **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 [11], [12]. Parmi ceux qui utilisent des plateaux cycliques nous avons l'hélicoptère classique avec un rotor principal et un rotor illustré sur Figure 1.11. 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 1.11: L'hélicoptère classique

\* **Configuration Ayant trois rotors**

Dans cette catégorie nous trouvons le tricopter illustré sur Figure 1.12 a), le vectron illustré sur Figure 1.12b) et aussi l'hélicoptère auto stable illustré sur Figure 1.12 (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 [11], [12]. 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 1.12: a) Le tricopteur - b) Le vectron - c) L'hélicoptère auto stable

#### \* Configuration Ayant quatre rotors

Le quadrotor est un aéronef soulevé et propulsé par quatre rotors comme le montre la Figure 1.13. 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 [10], [12].



FIGURE 1.13: quadrotor

### 1.2.3 Mouvements de drone (quadrotor)

Les mouvements de base de quadrotor sont réalisés en variant la vitesse de chaque rotor changeant de ce fait la poussée produite. Le quadrotor incline vers la direction du rotor plus lent, qui tient compte alors de la translation le long de cet axe. Par conséquent, comme à un hélicoptère classique, les mouvements sont couplés, signifiant que le quadrotor ne peut pas réaliser la translation sans roulement ou tangage, ce qui signifie qu'un changement de la vitesse d'un rotor se traduit dans un mouvement en au moins trois degrés de liberté. Par exemple, augmentant la vitesse de propulseur gauche aura comme conséquence un mouvement de roulis (le quadrotor incline vers le rotor plus lent, vers la droite), un mouvement de lacet (l'équilibre entre les rotors qui tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et les rotors qui tourne dans le sens inverse est perturbé ayant pour résultat un mouvement de rotation horizontal), et une translation (le mouvement de roulis incline l'armature et avec lui, l'orientation de la force de poussée). Cet accouplement est la raison pour laquelle nous pouvons commander les six degrés de liberté de quadrotor avec seulement quatre commandes (le couple appliqué par les moteurs sur chaque propulseur [13], [14], [15]). Le quadrotor a cinq mouvements principaux :

- Mouvement vertical
- Mouvement de roulis
- Mouvement de tangage
- Mouvement de lacet
- Translations horizontales

- **Mouvement vertical**

Afin de planer, toute la force de portance devrait seulement être le long de l'axe  $z$  avec une grandeur exactement opposée à la force de pesanteur. D'ailleurs, la force de portance créée par chaque rotor doit être égale pour empêcher le véhicule de renverser plus. Par conséquent, la poussée produite par chaque rotor doit être identique. Le mouvement ascendant et descendant est obtenu par la variation de la vitesse de rotation des moteurs (par conséquent la poussée produite), si la force de portance est supérieure au poids du quadrotor le mouvement est ascendant, et si la force de portance est inférieure au poids du quadrotor le mouvement est descendant comme le montre Figure I.14.

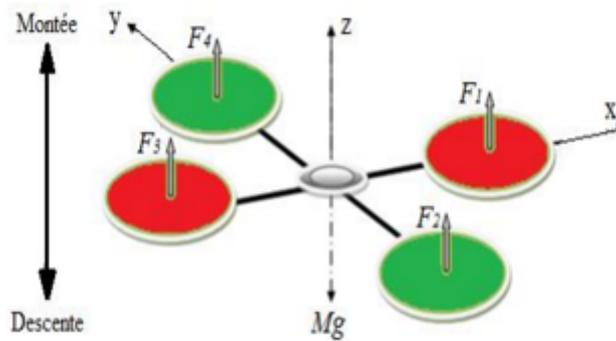


FIGURE 1.14: Illustration du mouvement vertical

- **Mouvement de roulis**

Figure I.15 montre comment un mouvement de roulis est obtenu. Dans ce cas, on applique un couple autour de l'axe  $X$ , c'est-à-dire en appliquant une différence de poussée entre les rotors 2 et 3 ou les rotors 1 et 4. Ce mouvement (rotation autour de l'axe  $Y$ ) est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe  $Y$ .

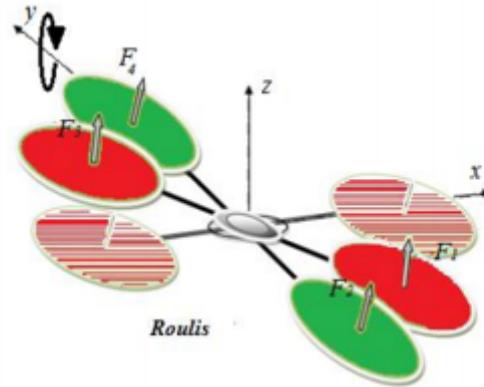


FIGURE 1.15: Illustration du mouvement de roulis

- **Mouvement de tangage**

Figure I.16 montre comment un mouvement de tangage est obtenu. Dans ce cas, on applique un couple autour de l'axe Y, c'est-à-dire en appliquant une différence de poussée entre les rotors 1et 2 ou les rotors 3et 4. Ce mouvement (rotation autour de Y) est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe X

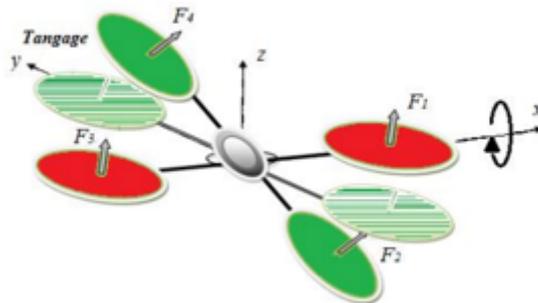


FIGURE 1.16: Illustration du mouvement de tangage

- **Mouvement de lacet**

Figure I.17 montre comment le mouvement de lacet est obtenu. Dans ce cas, nous voulons appliquer un couple autour de l'axe z, qui est fait en appliquant une différence de vitesse entre les rotors 1,3 et 2,4. Ce mouvement n'est pas un résultat direct de la poussée produit par les propulseurs mais par les couples réactifs produits par la rotation des rotors. La direction de la force de poussée ne décale pas pendant le mouvement, mais l'augmentation de la force de portance dans une paire de rotors doit être égale à la diminution des autres paires pour s'assurer que toute la force de poussée demeure la même.

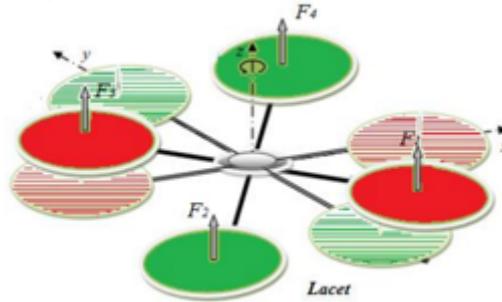


FIGURE 1.17: Illustration du mouvement de lacet

- **Mouvements de translation**

Figure I.18 montre comment la translation horizontale est réalisée. Dans ce cas, nous voulons appliquer une force le long de X ou de Y qui est fait en inclinant le corps (par le tangage ou le roulement) et en augmentant toute la poussée produite pour garder l'importance du composant de Z de la poussée égale à la force de pesanteur.

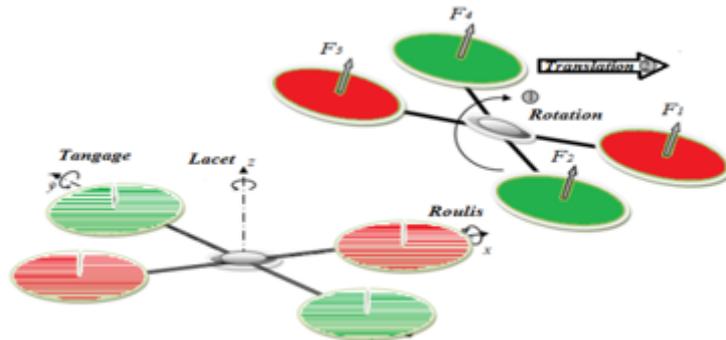


FIGURE 1.18: Illustration du mouvement de translation

### 1.2.4 Applications des drones

Les applications de drones couvrent un large éventail d'applications civiles et militaires. Les drones peuvent effectuer des missions à l'intérieur et à l'extérieur dans des environnements très difficiles. Les drones peuvent être équipés de divers capteurs et caméras pour faire du renseignement, de la surveillance et missions de reconnaissance. Les applications des drones peuvent être catégorisées de différentes façons. Il peut être basé sur le type de missions (militaires / civiles), le type de zones de vol (extérieur / intérieur), et le type des environnements (sous-marins / sur l'eau / sol / air / espace) [15], [16]. 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 [17] [18].

### 1.2.5 Avantage et inconvénients des drones

- **Les avantages du drone :**

Il existe plusieurs raisons qui conditionnent l'achat et l'utilisation d'un drone :

- \* L'absence d'équipage à bord permet des missions de plus longue Durée.
- \* La réduction des coûts financiers de conception, d'entretien.
- \* Limiter et éviter des risques humains dans les environnements dangereux.
- \* peuvent exécuter des missions de grande flexibilité.
- \* La capacité de charge utile relativement haute et variée
- \* La mobilité stratégique car ils sont en générale aérotransportable et trouveront une place sur des plates-formes d'envol marine réduite comme des patrouilleurs de haute mer.
- \* Mise en œuvre rapide par une unité proche d'une zone d'opération ou au contact et dont les données sont exploitée sur place.
- \* Souplesse d'opération (envoi, récupération, réutilisation).
- \* Gain de temps par une mise en œuvre rapide .
- \* Accès à des endroits difficiles voire impossibles pour l'homme.
- \* Evolue dans des zones difficiles d'accès.
- \* Inspection de zones dangereuses ou polluées.
- \* Mise en action rapide.
- \* Le plus économique des moyens aériens.
- \* Vol stationnaire.
- \* Vision 360°

- **Les inconvénients du drone :**

- \* En tant qu'engins non habités et présentant des risques de défaillances techniques irrécupérables, ils nécessitent des certifications rigoureuses pour être autorisé à voler.

- \* Il y a très peu d'éléments disponibles en matière d'étude de fiabilité, de concept de maintenance sur les drones en général et de couts d'acquisition et de soutien en particulier.
- \* La photographie aérienne peut être sujette à des réclamations pour atteinte à la vie privée et liberté personnelle.
- \* Problème de tenue mécanique suites aux dommages subies pendant les atterrissages forcés.
- \* Règlementation contraignante.
- \* Pilotage sensible

## 1.3 Les robots mobiles à roues

### 1.3.1 différentes types des robots mobiles à roues

Il existe plusieurs classes de robots à roues déterminées, principalement, par la position et le nombre de roues utilisées, donc nous allons citer les quatre classes principales de robot à roues.

- **Robot unicycle**

Un robot de type unicycle représenté sur Figure I.19 est actionné par deux roues indépendantes, il possède éventuellement des roues folles pour assurer sa stabilité. Son centre de rotation est situé sur l'axe reliant les deux roues motrices.

C'est un robot non-holonyme, en effet il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues de locomotion.

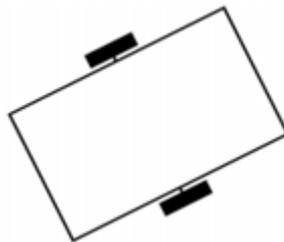


FIGURE 1.19: Robot de type unicycle

- **Robot tricycle**

Un robot de type tricycle représenté sur Figure I.20 est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et d'une roue centrée orientable placée sur l'axe longitudinal.

Le mouvement du robot est donné par la vitesse des deux roues fixes et par l'orientation de la roue orientable. Son centre de rotation est situé à l'intersection de l'axe contenant les roues fixes et de l'axe de la roue orientable.

C'est un robot non-holonyme. En effet, il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues fixes. Sa commande est plus compliquée. Il est en général impossible d'effectuer des rotations simples à cause d'un rayon de braquage limité de la roue orientable.

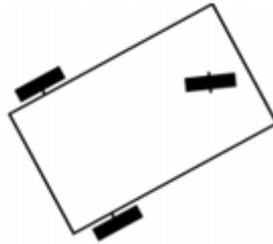


FIGURE 1.20: Robot de type tricycle

- **Robot voiture** Un robot de type voiture représenté sur Figure 1.21 est semblable au tricycle, il est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et de deux roues centrées orientables placées elles aussi sur un même axe. Le robot de type voiture est cependant plus stable puisqu'il possède un point d'appui supplémentaire. Toutes les autres propriétés du robot voiture sont identiques au robot tricycle, le deuxième pouvant être ramené au premier en remplaçant les deux roues avant par une seule placée au centre de l'axe, et ceci de manière à laisser le centre de rotation inchangé.

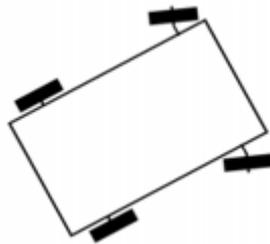


FIGURE 1.21: Robot de type voiture

- **Robot omnidirectionnel** Un robot de type unicycle représenté sur Figure I.19 est actionné par deux roues indépendantes, il possède éventuellement des roues folles pour assurer sa stabilité. Son centre de rotation est situé sur l'axe reliant les deux roues motrices.

C'est un robot non-holonome, en effet il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues de locomotion.

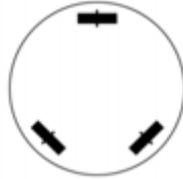


FIGURE 1.22: Robot de type omnidirectionnel

Nous pouvons observer dans Tableau 1.1 ci-dessous un récapitulatif des avantages et des inconvénients des différents types de robots 'à roues.

Robot unicycle	-non-holonôme +stable +rotation sur soi-même +complexité
Robot tricycle	-non-holonôme -peu stable - pas de rotation sur soi-même +complexité mécanique modérée
Robot voiture	-non-holonôme +stable -pas de rotation sur soi-même +complexité mécanique modérée
robot omnidirectionnel	+holonôme +stable +rotation sur soi-même -complexité mécanique importante

TABLE 1.1: Les avantages et les inconvénients des robots mobiles à roues

### 1.3.2 Application et usage de la robotique

La robotique est un domaine à plein essor depuis des années. Les évolutions technologiques dépassant sans cesse nos espérances, permettent maintenant de réaliser des solutions technologiques s'adaptant au moindre problème. Par conséquent, la robotique est utilisée dans les domaines extrêmement rigoureux et exigeants.

- **L'industrie**

Les premiers robots étaient des robots industriels qui remplaçaient les travailleurs humains effectuant des tâches simples et répétitives. Les chaînes de montage des usines peuvent fonctionner sans la présence d'êtres humains, dans un environnement bien défini où le robot doit exécuter des tâches dans un ordre précis, en agissant sur des objets placés précisément devant lui. On pourrait dire qu'il s'agit en fait d'automates et non de robots. Cependant, les automates d'aujourd'hui s'appuient souvent sur des capteurs dans la mesure où ils peuvent être considérés comme des robots. Cependant, leur conception est simplifiée car ils travaillent dans un environnement personnalisé auquel les humains ne sont pas autorisés à accéder pendant que le robot travaille[29][30][31].



FIGURE 1.23: Des robots sur une chaîne de montage dans une usine automobile

- **Le domaine militaire**

Les robots sont plus en plus utilisés dans le domaine militaire. En effet, la miniaturisation permet aujourd'hui de créer des robots discrets mais dotés de nombreux capteurs, ce qui est idéal pour des missions d'espionnage ou d'éclairage. Il existe plusieurs types de robots militaires comme : robot éclaireur tout terrain, drone à courte portée pour le fantassin, drone tactique, le robot Mule de l'armée américaine...etc ;[30][31].

- **La santé**

Les robots commencent à être de plus en plus utilisés dans le domaine médical, qu'il s'agisse



FIGURE 1.24: Le robot Mule de l'armée américaine

de simple échographies ou d'opérations chirurgicales plus délicates. En fait ces robots ne sont pas complètement autonomes mais ils assistent les médecins ou chirurgiens, jusqu'à permettre des opérations médicales à distance (télémédecine). On parle de chirurgie (mot né de l'anglais «surgery», chirurgie) c'est-à-dire tout ce qui consiste à introduire les derniers outils des technologies informatiques et robotiques dans la pratique médico-chirurgicale. Cette pratique de « chirurgie assistée » est émergente donc de devenir la chirurgie du futur[30][31].



FIGURE 1.25: Robot médicale

- **Utilisation civil**

De plus en plus de tâches sont confiées aux robots. Ils servent à remplacer les personnes qui sont chargées de tâches civiles (Nettoyer la ville, aider la population, s'occuper des lieux publics.....)

- **L'usage domestique**

La démocratisation de la robotique a conduit, ces dernières années, à voir de nombreux robots s'installer chez les particuliers pour effectuer des tâches à la place de leur possesseur. En effet, ceux-ci sont capables de faire le ménage, tondre la pelouse, nettoyer la piscine....Ce qui conduit certains clients (aisés) à se procurer ces domestiques contemporains. Pour ce domaine on trouve : les robots aspirateurs, robot tondeuse, robotodog.....etc[30][31].



FIGURE 1.26: Robot de nettoyage

Aujourd'hui, les derniers développement technologique qui fait par les chercheurs donne une autre structure et une autre solution pour éviter les problèmes et les obstacles qui empêchent la navigation pour tout les espaces . donc on parlons sur les véhicules hybrides pour la navigation terrestre et aérien .

### 1.3.3 Avantage et inconvénients des robots mobiles

- **Les avantages**

- \* Robotique et automatisation peut dans de nombreuses situations d'accroître la productivité, la sécurité, l'efficacité, la qualité et la cohérence des produits.
- \* Les robots peuvent travailler dans un environnement dangereux, sans le besoin de soutien de la vie, ou les préoccupations concernant la sécurité
- \* Ils n'ont pas besoin de l'éclairage, la climatisation, de ventilation et de protection contre le bruit.
- \* Robots travailler continuellement, sans ressentir une fatigue ou l'ennui, et ne nécessitent pas une assurance médicale ou de vacances.
- \* Les robots sont de précision répétable à tous les moments, sauf si quelque chose arrive à eux ou ils s'usent.
- \* Les robots peuvent être beaucoup plus précis que les humains. Précision linéaire d'un robot typiquement est de 20 à 10 microns.

- **Les inconvénients**

L'inconvénient des robots est qu'ils manquent de capacité de réagir en cas d'urgence, à moins que les situations comprises et les réponses sont inclut dans le système. Les mesures de sécurité nécessaires pour s'assurer qu'ils ne lèsent pas les opérateurs et n'en-

dommagent les machines qui travaillent avec eux. Ils peuvent causer des dommages à des autres appareils, et la blessure de l'homme. Bien que les robots ont de bonnes certaines caractéristiques mais aussi ont ces caractéristiques limités comme la capacité à degré de liberté, la dextérité, capteurs, système de vision et la réponse en temps réel. Les robots sont coûteux en raison du : coût initial de l'équipement, le coût d'installation, le besoin de périphériques, le besoin de formation et la nécessité de la programmation.

## 1.4 DRONES HYBRIDES

### 1.4.1 Définition

Les drones hybrides sont des drones avec des capacités différentes qui peuvent être appliquées dans divers environnements. Différents drones ont été inventés ayant la capacité de marcher et se déplacer sur le sol et l'eau ou nager et plonger sous l'eau.

### 1.4.2 Les véhicules hybrides terrestres et aériens

Il n'y a pas beaucoup de véhicules à structure hybride dans la littérature. La plupart des eux, n'exploitent qu'une seule capacité de locomotive, à savoir rouler, marcher, ying, planer, grimper, nager, ramper ou sauter. Avec l'évolution de la technologie, les besoins deviennent chaque jour plus complexe et avec des exigences plus spécifiques. Les véhicules doivent être plus flexibles et adaptable à des situations et des environnements différents. Les tâches pourraient couvrir un large spectre comme les activités de sauvetage, la surveillance, la cartographie, l'exploration dans les zones à risque, l'inspection dans les environnements tels que les forêts, les bâtiments semi effondrés, les cavernes profondes, entre autres. Ceux-ci présentent des exigences commencent à motiver l'étude, la conception et le développement de nouveaux types de véhicules qui pourrait accomplir une plus grande dimension de spécifications [20], [21], [22].

**DALER (Deployable Air Land Exploration Robot)** Ce véhicule représenté sur Figure 1.27 est inspiré de la nature. Par exemple, une salamandre peut adopter une forme de roue et rouler pour échapper à ses prédateurs. De cette manière, ce véhicule se comportant comme un VTOL (décollage et atterrissage vertical) peut utiliser ses ailes pour marcher sur de courtes distances. La réutilisation de la même structure permet de minimiser la masse du robot et de

réduire l'inconvénient des performances qui viennent avec les parties. Les obstacles rencontrés par les véhicules terrestres sont facilement surmontables et ne représentent pas n'est plus un problème.

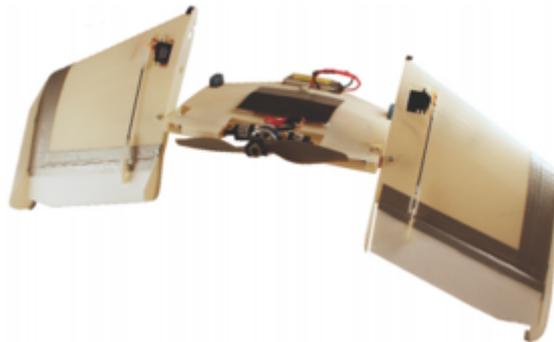


FIGURE 1.27: Prototype de robot d'exploration terrestre aérienne déployable (DALER) à ying

Une autre plate-forme développée par Thorel et al comme le montre Figure 1.28 se déplace sur le sol en utilisant les quatre petits supports. Ce véhicule est un quadriporteur adapté à l'exploration en intérieur en raison de sa maniabilité et de sa possibilité de vol stationnaire. Ce prototype améliore le temps de fonctionnement du quadrotor car en mode terrestre, il consomme nettement moins d'énergie qu'en mode aérien. Par conséquent, le véhicule est conçu pour se déplacer sur terre et pour y uniquement en cas de nécessité, par exemple, pour éviter les obstacles tels que les escaliers, les marches ou les bureaux. Les auteurs se sont concentrés sur l'élaboration d'un algorithme de contrôle de position.



FIGURE 1.28: Image de la plate-forme Structure de quadrotor hybride développée par Thorel et al

Les auteurs ont conçu [24] un véhicule hybride basé sur un quadriporteur à l'intérieur d'un exosquelette sphérique comme le montre Figure 1.29. Ils font une analyse du point de contact

de cette cage pour générer l'algorithme de contrôle du déplacement du sol. Il s'agit d'un petit véhicule d'environ 35 grammes. avec une charge utile de 10 grammes. La portabilité de ce véhicule pourrait être utile pour l'inspection des pipelines, les tâches de cartographie et de surveillance. Les tests montrent que leur véhicule est 260 % plus ancien lorsqu'il roule pour couvrir la même distance qu'en mode aérien. La réduction des performances en mode lumière réduit de 39 % avec l'exosquelette par rapport à son absence. Ce véhicule est principalement conçu pour augmenter l'efficacité énergétique [20], [21], [22].

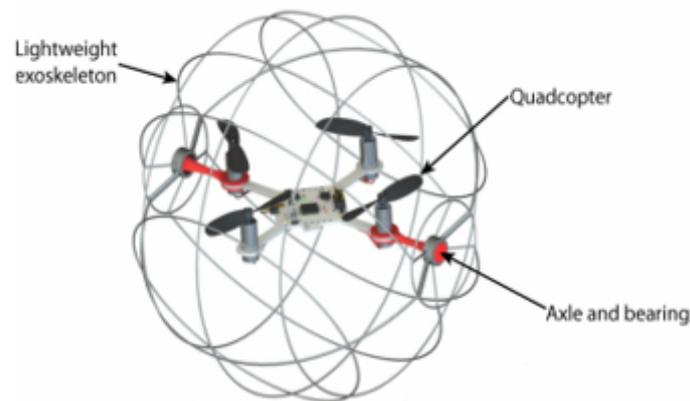


FIGURE 1.29: Robot terrestre aérien de forme sphérique développé par Dudley

Un autre prototype intéressant a été développé par Kalantari et al dans [23], ce véhicule est un quadrotor à l'intérieur d'une cage. La cage permet au quadrotor de rouler sur le sol sans des actionneurs. Le véhicule n'a qu'à surmonter la résistance au roulement en mode terrestre. Leur résultats démontrent que l'HYTAQ (HybridTerrestrial and Aerial quadrotor) peut fonctionner six plus longtemps et parcourir une distance quatre fois plus grande que le système aérien seul. En mode de vol, le véhicule illustré sur Figure 1.30 se comporte comme un quadriporteur classique. Les auteurs ont élaboré une loi de contrôle pour le mode terrestre et se concentrer sur l'augmentation du temps de fonctionnement et l'évitement des obstacles par le ying [20], [21], [22].

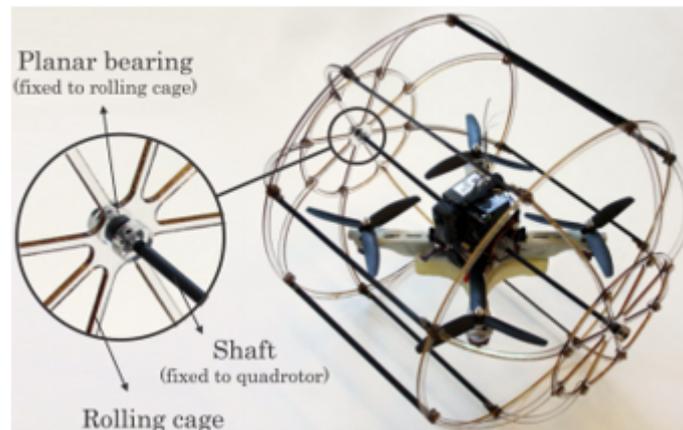


FIGURE 1.30: Le yTHAQ, quadrotor hybride terrestre et aérien

### 1.4.3 LES AVANTAGES ET LES CARACTERISTIQUES DES DRONES HYBRIDES

Le concept de drone hybride se présente sous la forme d'un quadrotor miniature muni de deux roues motorisées. Lors des simulations, l'engin a pu voler sur 90 mètres et rouler sur 252 mètres avant de vider sa batterie. Pour valider le système, Il peut déplacer dans la circulation, des bâtiments, des aires d'atterrissage et de stationnement ainsi que des zones interdites au survol.

drones hybrides pourraient avoir de multiples usages, que ce soit pour évoluer sur des terrains complexes nécessitant d'alterner vol et circulation routière pour des missions de secours, transporter des charges utiles sur de longues distances ou encore des passagers.

il reste encore de nombreux obstacles à surmonter pour pouvoir passer du stade de ces engins miniatures à celui d'appareils susceptibles de transporter des humains ou des marchandises. Mais il s'agit d'une alternative vraisemblablement plus flexible à la voiture volante laquelle impose de nombreuses conditions (permis de pilote, décollages-atterrissages depuis des pistes autorisées) et coûte très cher.

## Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous avons présenté le monde de la robotique mobile globalement. Après, nous avons montré en détaille la catégorie des UAVs et les robots mobiles terrestres. Ces deux véhicules ont plusieurs limites qui peuvent empêcher ses déplacements, Donc nous avons parlé sur un autre type des véhicules qui s'appelle les drones hybrides. Dans le prochaine chapitre, nous allons présenter notre conception sur le véhicule hybride pour le hardware et le software.

## Chapitre 2

# MODELISATION ET CONCEPTION

## 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 des deux prototypes proposés (pour la première et la deuxième conceptions) . Pour le mode de déplacement aérien, le modèle dynamique de notre système reste le même pour les deux prototypes. Dans le cas de déplacement terrestre, nous allons voir deux différentes modélisations car le principe de fonctionnement change entre la premier et la deuxième conception.

### 2.1 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 :

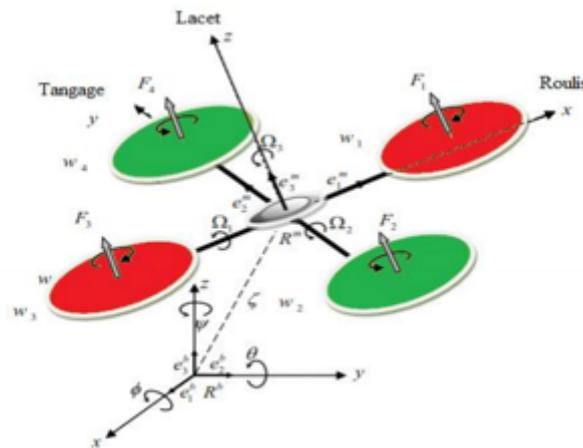


FIGURE 2.1: Géométrie du quadrotor

$$T = \begin{bmatrix} R & \xi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

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[24][14] :

$$R = Rot_z(\psi) * Rot_y(\theta) * Rot_x(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \sin\psi\cos\phi & \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\psi\sin\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\psi\cos\theta & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\sin\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Figure 2.6 représente la Paramétrisation de l'orientation du drone dans l'espace.

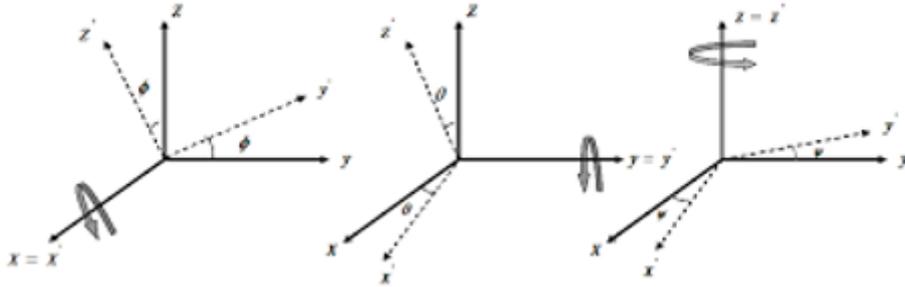


FIGURE 2.2: Paramétrisation de l'orientation du drone dans l'espace.

## 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 :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + Rot_x(\phi)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + (Rot_y(\theta)Rot_x(\phi))^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \cos\phi \\ -\dot{\theta} \sin\phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\psi} \sin\theta \\ \dot{\psi} \sin\phi \cos\theta \\ \dot{\psi} \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} \sin\theta \\ \dot{\theta} \cos\phi + \dot{\psi} \sin\phi \cos\theta \\ \dot{\psi} \cos\phi \cos\theta - \dot{\theta} \sin\phi \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

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 :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T \quad (2.7)$$

## 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 :

$$V = \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} v_x^m \\ v_y^m \\ v_z^m \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

### 2.1.1 Effets physiques agissants sur le quadrotor

#### 2.1.1.1 Les forces

Les différentes forces agissant sur ce système sont [25], [26] :

- **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 carrée de la vitesse de rotation des moteurs :

$$F_i = b\omega_i^2 \quad (2.9)$$

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 :

$$T_h = d\omega^2 \quad (2.10)$$

Avec  $d$  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

$$F_i = K_{ft}v \quad (2.11)$$

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

**2.1.1.2 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 crié par la différence entre les forces de portance des rotors 2 et 4, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_x = l(F_4 - F_2) = lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (2.12)$$

Avec 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 crié par la différence entre les forces de portance des rotors 1 et 3, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_y = l(F_4 - F_2) = lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (2.13)$$

• **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 :

$$M_z = d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (2.14)$$

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

$$M_a = K_{fa}\Omega^2 \quad (2.15)$$

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

**2.1.1.3 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 :

$$M_{gh} = \sum_1^4 \Omega \wedge J_r [00(-1)^{j+1}\omega_j]^T \quad (2.16)$$

Avec,  $J_r$  est l'inertie des rotors

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

suivante :

$$M_{gm} = \Omega \wedge j\Omega \quad (2.17)$$

### 2.1.2 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 :

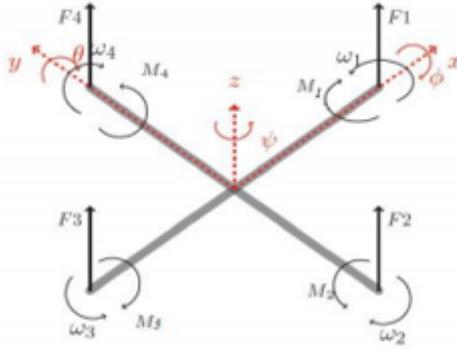


FIGURE 2.3: Identification du sens de rotation des rotors

$$o = g(h) = \begin{cases} \dot{\xi} = v \\ m \ddot{\xi} \\ \dot{R} = RS(\Omega) \\ J \dot{\Omega} = -\Omega \wedge J\Omega + M_f - M_a - M_{gh} \end{cases} \quad (2.18)$$

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 :

$$J = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

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

$$S(\Omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

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

$$F_f = R \left[ 0 \quad 0 \quad \sum_{i=1}^4 F_i \right]^T \quad (2.21)$$

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

$$F_t = \begin{bmatrix} -K_{ftx} & 0 & 0 \\ 0 & -K_{fity} & 0 \\ 0 & 0 & -K_{ftz} \end{bmatrix} \dot{\xi} \quad (2.22)$$

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

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

$$F_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

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

$$M_f = \begin{bmatrix} l(F_4 - F_2) \\ l(F_3 - F_1) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

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

$$M_a = \begin{bmatrix} K_{fax} \dot{\phi} \\ K_{fay} \dot{\theta} \\ K_{faz} \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

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

### 2.1.3 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 :

$$m \ddot{\xi} = F_f + F_t + F_g \quad (2.26)$$

On remplace chaque force par sa formule, on trouve :

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\psi\sin\theta + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i - \begin{bmatrix} K_{ftx} \dot{x} \\ K_{fity} \dot{y} \\ K_{ftz} \dot{z} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

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

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m}(\cos\phi\cos\psi\sin\theta + \sin\phi\sin\psi) \left( \sum_{i=1}^4 F_i \right) - \frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = \frac{1}{m}(\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi) \left( \sum_{i=1}^4 F_i \right) - \frac{K_{fity}}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m}(\cos\phi\cos\theta) \left( \sum_{i=1}^4 F_i \right) - \frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g \end{cases} \quad (2.28)$$

### 2.1.4 Equations de mouvement de rotation

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

$$J \dot{\Omega} = -\Omega \wedge J\Omega + M_f - M_a - M_{gh} \quad (2.29)$$

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

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \\
 & - \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \wedge \left( \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} \\ -J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{fax} \dot{\phi}^2 \\ K_{fay} \dot{\theta}^2 \\ K_{faz} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ d(\omega_2^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \\
 & \hspace{20em} (2.30)
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{cases} I_x \ddot{\phi} = -\dot{\theta} \dot{\psi} (I_z - I_y) - J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} - K_{fax} \dot{\phi}^2 + lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ I_y \ddot{\theta} = \dot{\phi} \dot{\psi} (I_z - I_x) + J_r \bar{\Omega}_r \dot{\phi} - K_{fay} \dot{\theta}^2 + lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ I_z \ddot{\psi} = \dot{\phi} \dot{\theta} (I_y - I_x) - K_{faz} \dot{\psi}^2 + d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \quad (2.31)$$

Avec :

$$\bar{\Omega} = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 \quad (2.32)$$

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

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \dot{\phi} \dot{\psi} - \frac{J_r}{I_x} \bar{\Omega}_r \dot{\theta} - \frac{K_{fax}}{I_x} \dot{\phi}^2 + \frac{l}{I_x} U_2 \\ \ddot{\theta} = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J_r}{I_y} \bar{\Omega}_r \dot{\phi} - \frac{K_{fay}}{I_y} \dot{\theta}^2 + \frac{l}{I_y} U_3 \\ \dot{\psi} = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\theta} \dot{\phi} - \frac{K_{faz}}{I_z} \dot{\psi}^2 + \frac{l}{I_z} U_4 \\ \ddot{x} = -\frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} + \frac{1}{m} U_y U_1 \\ \ddot{y} = -\frac{K_{fty}}{m} \dot{y} + \frac{1}{m} U_x U_1 \\ \ddot{z} = -\frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g + \frac{\cos(\phi)\cos(\theta)}{m} U_1 \end{cases} \quad (2.33)$$

Avec :

$$\begin{cases} U_x = (\cos\phi \cos\psi \sin\theta + \sin\phi \sin\psi) \\ U_y = (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \end{cases} \quad (2.34)$$

Pour la matrice d'allocation, nous avons :

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb & -\frac{\sqrt{2}}{2}lb \\ d & -d & d & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

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.

### 2.1.5 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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3 \bar{\Omega}_T x_4 + b_1 U_2 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = a_4 x_2 x_6 + a_5 x_4^2 + a_6 \bar{\Omega}_T x_2 + b_2 U_3 \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = a_7 x_2 x_4 + a_8 x_6^2 + b_2 U_4 \\ \dot{x}_7 = x_8 \\ \dot{x}_8 = a_9 x_8 + \frac{1}{m} U_k U_1 \\ \dot{x}_9 = x_{10} \\ \dot{x}_{10} = a_{10} x_{10} + \frac{1}{m} U_y U_1 \\ \dot{x}_{11} = x_{12} \dot{x}_{12} = a_{11} x_{12} + \frac{\cos(\phi)\cos(\theta)}{m} U_1 - g \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{(I_y - I_z)}{I_x}, a_2 = -\frac{K_{f_{ax}}}{I_x}, a_3 = -\frac{I_r}{I_x}, \\ a_5 = -\frac{K_{f_{ay}}}{I_y}, a_6 = \frac{I_r}{I_y}, a_7 = \frac{(I_x - I_y)}{I_7}, \\ a_8 = -\frac{K_{f_{az}}}{I_z}, a_9 = -\frac{K_{f_{tx}}}{m}, a_{10} = -\frac{K_{f_{ty}}}{m}, \\ a_{11} = -\frac{K_{f_{tz}}}{m}, b_1 = \frac{l}{l_x}, b_2 = \frac{l}{l_y}, \\ b_3 = \frac{l}{l_7} \end{array} \right.$$

## 2.2 MODE TERRESTRE

Dans cette partie, notre système est considéré comme un robot mobile à 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 à partir des deux roues qui sont reliées aux moteurs.

Pour cet mode, nous avons deux modélisations à faire pour les deux prototypes proposés,

donc nous allons présenter la modélisation en mode terrestre pour deux conception.

### 2.2.1 Premier modèle



FIGURE 2.4: Premier conception

#### 2.2.1.1 Géométrie de robot

Le schéma d'un robot de type unicycle est donné sur Figure 2.5. Nous avons supprimé la roue folle qui n'intervient pas dans la cinématique.

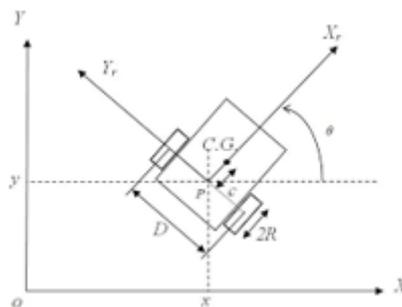


FIGURE 2.5: Paramètres du robot

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  $R_a$ .

**2.2.1.2 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 [39] :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{2.37}$$

$$\omega = \frac{v_2 - v_1}{D} \tag{2.38}$$

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 degré de liberté est représenté comme suit :

$$\begin{cases} x = \int v \cos(\theta) dt \\ y = \int v \sin(\theta) dt \\ \theta = \int \omega \end{cases} \tag{2.39}$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{2.40}$$

**2.2.2 Deuxieme modele**

**2.2.2.1 Conception de deuxième prototype**

Durant le stage, quand on a terminé et monté le premier prototype, nous avons essayé de proposer une nouvelle conception plus développée que la première. Ce nouveau prototype consiste à minimiser le poids totale du véhicule et aussi de dispenser quelques cartes de commande (l'arduino , le shield et les deux moteurs des roues motrices) comme le montre Figure 2.7 (.a). Le nouveau principe de fonctionnement souhaitait est d'illuminer les deux bras blancs, nous avons soudé un bras rigide au milieu pour que la nouvelle structure devienne sous une forme Y. Pour l'autre extrémité de bras nous avons passé un autre support qui prend les deux moteurs brushless et qui garde les mêmes anciennes positions des quatre moteurs brushless.

Aussi, ce support lié et commandé par un servomoteur dont le but de ce dernier est faire tourner le support. Donc pour le mode de vol aérien, il suffit que les quatre hélices soient horizontales comme montre Figure 2.7 (.a). Pour la navigation terrestre, il faut arrêter les deux moteurs qui sont en avant et tourner le support du moteur de 90 degrés grâce au servo moteur comme le montrent les figures 2.7 (.a) et (.b).

2.2.2.2 Modelisation de deuxième prototype



FIGURE 2.6: a et b : nouvelle conception par solidworks

On se basent sur le modèle dynamique d'un corps rigide et en écrit :

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} u \\ v \\ \omega \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \tag{2.41}$$

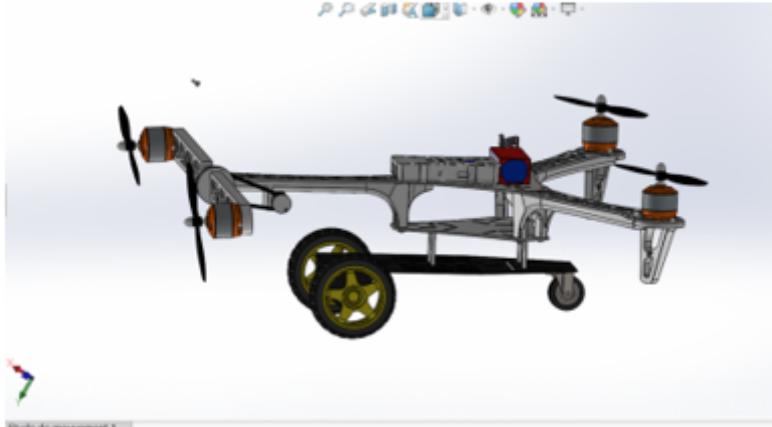


FIGURE 2.7: Deuxieme conception

$$\begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \left(\frac{\pi}{G}\right)^{-1} \left[ \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \wedge \left( \frac{\pi}{G} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \right) \right] \quad (2.42)$$

Tel que :

$\vec{v} \begin{pmatrix} u \\ v \\ \omega \end{pmatrix}$  sont les composantes de la vitesse de translation du robot dans  $IR_B$ .

$\vec{\varphi} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}$  : sont les composantes de la vitesse angulaire dans  $IR_B$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ \omega \end{pmatrix} = (R)_{B_0} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

Tel que :  $(R)_{B_0}$  c'est la matrice de transformation de  $R_0$  vers  $R_B$

$$(R)_{B_0} = \begin{pmatrix} c\alpha & s\alpha & 0 \\ -s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

Tel que  $\alpha$  c'est l'angle de rotation de  $R_B/R_0$

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 + T_4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

Alors :

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} \dot{x} c\alpha + \dot{y} s\alpha \\ -\dot{x} s\alpha + \dot{y} c\alpha \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} T_1 + T_4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{x} c\alpha + \ddot{y} s\alpha \\ -\dot{x} s\alpha + \dot{y} c\alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.46)$$

$$\Rightarrow (1). \ddot{x} c\alpha + \ddot{y} s\alpha = -\dot{x} \dot{\alpha} s\alpha + \dot{y} \dot{\alpha} c\alpha + \frac{1}{m}(T_1 + T_4) \quad (2.47)$$

$$(2). \ddot{x} s\alpha - \ddot{y} c\alpha = \dot{x} \dot{\alpha} c\alpha + \dot{y} \dot{\alpha} s\alpha \quad (2.48)$$

$$(1)c\alpha + (2)s\alpha \Rightarrow \ddot{x} = \dot{\alpha} \dot{y} - \frac{c\alpha}{m}(T_1 + T_4) \quad (2.49)$$

$$(1)s\alpha + (2)c\alpha \Rightarrow \ddot{y} = -\dot{\alpha} \dot{x} - \frac{s\alpha}{m}(T_1 + T_4) \quad (2.50)$$

On a :

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ p(T_1 - T_4) \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \left(\frac{\pi}{G}\right)^{-1} \left[ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ p(T_1 - T_4) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} \wedge \left(\frac{\pi}{G}\right) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} \right] \quad (2.52)$$

Ou :

$$\begin{pmatrix} \frac{\pi}{G} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \quad (2.53)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ I_z \ddot{\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ p(T_1 - T_4) \end{pmatrix} \quad (2.54)$$

$$\Rightarrow \ddot{\alpha} = \frac{d}{I_z}(T_4 - T_1) \quad (2.55)$$

Finalemment , on peut présenter le modèle dynamique comme suit :

$$\begin{cases} \ddot{x} = \dot{\alpha} \dot{y} - \frac{c\alpha}{m}(T_1 + T_4) \\ \ddot{y} = -\dot{\alpha} \dot{x} - \frac{s\alpha}{m}(T_1 + T_4) \\ \ddot{\alpha} = \frac{d}{I_z}(T_4 - T_1) \end{cases} \quad (2.56)$$

## CONCLUSION

Ce chapitre présente le modèle dynamique pour les deux prototypes en 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 pour les deux prototypes, on a modélisé le système selon le formalisme de Newton–Euler afin de s’approcher le plus possible de la dynamique réelle du quadrotor.

Pour le mode terrestre et qui est différent pour les deux prototypes, nous avons modélisé notre véhicule pour les deux conception proposés.

Cet chapitre nous donne l’aide pour faire intervenir notre commande pour faire une simulation bien détaillé dans le prochain chapitre.

## Chapitre 3

# COMMANDE ET RESULTATS

## Introduction

L'objectif des algorithmes de contrôle est d'atteindre la position de référence en faisant en sorte que le véhicule ait une attitude confortable et une poussée spécifique. Dans la littérature, de nombreux articles résolvant un défi particulier. Ainsi, nous avons trouvé des techniques basées sur les saturations, les modes de glissement, le recul avec certaines propriétés qui pourraient être utiles pour contrôler le véhicule hybride. D'autres travaux portent sur le développement d'algorithmes pour stabiliser les véhicules et d'autres se concentrent sur des tâches comme le suivi de trajectoires. La question du contrôle d'un robot à roues avec des contraintes non-holonomes est également abordée, générant une trajectoire fluide afin d'atteindre la position cible.

Ces travaux ont servi de référence pour les algorithmes de contrôle développés pour notre véhicule hybride.

Dans la suite, nous présentons les fondements et les aspects théoriques de la commande de backstepping.

### 3.1 TECHNIQUE DE COMMANDE PAR BACKSTEPPING

La technique de commande par Backstepping a été développée par Kanellakopoulos [28] en 1991, elle est inspirée par les travaux de Feuerer et Morse [29] d'une part, et Tsinias [30] et Kokotovic et Sussmann [31] d'autre part. Cette technique offre une méthode systématique pour effectuer la conception d'un contrôleur pour les systèmes non linéaires, l'idée consiste à calculer une loi de commande afin de garantir pour une certaine fonction (Lyapunov) définie positive que sa dérivée soit toujours négative. L'objectif de cette technique est de calculer, en plusieurs étapes, une commande qui garantit la stabilité globale du système .

#### 3.1.1 Définition

- **Point d'équilibre** physiquement, un système est en équilibre quand il conserve son état en absence de forces externes. Mathématiquement, cela équivaut à dire que la dérivée  $\dot{x}$

de sont état est nulle.

$$\dot{x} = f(x) = 0 \quad (3.1)$$

- **Stabilité** on dit qu'un système est stable lorsque il revient à son état d'équilibre si l'on excite par une impulsion, il est instable lorsque il s'éloigne.
- **Stabilité de Lyapunov** Considérons le système invariable suivant [32]

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.2)$$

Commençons à l'état initial  $x(0)$ . Supposons que  $x_e$  est un point d'équilibre du système,  $f(x_e) = 0$ . Nous disons que le point d'équilibre est :

- Stable, si pour chaque  $\varepsilon > 0$  existe  $\delta(\varepsilon) > 0$ , tel que :  
 $\|x(0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_e\| < \varepsilon$ ; pour tout  $x \geq 0$
- Asymptotiquement stable, s'il est stable et en plus il existe  $r > 0$  tels que :  
 $\|x(0) - x_e\| < r \Rightarrow x(t) \rightarrow x_e$ ; lorsque  $t \rightarrow \infty$
- Globalement asymptotiquement stable, s'il est asymptotiquement stable pour tous les états initiaux.

## Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes

L'étude de la stabilité des systèmes non linéaire est très complexe. L'approche de Lyapunov est l'approche la plus utilisée pour étudier ce problème. On distingue deux méthodes de Lyapunov pour l'analyse de la stabilité :

- La méthode de linéarisation
- La méthode directe

La première concerne la stabilité locale autour d'un point d'équilibre. Par contre, la deuxième détermine la stabilité des systèmes en construisant une fonction scalaire des états du système dont on examinera la variation temporelle.

On s'intéresse par la méthode directe de Lyapunov car la commande par backstepping est basée sur cette méthode.

**Méthode direct de Lyapunov**

Son objectif, est de définir une méthode permettant d’analyser la stabilité d’un système linéaire sans connaître explicitement les solutions des équations différentielles qui le décrivent. La philosophie de cette méthode n’est que l’extension mathématique d’un phénomène physique observé, car les systèmes mécaniques et électriques perdent de l’énergie pour se stabiliser au point d’équilibre.

• **Théorème de Lyapunov**

La méthode directe de Lyapunov (ou la méthode des fonctions de Lyapunov) est dérivée du critère énergétique de stabilité en appliquant ce critère indépendamment du concept d’énergie, on remplace alors l’énergie du système par une « fonction de Lyapunov » qui est définie positive (comme l’énergie). Soit le système autonome

$$\dot{x} = f(x), x_\epsilon = 0 \tag{3.3}$$

Ce système aura un point d’équilibre  $x_\epsilon = 0$ , globalement asymptotiquement stable, s’il existe une fonction scalaire  $V(x)$  continue avec une dérivée partielle par rapport au temps  $\dot{V}(x)$  continue ayant les propriétés suivantes [32] :

1.  $V(0)=0$
2.  $V(x) > 0 \forall x \neq 0$
3.  $\lim_{\|x\| \rightarrow \infty} V(x) = \infty$
4.  $\dot{V} < 0 \forall x \neq 0$

Figure 3.1 représente l’interprétation géométrique du théorème de Lyapunov.

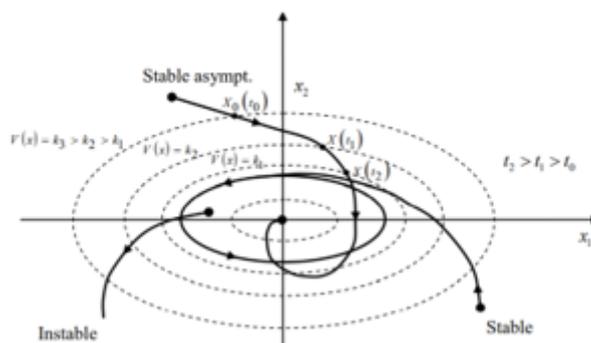


FIGURE 3.1: Interprétation géométrique du théorème de Lyapunov.

## La synthèse de la commande par la méthode directe de Lyapunov

Dans les paragraphes précédents, nous avons étudié la stabilité des systèmes où on a supposé implicitement que la loi de commande a été choisie et notre but était de vérifier la stabilité du système avec cette loi de commande, mais le problème dans cette synthèse est comment trouver cette commande qui stabilisera le système. Nous allons présenter une méthodologie qui combine entre la recherche de la fonction de Lyapunov et la loi stabilisante. En général, il existe deux concepts pour l'application de la méthode directe de Lyapunov pour la synthèse d'une commande stable :

**1 ère concept :** On suppose que la loi de commande existe et on cherche la fonction de Lyapunov.

**2 ème concept :** Cette fois si, on fait un choix sur  $V(x)$ , la fonction de Lyapunov candidate, et on cherche la loi de commande qui rend cette fonction candidate la fonction de Lyapunov réelle. Dans la plupart des théorèmes et des lemmes de la stabilité au sens de Lyapunov, l'existence de la fonction de Lyapunov était assumée et l'objectif était de déterminer la stabilité de ces systèmes. Mais dans la plupart de cas, la recherche de cette fonction est très difficile. Dans le paragraphe suivant, nous présenterons la notion du « backstepping » qui nous offre une solution à ce problème.

### 3.1.2 Technique de la commande par backstepping

- Algorithme de base

Afin d'illustrer le principe de la méthode backstepping, on considère le cas des systèmes non linéaires de la forme [32] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ \dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + g_3(x_1, x_2, x_3)u \end{cases} \quad (3.4)$$

Où,  $g_i$  et  $f_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) sont des fonctions non linéaires connues tel que :  $f_i(0) = 0$  et  $g_i(x) \neq 0 \forall (x_1, x_2, x_3) \in \mathfrak{R}^3$  On désire faire suivre à la sortie  $y = x_1$  le signal de référence  $y_r$ .

Où  $y_r, \dot{y}_r, \ddot{y}_r$  et  $y_r^3$  sont supposées connues et uniformément bornées. Le système étant du troisième ordre, le design s'effectue en trois étapes :

**Etape 1** On considère d'abord le premier sous-système :

$$\dot{x}_r = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \quad (3.5)$$

La variable d'état  $x_2$  est traitée comme une commande et l'on définit la première valeur désirée :

$$(x_1)_d = \alpha_0 = y_r \quad (3.6)$$

La première variable d'erreur se définit par :

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (3.7)$$

Sa dérivée est donnée comme suit :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 = f_1 + g_1x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (3.8)$$

Pour un tel système, la fonction quadratique

$$V_1(e_1) = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (3.9)$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 = e_1[f_1 + g_1x_2 - \dot{\alpha}_0] \quad (3.10)$$

Un choix judicieux de  $x_2$  rendre  $\dot{V}_1$  négative et assure la stabilité de l'origine du sous système décrit par (4.5), ce choix se donne comme suit :

$$(x_2)_d = \alpha_1 = \frac{1}{g_1}[-K_1e_1 - f_1 + \dot{\alpha}_1] \quad (3.11)$$

Où  $k_1 > 0$  est un paramètre de design. Par conséquence, l'équation (4.10) devienne :

$$\dot{V}_1 = -K_1e_1^2 \leq 0 \quad (3.12)$$

**Etape 2** On considère, dans ce cas, le deux premiers sous-systèmes :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \end{cases} \quad (3.13)$$

Et on définit la nouvelle variable d'erreur :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (3.14)$$

La dynamique des erreurs  $e_1, e_2$  s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = f_1 + g_1(e_2 + \alpha_1) - \dot{\alpha}_0 \\ \dot{e}_2 = f_2 + g_2x_3 - \dot{\alpha}_1 \end{cases} \quad (3.15)$$

Pour lequel on choisit comme fonction de Lyapunov :

$$V_2(e_1, e_2) = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (3.16)$$

Cette fonction de Lyapunov a pour dérivée :

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = e_1[f_1 + g_1(e_2 + \alpha_1) - \dot{\alpha}_0] + e_2[f_2 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1] = -k_1 e_1^2 + e_2[f_2 + g_1 e_1 + g_2 x_3 - \dot{\alpha}_1] \quad (3.17)$$

On prend  $x_3$  comme une deuxième commande virtuelle, sa valeur est donné par :

$$(x_3)_d = \alpha_2 = \frac{1}{g_2}[\dot{\alpha}_1 - g_1 e_1 - f_2 - k_2 e_2] \quad (3.18)$$

Où  $k_2 > 0$  , avec  $\dot{\alpha}_1$  calculée analytiquement

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \quad (3.19)$$

Un tel choix permet de réduire la dérivée à :

$$\dot{V}_2 \leq -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 \leq 0 \quad (3.20)$$

**Etape 3** Le système (4.4) est maintenant considéré dans sa globalité. La nouvelle variable d'erreur est :

$$e_3 = x_3 - \alpha_3 \quad (3.21)$$

Ce qui permet d'écrire la dynamique des erreurs  $(e_1, e_2, e_3)$  :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = f_1 + g_1(e_2 + \alpha_1) - \dot{\alpha}_0 \\ \dot{e}_2 = f_2 + g_2(e_3 + \alpha_2) - \dot{\alpha}_1 \\ \dot{e}_3 = f_3 + g_3 u - \dot{\alpha}_2 \end{cases} \quad (3.22)$$

On prend comme fonction de Lyapunov :

$$V_3(e_1, e_2, e_3) = V_2 + \frac{1}{2} e_3^2 \quad (3.23)$$

Sa dérivée s'écrit sous la forme :

$$\dot{V}_3(e_1, e_2, e_3) = \dot{V}_2 + e_3 \dot{e}_3 = -k_1 e_1^2 + e_3[g_3 u + g_2 e_2 + f_3 - \dot{\alpha}_2] \quad (3.24)$$

Le choix approprié de la vraie commande  $u$  se donne par :

$$U = \frac{1}{g_3} [\dot{\alpha}_2 - g_2 e_2 - f_3 - k_3 e_3] \quad (3.25)$$

Où  $k_3 > 0$ , et  $\dot{\alpha}_2$  est également calculée analytiquement :

$$\dot{\alpha}_2 = \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} \dot{x}_2 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \ddot{x}_r} \ddot{y}_2 \quad (3.26)$$

Avec ce choix, on trouve :

$$\dot{V}_3(e_1, e_2, e_3) \leq -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq 0 \quad (3.27)$$

D'où la stabilité en boucle fermée du système original (4.4), et la régulation à zéro de l'erreur de poursuite ( $y - y_r$ ). Les deux principaux objectifs du design (la stabilité et la poursuite) sont alors atteints.

### 3.1.2.1 Cas des systèmes d'ordre n

L'extension de la procédure récursive de conception de la commande par backstepping à un système d'ordre n du type [32] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 \\ \dots \\ \dot{x}_{n-1} = f_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) + g_{n-1}((x_1, x_2, \dots, x_{n-1})x_n \end{array} \right. \quad (3.28)$$

Donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_1)_d = \alpha_0 = y_r \\ (x_{i+1})_d = \alpha_i = \frac{1}{g_i} [\phi_i - g_{i-1}e_{i-1} - \omega_i - k_i - e_i] \\ \\ u = \frac{1}{g_n} [\phi_{n-1} - g_{n-1}e_{n-1} - \omega_n - k_n - e_n] \end{array} \right. \quad (3.29)$$

Où

$$\left\{ \phi_i = \sum_{k=1}^i \left( \begin{array}{l} e_i = x_i - \alpha_{i-1} \\ \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} g_k x_{k+1} + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_r^{(k-1)}} y_r^k \\ \omega_i = f_i - \sum_{k=1}^i \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_k} f_k \end{array} \right) - \omega_i; i = 1, \dots, n \right. \quad (3.30)$$

Les différentes fonctions de Lyapunov sont données par :

$$V_i = \sum_{j=1}^i [x_j - \alpha_{j-1}]^2 \quad (3.31)$$

## 3.2 COMMANDE PAR BACKSTEPPING DE NOTRE SYSTEME

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

On propose, dans cette section, une stratégie de commande basée principalement sur deux boules (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 3.2 ci-dessous représente la stratégie de commande du quadrotor :

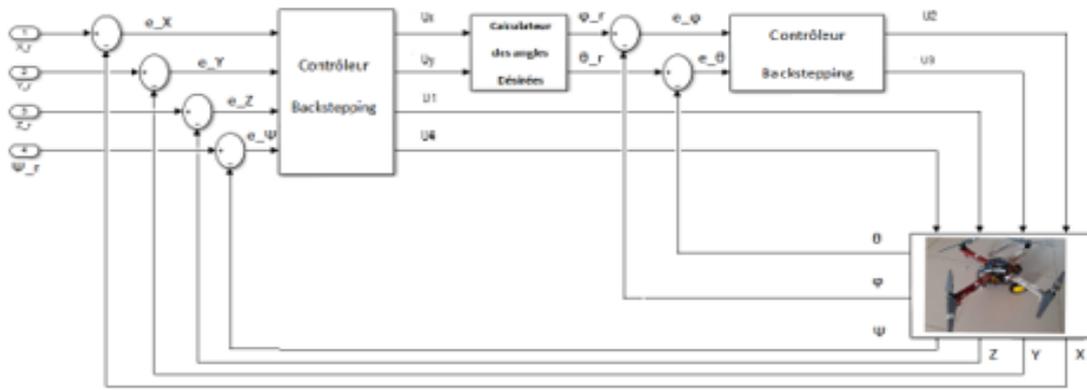


FIGURE 3.2: Illustration de la structure de commande du quadrotor

### 3.2.2 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 :

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

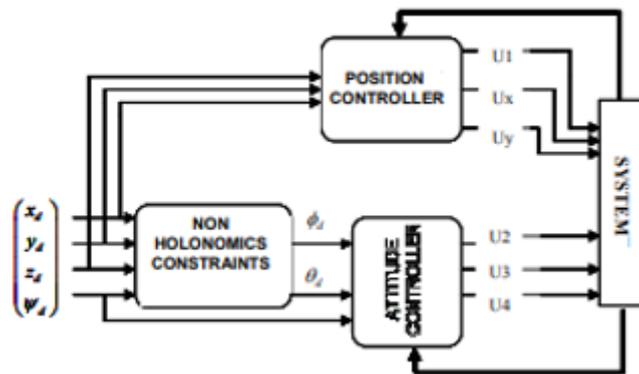


FIGURE 3.3: Schéma synoptique de la proposition contrôleur

### Etape 1

Pour le sous système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3 \bar{\Omega}_r x_4 + b_1 U_2 \end{cases} \quad (3.32)$$

On a :

$$\begin{cases} e_1 = \phi_d - x_1 \\ V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \end{cases} \quad (3.33)$$

La dérivée de la fonction de lyaponov est donnée par :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (\dot{\phi}_d - x_2) \quad (3.34)$$

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

$$x_{2d} = \dot{\phi}_d + k_1 e_1 \quad (3.35)$$

Et (4.55) devient :

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0 \quad (3.36)$$

### Etape 2

On considère la deuxième variable d'erreur :

$$\begin{cases} e_2 = \dot{\phi}_d + k_1 e_1 - x_2 \\ V_2 = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2) \end{cases} \quad (3.37)$$

La dérivée de la nouvelle fct est :

$$\dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 = e_1 (-k_1 e_1 + e_2) + e_2 (\ddot{\phi}_d + k_1 \dot{e}_1 - a_1 x_4 x_6 - a_2 x_2^2 - a_3 \bar{\Omega}_r x_4 - b_1 U_2) \quad (3.38)$$

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

$$U_2 = \frac{1}{b_1}(-a_1 x_4 x_6 - a_2 x_2^2 - a_3 \bar{\Omega}_r x_4 + \ddot{\phi}_d + k_1(-k_1 e_1 + e_2) + k_2 e_2 + e_1) \quad (3.39)$$

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

$$\begin{cases} U_1 = \frac{m}{\cos x_1 \cos x_2} (g - a_{11} x_{12} + \ddot{z}_d + k_{11}(-k_{11} e_{11} + e_{12}) + k_{12} e_{12} + e_{11}) \\ U_3 = \frac{1}{b_2} (-a_4 x_2 x_6 - a_5 x_4^2 - a_6 \bar{\Omega}_r x_2 + \ddot{\theta}_d + k_3(-k_3 e_3 + e_4) + k_4 e_4 + e_3) \\ U_4 = \frac{1}{b_3} (-a_7 x_2 x_4 - a_8 x_6^2 + N \ddot{\psi}_d + k_5(-k_5 e_5 + e_6) + k_6 e_6 + e_5) \\ U_x = \frac{m}{U_1} (-a_9 a_8 + \ddot{x}_d + k_7(-k_7 e_7 + e_8) + k_8 e_8 + e_7/U_1 \neq 0) \\ U_y = \frac{m}{U_1} (-a_{10} a_{10} + \ddot{y}_d + k_9(-k_9 e_9 + e_{10}) + k_{10} e_{10} + e_9/U_1 \neq 0) \end{cases} \quad (3.40)$$

Tel que :

$$e_i = \begin{cases} x_{id} - x_i/i \in [3, 5, 7, 9, 11] \\ \dot{x}_{(i-1)d} + k_{(i-1)} e_{(i-1)} - x_i/i \in [4, 6, 8, 10, 12] \end{cases} \quad (3.41)$$

Les fonctions prennent la forme suivante :

$$V_i = \begin{cases} \frac{1}{2} e_i^2 - x_i/i \in [3, 5, 7, 9, 11] \\ V_{(i-1)} = \frac{1}{2} e_i^2/i \in [4, 6, 8, 10, 12] \end{cases} \quad (3.42)$$

Figure 3.4 représente l'illustration de la structure de commande du quadrotor par bachstepping.

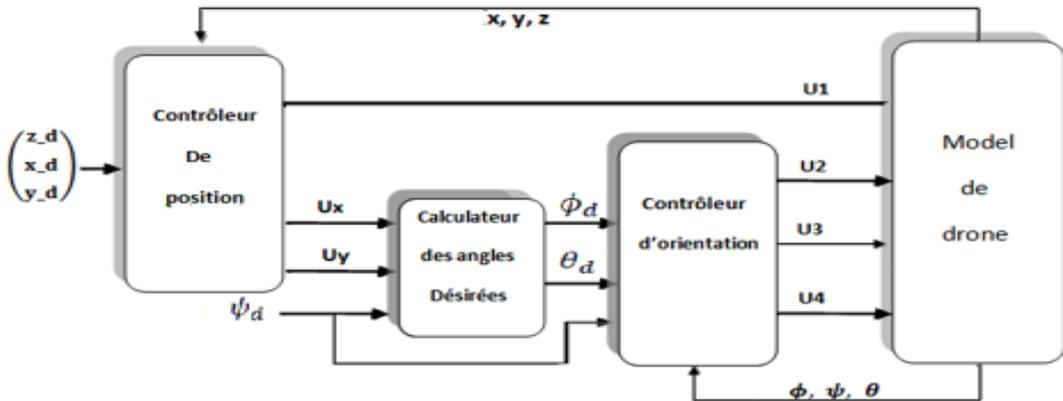


FIGURE 3.4: Illustration de la structure de commande du quadrotor par bachstepping

### 3.2.3 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  $[x_d, y_d, \theta]$  défini 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 :

$$\begin{cases} x = \int v \cos(\theta) dt \\ y = \int v \sin(\theta) dt \\ \theta = \int \omega dt \end{cases} \quad (3.43)$$

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 :

$$V = V_1 + V_2 = \frac{1}{2} \rho^2 + \frac{1}{2} a^2 \quad (3.44)$$

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

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \dot{\rho} + \dot{a} \quad (3.45)$$

Tel que :

$$\dot{\rho} = -v \cos(a) \quad (3.46)$$

$$\dot{a} = -\omega + \frac{v \sin a}{\rho} \quad (3.47)$$

Donc :

$$\dot{V} = \rho(-v \cos a) + a(-\omega + \frac{v \sin a}{\rho}) \quad (3.48)$$

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

$$v = k_\rho \rho \cos a, k_\rho > 0 \quad (3.49)$$

$$\dot{V}_1 = \rho(-k_\rho \rho \cos^2 a) = -k_\rho \rho^2 \cos^2 a \leq 0 \quad (3.50)$$

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 :

$$\begin{cases} \omega = k_\rho \sin a \cos a + k_a a \\ k_a > 0 \end{cases} \quad (3.51)$$

$$\dot{V}_2 = a(-k_\rho \sin a \cos a - k_a a + \frac{k_\rho \rho \sin a \cos a}{\rho}) = -k_a a^2 \leq 0 \quad (3.52)$$

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

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = -k_\rho \rho^2 \cos^2 a - k_a a^2 \leq 0 \quad (3.53)$$

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

## 3.3 SIMULATION NUMERIQUE

### 3.3.1 Mode aérien

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

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

TABLE 3.1: Les paramètres du quadrotor

### 3.3.1.1 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  $t \in [0, 5s]$  : 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 3.5.

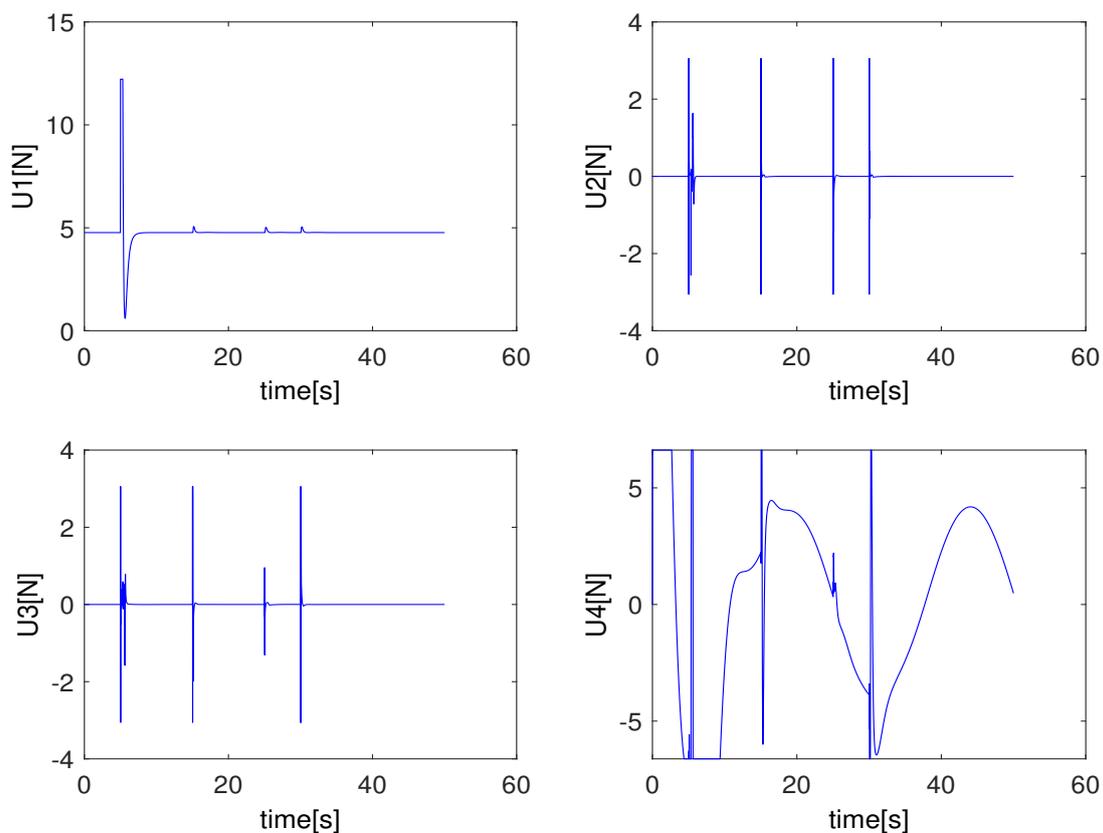


FIGURE 3.5: Poursuite des commandes en vol linéaire

La poursuite de la position angulaire en vol linéaire est illustrée à Figure 3.6

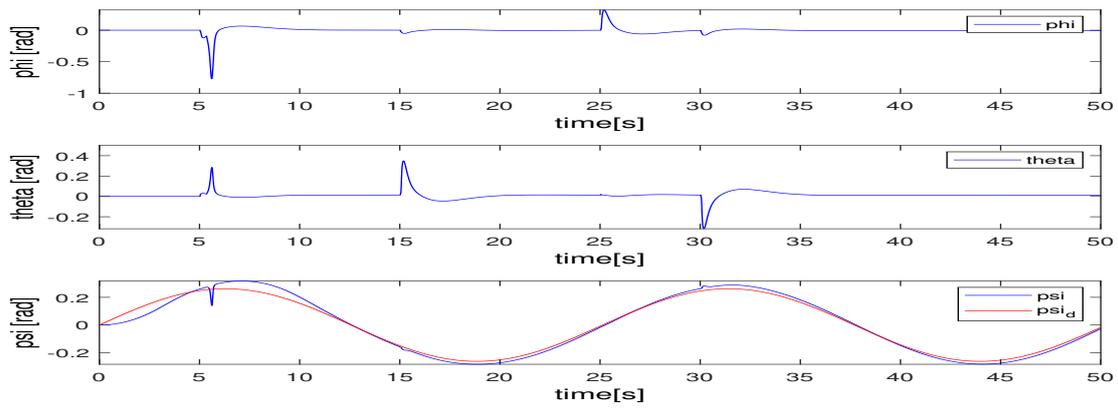


FIGURE 3.6: Poursuite des positions angulaires en vol linéaire.

La poursuite de la position angulaire en vol linéaire est illustrée à Figure 3.7.

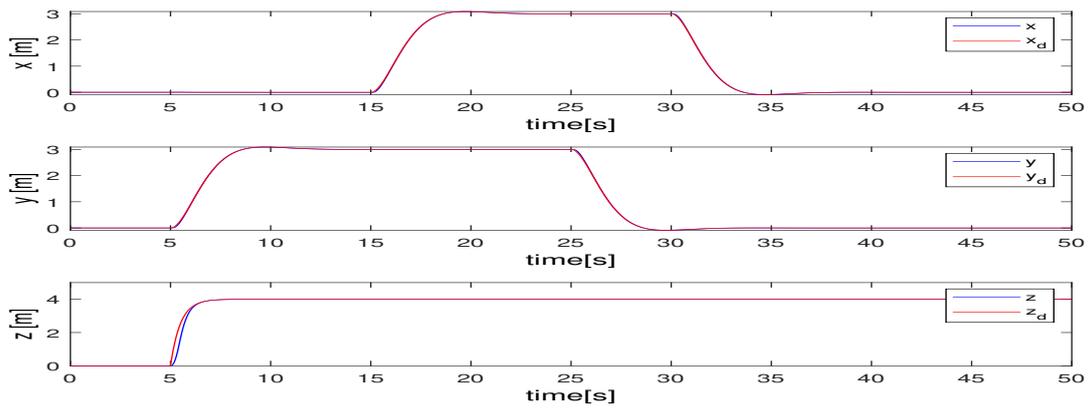


FIGURE 3.7: Poursuite de position en vol linéaire

Comme le montrent les figures 3.5,3.6,3.7 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 3.8 montre la trajectoire de référence ainsi que la trajectoire effectuée par le quadrotor en simulation 3D sur MATLAB :

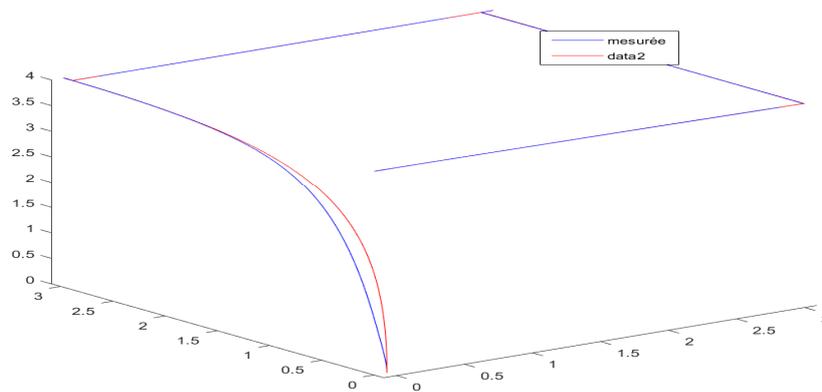


FIGURE 3.8: la trajectoire effectuée en 3D

### 3.3.2 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.

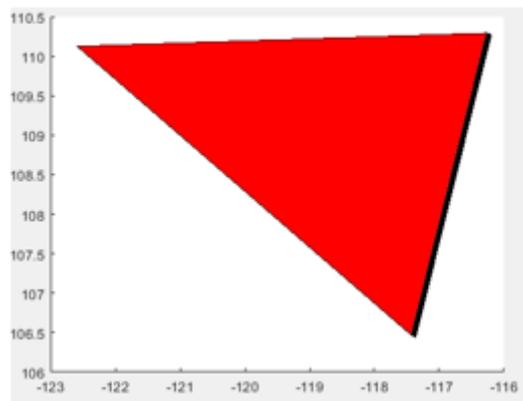


FIGURE 3.9: présentation du robot sur matlab

Figure (3.10 ,a et b) montre la trajectoire et l'évolution du mouvement du robot qui se déplace dans un espace ou il ya aucun obstacle.

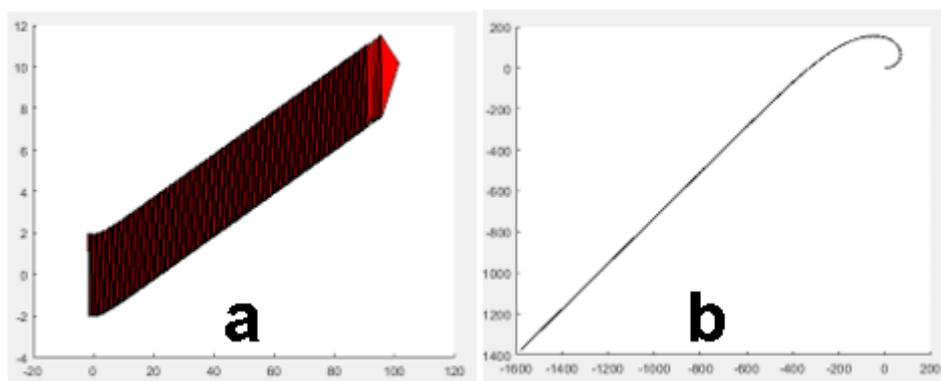


FIGURE 3.10: navigation du robot dans un terrain

Les trois mouvements principaux qui peuvent s'effectuer par le robot sont : avancer, tourner a gauche et tourner a droite comme montre dans Figure 3.11.

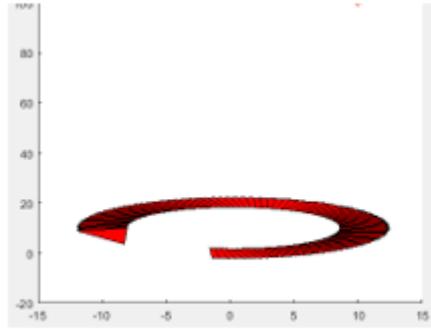


FIGURE 3.11: les mouvements principaux du robot

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les commandes backstepping afin de choisir pour commander notre véhicule. Pour le mode de navigation aérienne, nous avons simulé le modèle comme quadrotor pour un vol linéaire. Puis nous avons fait la deuxième simulation pour le deuxième mode de navigation, nous avons basé sur la simulation du modèle de robot par des scénarios qui représentent les mouvements possibles pour faire ses missions.

# CONCLUSION GENERALE

Le drone hybride air-sol est l'un des engins les plus populaires et séduisant de part son élégance et sa dynamique. Par conséquent, il a attiré l'attention et devenu le sujet de recherche de plusieurs équipes et laboratoires ces dernières années. Ce concept est un système complexe, non linéaire, multi variables, instable et présente une dynamique fortement couplée, ce qui a fait de sa commande un grand défi.

Dans cet mémoire, nous avons présenté deux conception pour deux prototypes différents avec ses différents modélisations.

Nous avons commencé le document par des aperçus sur les robots , les derniers projets de recherche traitant ce sujet ainsi que leurs champs d'application. Puis nous avons visé les drones et les robots mobiles a roues puis les drones hybrides air-sol . Nous avons aussi présenté avec les détailles l'architecture matérielle et software de notre engin hybride.

Ensuite, on a décrit les mouvements de base de notre véhicule hybride qui est se forme d'un drone quadrotor avec un robot mobile unicycle. Nous avons donné son modèle dynamique par le formalisme de Newton-Euler pour le mode de navigation aérienne et aussi le modèle dynamique pour le mode de navigation terrestre, en adoptant des hypothèses simplificatrices afin de faciliter la synthèse la lois de commande.

Enfin, nous avons fait la simulation de notre modèle en distinguant les deux modes de navigation principales de notre prototype(déplacement aérien et terrestre).

A l'issue de ce travail, l'ensemble des perspectives que nous estimons abordables seront présentées. Elles peuvent apporter soit des améliorations, soit des nouveautés aux contributions futures :

- La caractérisation et la modélisation aérodynamique d'un drone hybride constituait une tâche très importante. Il s'agit d'une étape indispensable à la bonne compréhension des lois physiques qui régissent de tels systèmes et indispensables à leur conception aéromécanique.
- Étudier et faire la conception de notre propre structure quadrotor hybrides
- Synthétiser une loi de commande .

# Bibliographie

- [1] Hao, Jin-Kao, Philippe Galinier, and Michel Habib. "Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes." *Revue d'intelligence artificielle* 13.2 (1999) : 283-324.
- [2] Brady, Michael. "Artificial intelligence and robotics." *Artificial intelligence* 26.1 (1985) : 79-121.
- [3] Agmon, Noa, Gal A. Kaminka, and Sarit Kraus. "Multi-robot adversarial patrolling : facing a full-knowledge opponent." *Journal of Artificial Intelligence Research* 42 (2011) : 887-916.
- [4] Desai, Jaydev P., Jim Ostrowski, and Vijay Kumar. "Controlling formations of multiple mobile robots." *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*. Vol. 4. IEEE, 1998.
- [5] Abdelli Mohamed ,Ouartiou Adel, "Contrôle non-linéaire pour la stabilisation et le suivi de trajectoire d'un quadrotor", ESSAT-Tlemcen, Algeria, 2020
- [6] Krijnen, Daan, and Coen Dekker. "Ar drone 2.0 with subsumption architecture." *Artificial intelligence research seminar*. 2014.
- [7] Bachmann, Richard J., et al. "A biologically inspired micro-vehicle capable of aerial and terrestrial locomotion." *Mechanism and Machine Theory* 44.3 (2009) : 513-526.
- [8] Radmanesh, M. R., et al. "Numerical Investigation of Azarakhsh MAV." *IMAV2012, Germany* (2012).
- [9] Bertrand, Sylvain. *Commande de drone miniature à voilure tournante*. Diss. 2007.
- [10] M. Mokhtari, "Observation et Commande de Drones Miniatures à voilures tournantes", Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, Faculté de Technologie, 2015
- [11] Medjati, Walid Yassine. *Exploitation des UAVs dans l'optimisation des réseaux de Télécommunications*. Diss.

- 
- [12] Salazar-Cruz, Sergio. Modélisation et conception de commandes robustes pour la stabilisation de véhicules aériens multi-rotor. Diss. Compiègne, 2005.
- [13] Hassanalian, Mostafa, et al. "A novel methodology for wingsizing of bio-inspired flapping wing micro air vehicles : theory and prototype." *Acta Mechanica* 228.3 (2017) : 1097-1113.
- [14] Khebbache, Hicham. Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires : application système UAV de type quadrotor. Diss. 2018.
- [15] Satla, Zouaoui, et al. Contribution à la modélisation et à la commande d'un drone miniature. 2019. Thèse de doctorat.
- [16] Cabeza, Sandra, et al. "Stress-induced damage evolution in cast AlSi12CuMgNi alloy with one- and two-ceramic reinforcements." *Journal of Materials Science* 52.17 (2017) : 10198-10216.
- [17] Abdelloui, 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.
- [18] Megnafi, Hicham. "Frequency Plan Optimization Based on Genetic Algorithms for Cellular Networks." *Journal of Communications Software and Systems* 16.3 (2020).
- [19] Daler, Ludovic, et al. "A flying robot with adaptive morphology for multi-modal locomotion." *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2013.
- [20] Thorel, Sylvain, and Brigitte D'Andrea-Novel. "Hybrid terrestrial and aerial quadrotor control." *IFAC Proceedings Volumes* 47.3 (2014) : 9834-9839.
- [21] Dudley, Christopher J., Alexander C. Woods, and Kam K. Leang. "A micro spherical rolling and flying robot." *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2015.
- [22] Pedro, Marchand Nicolas Castillo. Conception et navigation d'un véhicule hybride terrestre et aérien. Diss. Grenoble Alpes, 2018.
- [23] RACHEDI, N. "Commande hybrid avec observation d'un UAV de type Quadrotor." mémoire de magistère, EMP Bordj EL-Bahri, algérie (2011).

- 
- [24] 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.
- [25] Cowling, Ian D., et al. "A prototype of an autonomous controller for a quadrotor UAV." 2007 European Control Conference (ECC). IEEE, 2007.
- [26] 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.
- [27] Garcia, Elena, Joaquin Estremera, and Pablo Gonzalez-de-Santos. "A classification of stability margins for walking robots." *Robotica* 20.6 (2002) : 595-606.
- [28] Kanellakopoulos, Ioannis, Petar V. Kokotovic, and A. Stephen Morse. "Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems." 1991 American Control Conference. IEEE, 1991.
- [29] Ahcène Boubakir "Méthodes de commande par mode de glissement appliquées au bras manipulateur et au système hydraulique CE105 à réservoirs couplés ", Thèse Magister, Ecole Militaire Polytechnique, février 2007.
- [30] Peterson, K., et al. "A wing-assisted running robot and implications for avian flight evolution." *Bioinspiration & biomimetics* 6.4 (2011) : 046008.
- [31] Benaskeur, A. Aspects de l'application du Backstepping adaptatif à la commande des systèmes non linéaires. Diss. Ph. D, Université Laval, Québec, 2000.
- [32] Kokotovic, P\_V, and H. J. Sussmann. "A positive real condition for global stabilization of nonlinear systems." *Systems & Control Letters* 13.2 (1989) : 125-133.