

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE**  
**LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE BLIDA 01**

**Mémoire de Master Académique**  
**Présenté à l'institut d'Aéronautique et des études spatiales (IAB)**  
**Pour l'Obtention du Diplôme**  
**Master en Avionique**  
**Thème**

**Commande vocale d'un drone de type  
quadrirotors par apprentissage  
approfondi**

**Présenté par :**

YAHIA-BEY Younes

BENTRAD Hatem

**Dirigé par :**

Dr. KHEIREDDINE Choutri

**Année universitaire : 2019/2020**



# *Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce modeste travail à mes chers parents, mon père YAHIABEY Abdelkader et ma chère mère BOUDJELLOULI Halima pour leur soutien, patience, encouragement et de l'aide continue pendant mes années d'études.*

*Ce travail est également dédié pour tous mes oncles et toute la famille.*

*Mes dédicaces vont tendrement à mes chers amis , spécialement gania et à tous mes collègues dans l'institut et à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.*

*Et pour mon cher binôme BENTRAD Hatem.*



*YAHIABEY Younes Mohamed*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail aux fleurs de ma vie  
mes chers parents qui m'ont aidé et soutenu au cours des années de  
mes études.*

*Mon père BENTRAD Layachi et ma mère SALHI Rabia.*

*Mes dédicaces vont également à mes frères.*

*Sans oublier de dédier ce mémoire à mes amis.*

*Et Pour mon cher binôme YAHIABEY Younes Mohamed*



*BENTRAD Hatem*

## REMERCIEMENTS

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

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos enseignants de L'institut d'Aéronautique , notamment à notre promoteur Mr. Choutri Kheireddine d'avoir proposé le sujet sur lequel nous avons travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.

Nous tenons notamment à adresser l'expression de nos sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Nous terminons par remercier tous nos amis et collègues qui nous ont soutenu durant l'élaboration de notre travail, et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin au long de la réalisation de ce travail .

## ملخص

الطائرات بدون طيار وخاصة منصات الإقلاع والهبوط العمودية ، شائعة للغاية ومفيدة للعديد من المهام. تُستخدم الأنواع المتاحة تجاريًا من منصات اليوم للأعمال الجوية في العالم الحقيقي ، مثل فحص الهيكل العمودي ومسح الموقع والزراعة الدقيقة. توفر هذه الأنظمة الأساسية وظائف مستقلة عالية المستوى، مما يقلل من تدخل المستخدم ويمكن أن يحمل الحمولات المطلوبة لتطبيق ما

لا يتم التحكم في الطائرات بدون طيار من قبل طيارين محترفين ولديهم خبرة أقل في الطيران. لذلك يبدو من المفيد تبسيط عملية فحص الطائرات. الهدف هو تصميم وتنفيذ مركبة جوية بدون طيار يتم التحكم فيها عن طريق التعرف على الصوت. في النظام المقترح، يتم إعطاء الأوامر الصوتية للطائرة الرباعية للتحكم فيها بشكل مستقل. يتم التحكم في هذا النظام عن طريق إدخال الصوت. يستجيب نظام التحكم لإدخال الصوت من خلال عملية التعرف على الصوت وتقوم الخوارزميات المقابلة بتشغيل المحركات بسرعات محددة تتحكم في اتجاه الطائرة الرباعية

## ABSTRACT

UAVs, especially vertical takeoff and landing platforms (VTOLs), are extremely popular and useful for many tasks. Commercially available varieties of VTOL platforms are today used for real-world aerial work, such as vertical structure inspection, site survey and precision farming. These platforms offer high-level autonomous functionality, minimizing user intervention and can carry the payloads required for an application.

UAVs are not controlled by professional pilots and users have less aeronautical experience. It therefore seems useful to simplify the process of controlling aircraft. The objective is to design and implement an unmanned aerial vehicle controlled by voice recognition. In the proposed system, voice commands are given to the quadricopter to control it autonomously. This system is controlled by voice input. The control system responds to the voice input with a voice recognition process and the corresponding algorithms operate the engines at specified speeds that control the direction of the quadricopter.

## RESUME

Les drones, en particulier les plates-formes verticales de décollage et d'atterrissage (VTOL), sont extrêmement populaires et utiles pour de nombreuses tâches. Les variétés de plates-formes VTOL disponibles dans le commerce sont aujourd'hui utilisées pour des travaux aériens dans le monde réel, tels que l'inspection de structure verticale, l'étude de chantier et l'agriculture de précision. Ces plates-formes offrent des fonctionnalités autonomes de haut niveau, minimisant les interventions des utilisateurs et peuvent transporter les charges utiles requises pour une application.

Les drones ne sont pas contrôlés par des pilotes professionnels et les utilisateurs ont moins d'expérience aéronautique. Il semble donc utile de simplifier le processus de contrôle des aéronefs. L'objectif est de concevoir et de mettre en œuvre un véhicule aérien sans pilote contrôlé au moyen de la reconnaissance vocale. Dans le système proposé, des commandes vocales sont données au quadricoptère pour le contrôler de manière autonome. Ce système est piloté par l'entrée vocale. Le système de commande répond à l'entrée vocale par un processus de reconnaissance vocale et les algorithmes correspondants font fonctionner les moteurs à des vitesses spécifiées qui contrôlent la direction du quadricoptère.



## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I.....	3
GENERALITES SUR LES DRONES.....	3
I.1. INTRODUCTION.....	4
I.2. HISTORIQUE.....	4
I.3. CLASSIFICATION DES DRONES.....	5
I.3.1 Types des drones selon leur Rayon d'action, l'Endurance et l'Altitude (R.E.A).....	5
I. 3.2. Les types des drones selon les plates-formes aériennes.....	6
I.4. APPLICATIONS DES DRONES.....	10
I.4.1. Utilisation militaire.....	10
I.4.2. Utilisation civile.....	10
I.5. LE QUADCOPTÈRE.....	10
I.5.1. Les composants d'un quadcoptère.....	11
I.6. COMMANDES UTILISEES POUR CONTROLER DU QUADCOPTERE.....	17
I.7. ALGHORITMES UTILISEES POUR LE CONTROLE AVEC LA RECONNAISSANCE VOCALE D'UN QUADCOPTERE.....	18
CHAPITRE II.....	21
MODELE DYNAMIQUE DU QUADRIROTOR.....	21
II.1 INTRODUCTION.....	22
II.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	22
II.3 LES MOUVEMENTS DU QUADRIROTOR.....	23
II.3.1 Mouvement de roulis.....	23
II.3.2 Mouvement de tangage.....	24
II.3.3 Mouvement de lacet.....	24
II.3.4 Mouvement vertical.....	25
II.3.5. Mouvements de translation.....	25
Elle est devisé on deux :.....	25
II.4 MODELE DYNAMIQUE.....	26
II.4.1. Repères utilisés.....	26
II.4.2 Matrice de rotation.....	28

II.4.3 Vitesses de rotation.....	28
II.4.4 Vitesses de translation.....	29
II.4.5. Effets physiques agissants sur le quadrirotor.....	29
II.4.6. Modélisation avec le formalisme d'Euler-Lagrange.....	32
II.4.7 Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler.....	36
II.4.8 Représentation d'état du système.....	39
II.5 CONCLUSION.....	40
CHAPITRE III.....	41
LA RECONNAISSANCE DE LA PAROLE.....	41
III.1. INTRODUCTION.....	42
III.2. LE SIGNAL VOCAL.....	42
III.2.1. Caractéristiques du signal de parole.....	43
III.2.2. Numérisation.....	43
III.3. RECONNAISSANCE DE LA PAROLE.....	44
III.3.1. Quelques applications.....	45
III.3.2. Les méthodes utilisées pour la reconnaissance vocale.....	45
III.3.3. La programmation dynamique.....	46
III.3.4. Les modèles acoustiques.....	46
III.4. LES RESEAUX DE NEURONES ET LES RESEAUX PROFONDS.....	47
III.4.1 Un réseau de neurones.....	47
III.4.2. L'apprentissage aprofondi (Deep learning).....	48
III.4.3. Réseau de neurones à convolution (Convolution neural network).....	49
III.4.4. Fonctions d'activation.....	50
III.4.5. Apprentissage des réseaux de neurones profonds(Training deep neural networks).....	50
III.4.6. Le son comme données.....	51
III.5. DONNÉES.....	52
III.5.1. Base de données (dataset).....	52
III.6. IMPLEMENTATION DU PROGRAMME EN PYTHON.....	52
III.6.1. Exploration et visualisation des donnees.....	53
CHAPITRE IV.....	55
COMMANDE VOCALE DU QUADRIROTOR.....	55
<b>IV .2. ALGORITHME DE CONTROLE.....</b>	<b>56</b>

IV.2.1 Commande par régulation PID.....	56
IV .2.2. Principe de la commande.....	57
IV.3 SYSTEME A COMMANDE VOCALE.....	61
IV.4 LE DEROULEMENT DES COMMANDES.....	63
IV.5. SIMULATION ET RESULTATS.....	64
IV .5.1. La commande démarré (on).....	65
IV.5.2. La commande vers le haut (up).....	65
IV .5.3.La commande vers la droite (right).....	67
IV .5.4.La commande vers la gauche (left).....	70
IV .5.5.La commande vers le bas (down).....	73
IV .5.6. La commande arrêt (off).....	75
IV.6. CONCLUSION.....	76
REFERENCES.....	78

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I

**Figure I.1:** UN DRONE

**Figure I.2:** DRONE MONOROTOR

**Figure I.3:** DRONE MULTI-ROTOR

**Figure I.4:** DRONE A VOILURE FIXE

**Figure I.5:** DRONE HYBRIDE A VOILURE FIXE

**Figure I.6:** QUADCOPTERE (TIRÉE DE ROBOTSHOP (2017))

**Figure I.7:** MOTEUR D'UN DRONE

**Figure I.8:** CONTROLEUR DE VITESSE D'UN MOTEUR

**Figure I.9:** LES HELICES

**Figure I.10 :** UNE BATTERIE

**Figure I.11:** UN RADIOCOMMANDE

**Figure I.12.** CARTE ARDUINO

**Figure I.13 :** Étapes du processus de la MFCC

**Figure I.14:** Schéma fonctionnel du module de transmission.

**Figure I.15:** Schéma fonctionnel du module de réception

**Figure I.16 :** Support vector machines

**Figure I.17 :** structure de l'architecture de réseau convolutionnel

## CHAPITRE II

**Figure II.1:** CONFIGURATION D'UN DRONE QUAD-COPTER.

**Figure II.2:** MOUVEMENTS DE ROULIS.

**Figure II.3:** LE MOUVEMENT DE TANGAGE.

**Figure II.4:** MOUVEMENT DE LACET.

**Figure II.5:** ILLUSTRATION DU MOUVEMENT VERTICAL.

**Figure II.6:** MOUVEMENT DE TRANSLATION.

**Figure II.7:** REPERAGE DU QUADRIROTOR.

**Figure II.8:** FORCES EXERCEES SUR UN DRONE.

**Figure II.9:** LE QUAD-ROTOR DANS UN REFERENTIEL INERTIEL.

## CHAPITRE III

**Figure III.1:** SIGNAL ECHANTILLONNE

**Figure III.2:** EXEMPLE DE HMM UTILISE POUR MODELISER LES PHONEMES

**Figure III.3:** un réseau de neurone

**Figure III.4:** SCHEMA FONCTIONNEL DU RESEAU NEURONAL CONVOLUTIF

**Figure III.5 :** une présentation d'un fichier wave

**Figure III.6:** une présentation d'un fichier wave a droite (right)

**Figure III.7:** le nombre d'enregistrements pour chaque commande vocale

**Figure III.8:** représentation de la durée des enregistrements

**Chapitre IV :**

**Figure IV.1:** Principe de la commande par PID.

**Figure IV.2:** Structure du PID traditionnelle

**Figure IV.3:** Structure du PID améliorée

**Figure IV.4 :** Schéma fonctionnel du système a commande vocale

**Figure IV.5:** Structure system de contrôle avec PID

**Figure IV.6 :** le signal vocal de la commande démarré (on)

**Figure IV.7 :** le signal vocal de la commande vers le haut (up)

**Figure IV.8:** La représentation 3d de la commande vers le haut (up)

**Figure IV.9:** le signal vocal de la commande vers la droite (right)

**Figure IV.10 :** La représentation 3d de la commande vers la droite (right)

**Figure IV.11 :** le signal vocal de la commande vers la gauche (left)

**Figure IV.12 :** La représentation 3d de la commande vers la gauche (left)

**Figure IV.13 :** le signal vocal de la commande vers le bas (down)

**Figure IV.14 :** La représentation 3d de la commande vers le bas (down)

**Figure IV.15 :** le signal vocal de la commande arrêt (off)

## **LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau I.1:** Types des drones selon leur Rayon d'action, l'Endurance et l'Altitude (R.E.A)

**Tableau III.1 :** Tableau des paramètres du quadri-rotors

## LISTE DES ABREVIATIONS

**AIY** : Artificial Intelligence Yourself

**CNN** : Convolution Neural Network

**DTW** : Dynamic Time Warping

**DAP** : Deep Acoustic Phonetic

**DNN** : Deep Neural Network

**ESC** : Electronic Speech Controller

**FC** : Fully Connected Layer

**GPS**: Ground Positioning System

**GMM** : Gaussian Mixture Model

**HALE** : Haute Altitude Long Endurance

**HMM** : Hidden Markov Model

**IMU** : Inertial Measurement Unit

**LPCC** : Linear Predictive Cepstral Coefficients

**LQR** : Linear Quadratic Regulator

**MALE** : Moyenne Altitude Long Endurance

**MAV** : Mini Air Vehicles

**MFCC** : Mel-Frequency Cepstral Coefficients

**PID** : Proportionnel Intégrateur Dérive

**ReLU** : Rectified Linear Unit

**RAP** : Reconnaissance Automatique de la Parole



**RMS** : Root Mean Square

**SRAP** : Système de Reconnaissance de la Parole

**SGD** : Stochastic Gradient Descent

**SVM** : Support vector machines

**TUAV** : Tactical Unmanned Aerial Vehicles

**UAV** : Unmanned Aerial Vehicle

**UCAV** : Unmanned Combat Air Vehicles

## LISTE DES SYMBOLES

**d** : Le coefficient de drag.

**F** : Force de poussée

**g** : La gravité.

**J** : L'inertie du système.

**Jr** : L'inertie des rotors.

**Kfa**: Le coefficient des frottements aérodynamiques.

**Kft**: Coefficient de traînée de translation.

**Kftx, Kfty, Kftz**: Les coefficients de traînée de translation.

**L** : La longueur du bras entre le rotor et le centre de gravité du Quadrirotor

**M1** : Moteur 1 du drone

**M2** : Moteur 2 du drone

**M3** : Moteur 3 du drone

**M4** : Moteur 4 du drone

**Ma** : Moment résultant des frottements aérodynamiques.

**Mf**: Moment provoqué par les forces de poussée et de traînée.

**m** : La masse totale

**P** : Poids b: Le coefficient de portance

**R** : Matrice de rotation

**R<sub>0</sub>**: Repère inertiel

**R<sub>1</sub>**: Repère du corps du drone

**V** : Vitesse linéaire dans le repère fixe

**$\omega_1$**  :Vitesse angulaire du moteur 1

**$\omega_2$**  :Vitesse angulaire du moteur 2

**$\omega_3$**  :Vitesse angulaire du moteur 3

**$\omega_4$**  :Vitesse angulaire du moteur 4

**$\phi$**  :Angle de roulis (rad)

**$\theta$**  :Angle de tangage (rad)

**$\psi$**  :Angle de lacet (rad)

**$\Omega$**  :Vitesse de rotation dans le repère fixe

## INTRODUCTION GENERALE

Durant les dix dernières années, les avancées technologiques et les nombreuses applications potentielles ont suscité un intérêt croissant pour la robotique aérienne. Ils ont porté aux engins volants sans pilote humain à bord que l'on appelle drone [1].

La recherche sur les drones n'a cessé d'augmenter au cours de ces dernières décennies. Les drones ont progressivement été ouverts au grand public permettant d'être utilisés dans plusieurs domaines. Ces appareils ont notamment l'avantage de moins exposer le personnel au danger tout en couvrant une large gamme de missions. Au début, les applications du drone ont été orientées uniquement vers le domaine militaire [2]. Aujourd'hui, ils sont aussi utilisés dans divers domaines tels que la recherche, le sauvetage, la cartographie, livraisons etc....

Les drones, de type voiture tournante, disposent de 6 degrés de liberté (où deux degrés de liberté peuvent se perdre sous certaines conditions). Leurs tailles varient du centimètre au mètre. La dynamique du drone peut être modélisée facilement permettant l'implémentation de plusieurs types de commande. Les composants de drones deviennent aussi de plus en meilleur marché. Ces propriétés sont quelques raisons pour l'expansion des recherches sur les drones [3].

De nombreuses technologies, ont été proposées pour gérer le problème difficile de l'inadéquation entre les formations et des tests dans le scénario de reconnaissance vocale bruyante [4]. La technologie vocale est devenue un vaste domaine de recherche. Elle élimine nombreux problème rencontrés par les anciens modèles tels que les scénarios avec le bruit additif [5], robustesse au bruit, dégradation des performances amplifié sous condition de conversation distante (champ lointain) [6], où la force du signal est faible ce qui rend le système sensible au bruit et à la réverbération additive. Des recherches ont été menées par des entreprises aéronautiques telles qu'Euro Control et AENA qui est en collaboration avec certains groupes d'experts en technologie vocale. En cela, des bases de données vocales et textuelles ont été créées et de nouvelles des modèles de traitement de texte ont été développés pour des exigences. Ces améliorations technologiques ont été prises en charge par le matériel qui exécute ces algorithmes comme ainsi que les améliorations des algorithmes qui démontre les propriétés de la recherche intelligente de la meilleure solution [7].

Les quadrotors auraient à bord une combinaison de plusieurs technologies. Les angles d'attitude et les contrôles d'altitude utilisés sont principalement basés sur le contrôle PID. Pour

contrôler le comportement du quadrotor et afin d'appliquer les différentes commandes avec le système de la reconnaissance vocale, l'utilisation des réseaux neuronaux convolutifs (CNN) a été proposée. Cette nouvelle technologie utilise des techniques très récentes avec des améliorations algorithmiques qui donnent des résultats plus efficaces.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la conception d'un quadrirotor à commande vocale. Le présent travail est scindé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur les drones en général et sur les quadri-rotors en particulier où nous passons en revue leurs différents domaines d'application et leur fonctionnement.

Le deuxième chapitre comporte trois parties essentielles : Dans un premier temps, nous présentons une modélisation générale pour un corps rigide à 6-DDL basée sur le formalisme de Newton et Euler. Ensuite, nous présentons, les différents phénomènes aérodynamiques générés par l'air sur les voilures en rotation. Enfin, nous donnons le modèle d'état puis nous simplifions ce modèle pour appliquer la technique de commandes utilisées dans les chapitres qui vont suivre.

Dans le troisième chapitre nous présentent quelques notions générales sur la reconnaissance vocale. Nous décrivons le fonctionnement d'un système de la reconnaissance vocale Puis, Nous détaillerons la méthode utilisée pour la commande à l'aide de la reconnaissance vocale et on termine par une évaluation des performances de notre commande de système.

Le quatrième chapitre s'articule sur trois sections : la première section consiste à donner une description sue le régulateur PID, la deuxième consiste à contrôler les différents mouvements en utilisant la technique PID et la simulation des trajectoires du quad-coptère sous cette loi de commande dans la troisième section. Les résultats sont présentés à l'aide de logiciel python.

Le mémoire est finalisé par une conclusion générale dans laquelle sont regroupés les principaux résultats obtenus.

# **CHAPITRE I**

## **GENERALITES SUR LES DRONES**

## I.1. INTRODUCTION

Le drone est un engin volant n'ayant pas recours à un pilote humain. Ces aéronefs autonomes ont été utilisés pour la première fois dans le domaine militaire pendant la Première Guerre mondiale. L'évolution de la technologie notamment au niveau de l'électronique, a permis d'améliorer les performances du drone de manière significative. Les drones sont à présent employés dans les domaines médicaux, et de l'ingénierie. Plusieurs types de drones existent. Les drones dits à voilure fixe se comportent comme des avions et sont beaucoup utilisés dans le domaine militaire. Les drones dits à voilure tournantes comportent comme des hélicoptères (figure I.1) et sont beaucoup utilisés dans le domaine de l'audiovisuel et de la sécurité [8].



Figure I.1 : Un drone

## I.2. HISTORIQUE

En 1920, à la suite de la première guerre mondiale. En France George Clémenceau, alors Président de la Commission sénatoriale de l'Armée, lance un projet « d'avions sans pilote » : le capitaine Max Boucher met au point un système de pilotage automatique qui fait voler sur plus de cent kilomètres un avion Voisin BN3. Ainsi, dans les années 1920, des avions sans pilote radiocommandés voient le jour, avec les tentatives de torpilles aériennes télécommandées par des ondes de télégraphie sans fil. Le premier drone français stricto sensu a été conçu, réalisé et expérimenté dès 1923 à Etampes par l'ingénieur Maurice Percheron et le capitaine Max Boucher.

Toutefois, l'armée française n'y voyait pas encore d'intérêt militaire.

Le drone a été développé de façon confidentielle par les Etats-Unis comme un moyen de supériorité stratégique et de rupture de capacité devant permettre la surveillance et l'intervention militaire chez l'ennemi sans encourir les risques humains que l'opinion ne supportait plus. En outre, il est utilisé pour larguer des tracts dans le cadre de la guerre psychologique.

Les drones sont engagés pour la première fois pendant la guerre du Viet Nam, puis lors de la guerre du Kippour. Ils font désormais partie des moyens tactiques et stratégiques du champ de bataille. L'absence de pilote permet d'opérer à l'intérieur des lignes ennemies pour des missions à risque, sans crainte de pertes humaines.

Le secteur de la défense constitue la principale raison de l'apparition des drones, qui seront par la suite réutilisés dans le domaine civil. Depuis plus de vingt ans maintenant, les drones ont été développés et utilisés en France dans un cadre militaire, pour des missions de surveillance et de renseignement. Suivant l'exemple de nombreuses innovations majeures initialement militaires (le satellite, le moteur à réaction, le GPS, internet), la technologie des drones a été adaptée depuis quelques années au secteur civil [9].

### I.3. CLASSIFICATION DES DRONES

La liste des différents types de drones est assez longue, donc au lieu de jeter une tonne de nouvelles informations, nous avons décidé de diviser les choses en plusieurs catégories différentes. Et bien que la classification des drones la plus courante soit en fonction du type et du nombre d'hélices dont ils disposent, il y a quelques autres facteurs qui méritent d'être mentionnés tels que:

- Taille
- Intervalle
- Capacités

#### I.3.1 Types des drones selon leur Rayon d'action, l'Endurance et l'Altitude (R.E.A)

Selon le rayon d'action, l'Endurance et l'Altitude il existe plusieurs types des drones. le tableau I.1 regroupe les différents types des drones [10].

Tableau I.1: Types des drones selon leur Rayon d'action, l'Endurance et l'Altitude (R.E.A)

Nom	Rayon d'action	Endurance	Altitude
<b>Drones HALE</b>	Plusieurs milliers de km	Trentaines d'heures	20000 mètres
<b>Drones MALE</b>	/	Trentaines d'heures	5000-15000 mètres
<b>Drones de combat UCAV</b>	2800 km	/	12200 mètres
<b>Drones tactique TUAV</b>	Plus de 100 km	Dizaines d'heures	200-5000 mètres
<b>Mini Drone MAV</b>	30 km	/	300 mètres
<b>Micro/Nano Drones</b>	Dizaines de km	Vingtaines de minutes	/

Avec:

- **HALE** : Haute Altitude Long Endurance
- **MALE** : Moyenne Altitude Long Endurance
- **UCAV** : Unmanned Combat Air Vehicles
- **TUAV** : Tactical Unmanned Aerial Vehicles
- **MAV** : Mini Air Véhicule

### I. 3.2. Les types des drones selon les plates-formes aériennes

Les drones aériens civils sont classés en quatre catégories en fonction de la plate-forme aérienne qu'ils utilisent :

#### I.3.2.1. Monorotor

Comme leur nom l'indique, ces unités ne comportent qu'un seul rotor assez gros (sans compter le petit à la queue), et ressemblent fortement à un hélicoptère réel dans leur structure et



leur conception (figure I.2).

Et comme ils sont plus efficaces pour générer de la poussée que leurs homologues à rotors multiples, ils conviennent à des temps de vol plus longs, qui peuvent encore être augmentés en utilisant un moteur à essence. Cela dit, en raison de leur complexité, ils ont tendance à coûter plus cher qu'un drone moyen et nécessitent un entretien mécanique régulier. Plus important encore, ils entraînent certains risques opérationnels à cause deux grandes pales de rotor [11] .



**Figure I.2 : Drone monorotor**

#### I.3.2.2. Multi-rotor

Les drones multi-rotors sont, de loin, les types de drones les plus courants utilisés par les amateurs et les professionnels et parmi les quatre principaux types de drones discutés dans cette catégorie, ils sont aussi l'option la moins chère disponible. Bien que vous les appeliez le plus souvent «drones», il existe d'autres noms que vous devriez vous familiariser, en fonction du nombre de rotors qu'ils ont sur la plate-forme aérienne [12]:

- Multicoptères : qui sert de «terme générique» qui couvre tous les types de drones multi-rotors ( figure I.3).
- Tricoptères.
- Quadcoptères.
- Hexacoptères.
- Octocoptères .



**Figure I.3 : Drone multi-rotor**

#### I.3.2.3. Aile fixe

Ces types de drones utilisent le même principe que les avions en utilisant des ailes pour générer de la portance, plutôt que des rotors générateurs de poussée verticale (figure I.4).

Les drones à voilure fixe n'ont besoin que d'énergie pour maintenir le mouvement vers l'avant, tandis que les ailes génèrent une portance verticale au fur et à mesure, ce qui les rend beaucoup plus efficaces pour couvrir de plus longues distances, cartographier de vastes zones et rester proches de leur point d'intérêt aussi longtemps que la source d'énergie le permet [13].

Parmi les inconvénients de cette configuration :

- La nécessité d'une piste de décollage.
- Elle n'autorise pas le vol stationnaire.
- Le vol à basse vitesse est impossible.
- Le vol à basse altitude est impossible



**Figure I.4 : Drone à voilure fixe**

#### I.3.2.4. Hybride a voilure fixe

En combinant les avantages des drones à voilure fixe et la possibilité de survoler les modèles à rotor, un nouveau type de drones est né les hybrides à voilure fixe (figure I. 5).

Et bien qu'ils aient tous une chose en commun - décollage et atterrissage verticaux - ils se déclinent en plusieurs variantes :

- Une conception à voilure fixe associée à un moteur à levage vertical
- Avion assis en queue qui pointe verticalement pour le décollage, puis tangue pour voler horizontalement
- Modèles à rotor inclinable dotés de rotors ou d'ailes pouvant pivoter du pointage vers le haut à une position horizontale
- Le concept a été initialement testé dans les années 60 - mais seuls les capteurs de nouvelle génération, tels que les gyroscopes et les accéléromètres, ont réussi à insuffler une nouvelle vie à l'idée [14].



Figure I.5 : Drone hybride à voilure fixe

## I.4. APPLICATIONS DES DRONES

### I.4.1. Utilisation militaire

Les forces armées de plusieurs pays disposent de drones. Leur nombre et leurs rôles vont croissant, complétant ou remplaçant les avions pilotés. Ils sont surtout utilisés pour les missions de combat ou de reconnaissance afin de recueillir des renseignements avant les opérations [11].

### I.4.2. Utilisation civile

Dans le domaine civil, les drones peuvent être utilisés pour [11] :

- La surveillance de zones inondées ;
- La pulvérisation d'insecticides ;
- L'inspection de lignes à haute tension ou de chemin de fer ;
- Les repérages pour la construction d'autoroutes ;
- L'archéologie ;
- Les sapeurs-pompiers pour la surveillance ;
- Le contrôle du trafic routier ;
- La surveillance maritime ;
- La récolte de données pour la prévision météorologique ;
- L'inspection dans des environnements dangereux pour l'homme ;
- La prise de photographies aériennes.

## I.5. LE QUADCOPTÈRE

Le quadcoptère ainsi que les drones à voilure tournante se différencient aux drones à voilure fixe par leurs capacités à se déplacer avec un degré de liberté plus important. Le quadcoptère a l'avantage d'être pilotable facilement et d'être bon marché. Sa capacité à pouvoir faire des vols stationnaires et à basses vitesses fait du quadcoptère un élément intéressant dans l'utilisation du drone dans le domaine de la recherche. Ces drones peuvent avoir plusieurs tailles différentes, de la

taille d'une pièce de monnaie à plusieurs mètres de long. Les quadcoptères de petites tailles sont souvent catégorisés en tant que micro drones et disposent de propriétés particulières. Le quadcoptère fait partie de la catégorie des drones à voilure ayant plusieurs rotors. Il est composé de cinq éléments principaux : les moteurs au nombre de quatre, le châssis, la centrale inertielle (IMU), la carte électronique et le récepteur de radiocommunication (figure I.6) [15].



**Figure I.6 : Quadcoptere (tree de robotshop (2017))**

### **I.5.1. Les composants d'un quadcoptère**

#### **I.5.1.1. Les moteurs utilisés**

Quatre moteurs sont nécessaires pour le quadcoptère. Il en existe de différentes tailles et puissances. Ils sont caractérisés par le diamètre de leur cage tournante et par le nombre de tours/volt ou KV. Un moteur ayant un KV de 1000 tr/V fonctionnera à 12000 tours/min s'il est alimenté en 12V. Sur les moteurs utilisés en modélisme (figure I.7), les bobinages en cuivre sont montés sur le stator et les aimants sur le rotor, à l'inverse des moteurs électriques conventionnels.



**Figure I.7 : Moteur dun drone**

#### I.5.1.2. Les contrôleurs

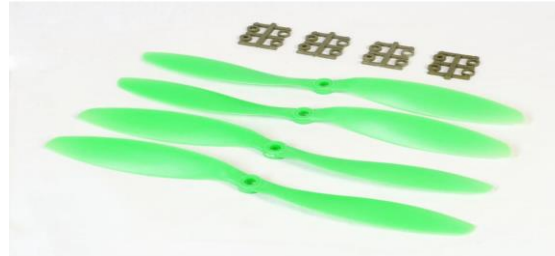
Ces moteurs sont commandés par des interfaces de puissance appelées « Contrôleurs » (ESC ou Electronique Speed Controller en anglais). Ce sont des circuits électroniques qui permettent de faire varier la vitesse de rotation des moteurs, à partir du courant délivré par la batterie. La commande de vitesse vient du contrôleur de vol (figure I.8). Ils sont caractérisés par une valeur en ampères (ex : 30A) qui indique l'intensité maximale qu'ils peuvent encaisser pendant le vol.



**FigureI.8: contrôleur de vitesse d'un moteur**

### I.5.1.3. Les hélices

Elles sont souvent en matière plastique mais aussi parfois en matériaux composites. Elles sont identifiées par leur diamètre et leur pas indiqués en pouces (ex : 9x4,5). Sur un drone quadcoptère , il faut 2 hélices à sens horaires et 2 hélices à sens anti-horaire.



**Figure I.9: Les helices**

### I.5.1.4. La batterie

Les batteries utilisées sur un drone multiroteur sont essentiellement des « Lithium Polymère » (figure I. 10). Elles sont issues d'une technologie qui permet d'avoir un très bon rapport poids/puissance. Un élément LiPo (1S) fournit une tension de 3,7V. Sur un drone, on utilise en général des batteries à 3 ou 4 éléments (3S ou 4S). L'intensité est aussi un critère de choix. Une batterie de 3000mAH aura une meilleure autonomie qu'une batterie de 2200 mAH. Un chargeur spécifique est à prévoir ainsi que des règles de sécurité très strictes car ces batteries peuvent exploser en cas de mauvaise manipulation.



**Figure I.10 : une batterie**

#### I.5.1.5. La radiocommande

Pour piloter le drone, il faut un émetteur radio pour le pilote et un récepteur dans le drone. Il existe plusieurs technologie pour les radiocommandes, les radios FM en 41MHz (de moins en moins utilisées) et les radios en 2,4GHz, souvent programmables pour s'adapter à chaque appareil radiocommandé.

Une radiocommandé doit idéalement comporter 6 voies pour piloter un drone, 4 voies sur les manettes et 2 voies sur des interrupteurs pour actionner certaines fonctions (figure I.11). Il existe deux modes de configuration des manettes, le Mode 1 dans lequel les gaz sont à droite et le mode 2 où les gaz sont à gauche. Certaines radios fonctionnent dans les deux sens, c'est-à-dire qu'elles peuvent envoyer des ordres à l'émetteur mais aussi recevoir des informations de celui-ci (tension de la batterie,).



**Figure I.11 : une radiocommande**

#### I.5.1.6. Le contrôleur de vol

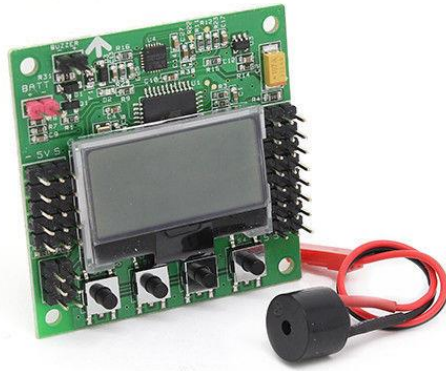
C'est une carte électronique, équipée de capteurs très précis, qui va traiter les consignes du pilote envoyées à l'émetteur ainsi que les informations envoyées par ses capteurs et va transmettre des impulsions électriques aux contrôleurs des moteurs pour faire varier leur vitesse. Ces cartes sont équipées de gyroscopes et d'accéléromètres pour mesurer et compenser les déplacements [16].

Certaines cartes évoluées sont équipées de GPS et d'altimètre afin de maintenir un point fixe ou une altitude ou même de retourner au point de départ du drone en cas de perte de signal radio(figure



I.12).

Comme exemple on à les cartes suivant : NAVIO,Erle-Brain,Pxhawk...etc



**FigureI.12 : Carte arduino**

#### I.5.1.7.La centrale inertielle

La centrale inertielle est une des composantes les plus importantes du drone. Il permet de récupérer les angles d'orientation ainsi que les vitesses angulaires. Le centre inertiel contient trois capteurs ou deux capteurs : un gyroscope, un accéléromètre et un magnétomètre si l'on parle d'un centre inertiel à 9 degrés de liberté. Le magnétomètre n'est pas inclus lorsque l'on parle d'un centre inertiel à 6 degrés de liberté. Le gyroscope mesure la vitesse angulaire du drone. Ce capteur a l'avantage de ne pas être trop bruité et n'est pas influencé par le champ électromagnétique. L'intégration directe pour avoir les angles d'orientation est déconseillée. L'intégration cumule en effet les erreurs au cours du temps. Un décalage entre l'angle actuel et l'angle mesuré se fera au cours du temps. L'accéléromètre mesure l'accélération linéaire exercée par le drone. Ce capteur mesure correctement l'accélération si le dispositif ne vibre pas fortement. Les accéléromètres sont très sensibles aux forces extérieures ce qui peut causer des erreurs d'interpolation [17]. Ils ne peuvent donc pas être utilisés pour récupérer directement la position en intégrant deux fois ou être utilisés uniquement pour trouver les angles d'orientation.

## I.6. COMMANDES UTILISEES POUR CONTROLER UN QUADCOPTERE

Afin de contrôler un quadcopter en position et en orientation, un système de commande doit être mis en place. Plusieurs types de commandes peuvent être utilisés tels que :

- Les unités de gestion de vol utilisent en général des contrôleurs linéaires. La commande la plus utilisée est le PID (Proportionnel Intégrateur Dérivé). Cette commande a été utilisée plusieurs fois par Tores et al.[18].Les termes d'intégration et de la dérivation permettent d'obtenir une stabilité ainsi qu'une convergence de l'erreur à zéro de manière exponentielle. Ce contrôleur n'a pas besoin de connaître le modèle dynamique du quadcoptère. Une amélioration de ce contrôleur est la commande linéaire quadratique (LQR) qui permet de faire un suivi de trajectoire en optimisant la consommation d'énergie.
- La commande non linéaire par backstepping Cette commande décrite par Kanellakopoulos et al. [19] a permis d'utiliser la dynamique du drone ainsi que la théorie de Lyapunov afin d'assurer la stabilité du contrôleur. Le principe consiste à diviser le système en plusieurs sous-systèmes en cascade. Les lois de commandes sont alors faites pour chaque sous système, de manière décroissante, jusqu'à avoir une loi de commande globale pour tout le système. On aussi la Commande par mode glissant
- La commande par mode glissant permet, à partir de la théorie de Lyapunov, d'obtenir une surface de glissement où les variables d'états du système à contrôler sont maintenues dans cette région. Plusieurs recherches telles que Bouadiand Tadjine [20] démontrent la stabilité de la commande avec des paramètres dynamiques et perturbations extérieures inconnues. Cette commande dispose d'un problème bien particulier appelé chattering. Ce phénomène peut provoquer des secousses au système. Plusieurs techniques sont utilisées pour essayer de réduire ce phénomène. Bandyopadhyay et al. [21] utilisent un contrôleur permettant de modifier les gains de manière dynamique afin de réduire le phénomène. Gonzalez et al. [22] utilisent une fonction de saturation afin de corriger le problème. Des fonctions linéaires, comme une fonction avec une loi exponentielle, permettent de réduire le chattering. Lee et al. [23] utilisent une commande adaptative avec la commande par mode glissant afin de contrôler un quadcopter et comparent cela à un contrôleur de linéarisation entrée-sortie.

- La linéarisation entrée-sortie permet d'utiliser des lois de commande linéaires sur des systèmes non linéaires. Le principe est d'utiliser un changement de variable afin de trouver une variable d'état linéaire décrivant la dynamique du drone. Yaou et al. [24] proposent une linéarisation entrée-sortie en utilisant les crochets de Lie pour contrôler les quadcopters. Il est possible, à partir de la théorie de Lypunov, d'utiliser une commande adaptative afin de contrôler un drone ayant des paramètres inconnus ainsi que des perturbations extérieures. Une fois la variable d'état linéarisée, il devient simple d'implémenter n'importe quelles lois linéaires.

### I.7. ALGORITHMES UTILISEES POUR LE CONTROLE AVEC LA RECONNAISSANCE VOCALE D'UN QUADCOPTERE

Des différents algorithmes proposés durant les dernières années pour créer un système de commande à la base de la reconnaissance vocale

1. Le MFCC décrit par Davis et Mermelstein, était une approche rentable de la reconnaissance vocale. MFCC est l'un des algorithmes les plus courants et familiers, utilisé dans les applications de signal pour la fonctionnalité extraction. Les étapes suivantes ont été utilisées dans cette méthode qui a été résumée dans la (Figure I.13). Une l'explication du MFCC existait déjà dans l'article [25], la valeur caractéristique obtenue à partir du MFCC sera entraînée à partir les Recursive Neural Réseau RNN

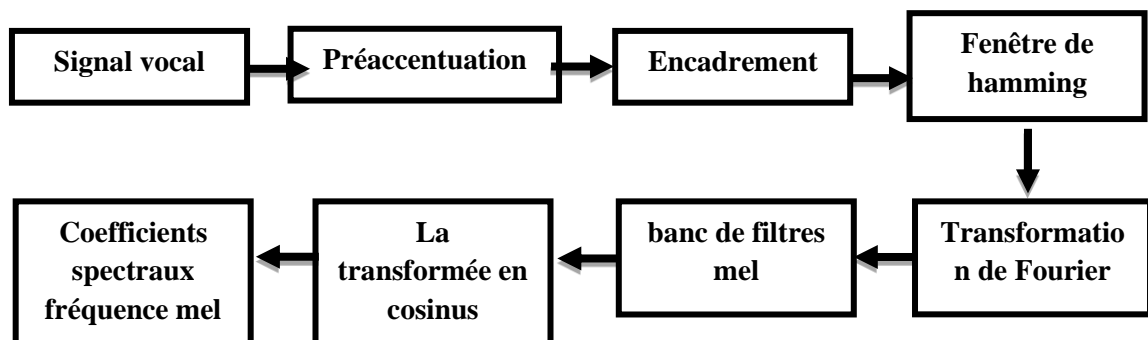


Figure I.13 : Étapes du processus de la MFCC

2. Le quadricoptère peut être contrôlé aussi par interface de commandes vocales et transmission par RF module. La condition d'équilibrage et de mise à niveau pendant le vol est détectée utilisant des capteurs, à savoir des accéléromètres et des gyroscopes, et sa sortie des capteurs sont utilisés pour un nivellement en douceur.

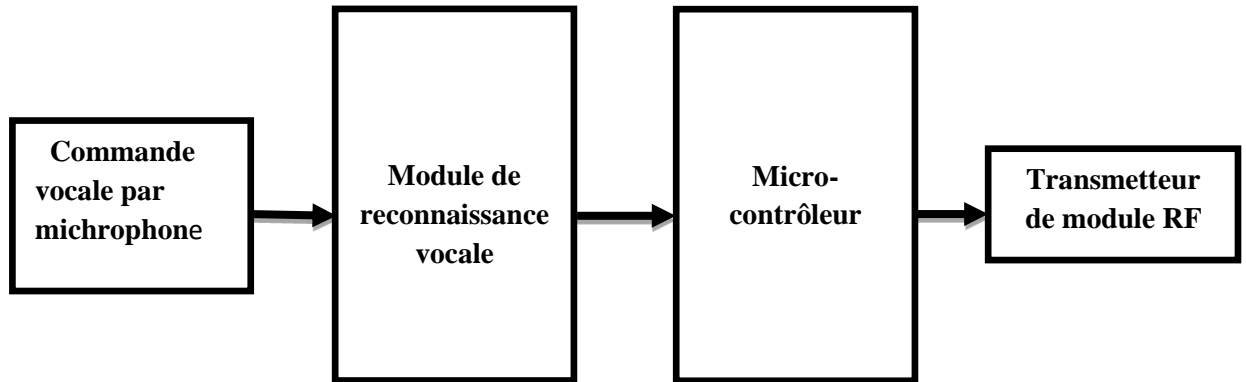


Figure I.14 : Schéma fonctionnel du module de transmission.

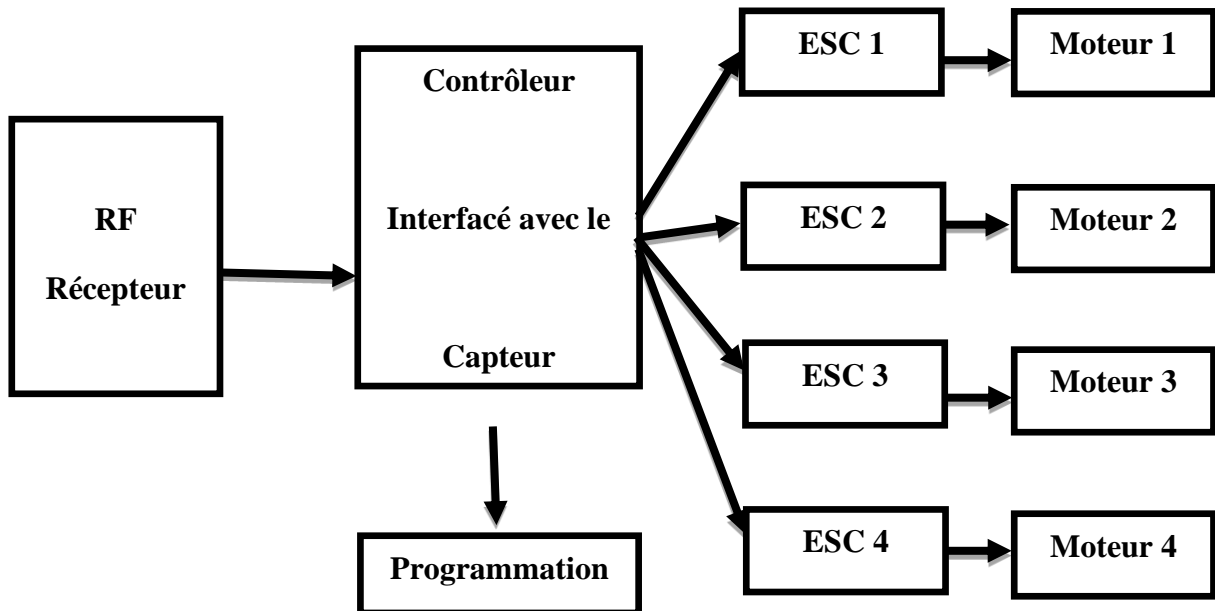


Figure I.15 : Schéma fonctionnel du module de réception

3. Le SVM (Support Vector Machines) est une partie de la structure du système de reconnaissance vocale [26] étudiée dans cet article est représentée sur la (Figure

I.16). Dans cette étude, cinq caractéristiques consistant en la fréquence fondamentale (FO), l'énergie, Taux de passage à zéro (ZCR) et fréquence Mel Cepstral Les coefficients (MFCC) sont extraits. Ensuite, fonctionnalité la normalisation est calculée pour chaque fenêtre d'un nombre de cadres par méthode statistique. La fusion de fonctionnalités consiste à combinez différentes fonctionnalités pour créer différents modèles de formation. Enfin, Support Vector Machines (SVM) [27] est utilisé comme classificateur de reconnaissance.

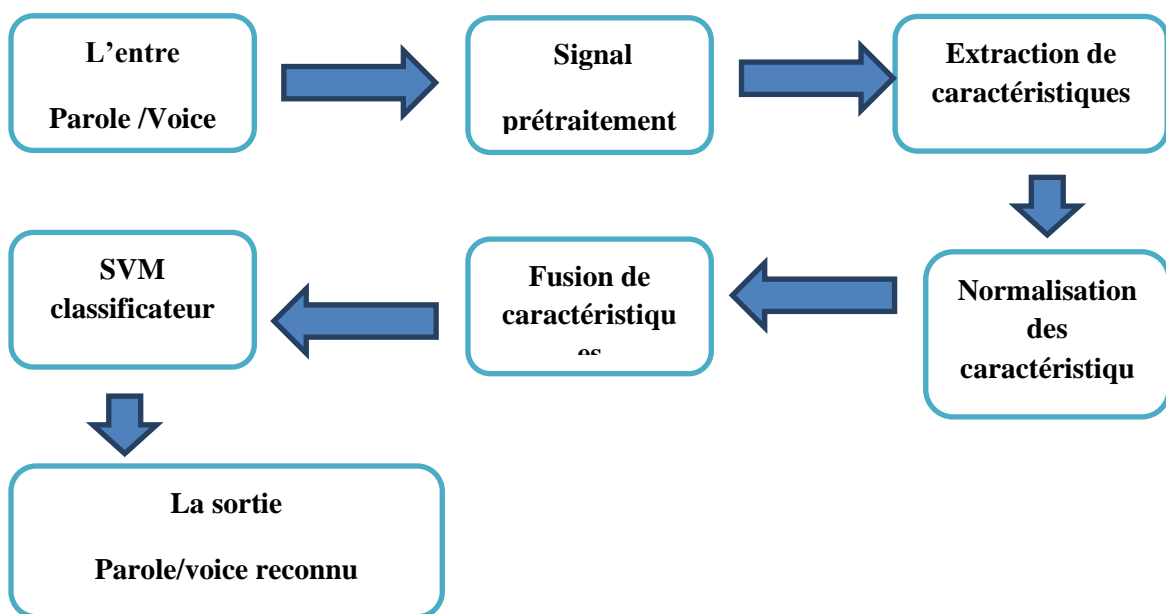


Figure I.16 : Support vector machines

4. Les réseaux de neurones convolutifs sont des réseaux de neurones utilisés principalement pour classer les images (c'est-à-dire nommer ce qu'elles voient), regrouper les images par similitude (recherche de photos) et effectuer la reconnaissance d'objets dans les scènes. Par exemple, les réseaux de neurones convolutifs (ConvNets ou CNN) sont utilisés pour identifier les visages, les individus, les plaques de rue, les tumeurs et de nombreux autres aspects des données visuelles. Les CNN ne sont cependant pas limités à la reconnaissance d'image. Ils ont été appliqués directement à l'analyse de texte. Et ils s'appliquent au son lorsqu'il est représenté visuellement sous la forme d'un

spectrogramme et des données graphiques avec des réseaux convolutifs graphiques [28].

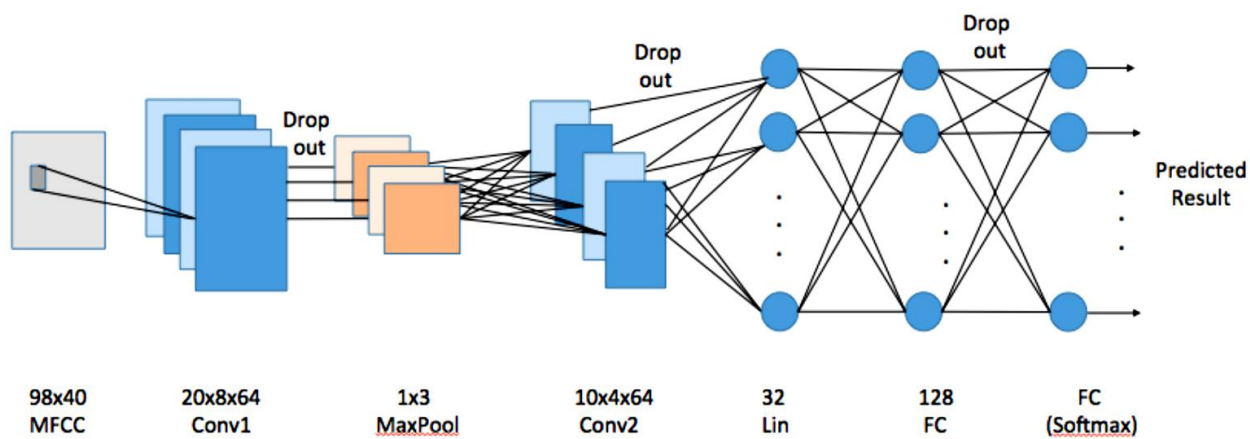


Figure I.17 : structure de l'architecture de réseau convolutionnel

## **CHAPITRE II**

# **MODELE DYNAMIQUE DU QUADRIROTOR**

## II.1 INTRODUCTION

La modélisation regroupe un ensemble des techniques permettant de disposer d'une représentation mathématique du système à étudier. Elle requiert une connaissance précise des phénomènes intervenant dans le système et une aptitude à les représenter par des équations mathématiques.

Le quadrirotor est classé dans la catégorie des systèmes volants les plus complexes vu le nombre des phénomènes physiques qui affectent sa dynamique. Afin de concevoir un contrôleur de vol, on doit d'abord comprendre profondément les mouvements du système et sa dynamique. Cette compréhension est nécessaire pas simplement pour la conception du contrôleur, mais afin de s'assurer que les simulations de l'engin dépendront un comportement aussi proche que possible de la réalité quand la commande est appliquée.

Dans ce chapitre nous allons définir le principe de fonctionnement d'un drone quadrirotor et décrire ses différents mouvements, pour pouvoir établir son modèle dynamique.

## II.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les quatre moteurs d'un quad-copter sont généralement placés aux extrémités du châssis, et l'électronique de contrôle est habituellement placée au centre.

Pour éviter au véhicule de tourner autour de son axe  $z$  (lacet), il est nécessaire que deux hélices tournent dans un sens, et les deux autres dans le sens contraire. Pour pouvoir diriger l'engin, il faut que chaque couple d'hélices tourne dans le même sens, soit placé aux extrémités opposées d'une branche du châssis.

Le fonctionnement d'un quadrotor est assez particulier. En variant astucieusement la puissance des moteurs, nous sommes capable de le faire monter/descendre, de l'incliner à gauche/ droite (roulis) ou en avant/arrière (tangage) ou de le faire pivoter sur son axe vertical (lacet), le quad-copter à 6 degrés de liberté [29], trois mouvements de rotation et trois mouvements de translation, ces six DDL sont commandés partir de quatre consignes seulement, donc c'est un système sous actionné (le nombre des entrées inférieure au nombre des sorties).



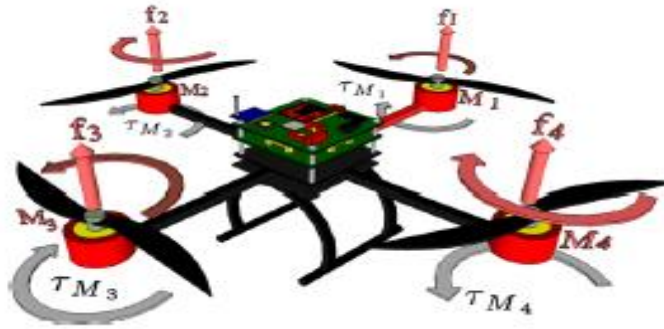


Figure II.1 : Configuration d'un drone quad copter

### II.3 LES MOUVEMENTS DU QUADRIROTOR

La variation de vitesse de chaque rotor va produire une poussée, et par conséquent réaliser un mouvement. Le quad-copter s'incline vers la direction du rotor plus lent, et effectue alors une translation le long de cet axe. Par conséquent, c'est l'inclinaison qui permet au quadcopter de réaliser une translation, ce qui signifie qu'un changement de la vitesse d'un rotor se traduit dans un mouvement en au moins trois DDL. Par exemple, l'augmentation de la vitesse du moteur avant aura comme conséquence un mouvement de tangage. Nous pouvons donc commander les six DDL de quad-copter avec les quatre mouvements principaux.

#### II.3.1 Mouvement de roulis

Ce mouvement est réalisé par le changement des vitesses des propulseurs droit et gauche ce qui applique un couple autour de l'axe x. Ce mouvement est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe y.

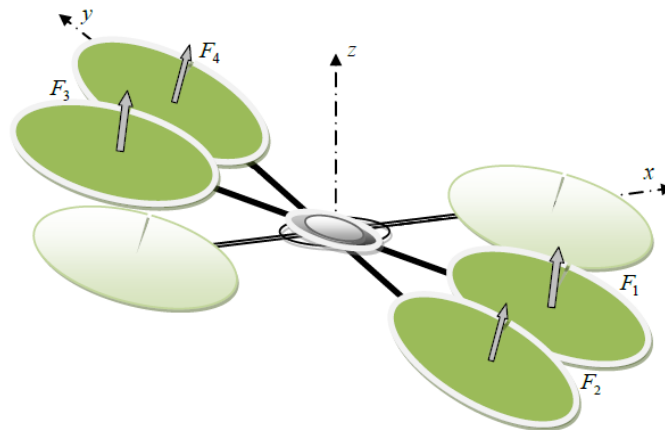


Figure II.2 : Mouvement de roulis

### II.3.2 Mouvement de tangage

Ce mouvement est réalisé par le changement des vitesses des propulseurs avant et arrière ce qui applique un couple autour de l'axe  $y$ . Ce mouvement est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe  $x$ .

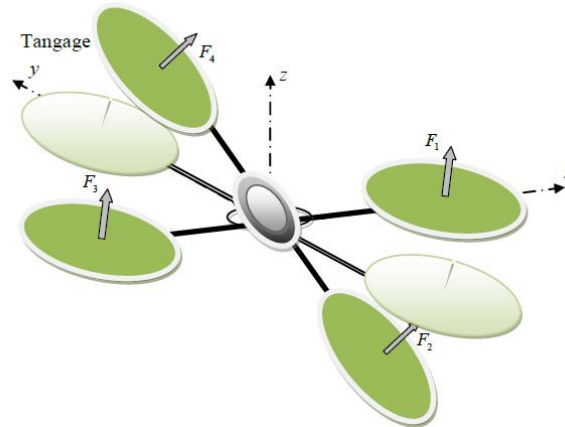


Figure II.3 : Mouvement de tangage

### II.3.3 Mouvement de lacet

Le mouvement de lacet est obtenu par le changement des vitesses des moteurs avant-arrières et les moteurs gauche-droit deux par deux. Il conduit à un couple autour de l'axe  $z$  qui fait tourner le quad-copter. Ainsi, lorsque le couple globales déséquilibré, le quad-copter tourne sur lui-même autour de  $z$ . Cette commande conduit seulement à une accélération de l'angle de lacet.

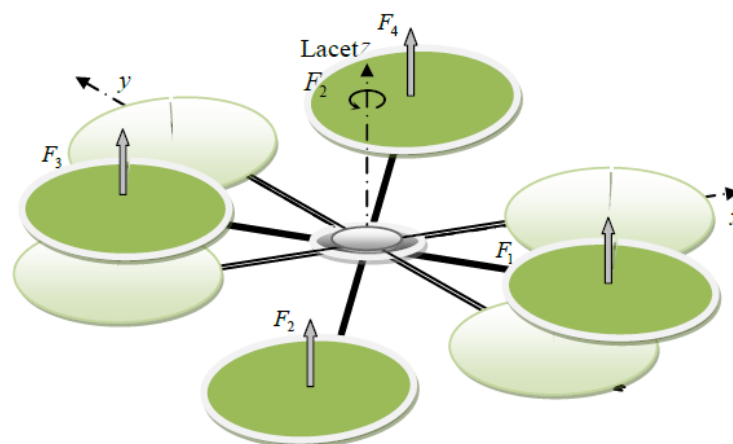


Figure II.4 : Mouvement de lacet.

### II.3.4 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. Par conséquent, la poussée produite par chaque rotor doit être identique.

Les mouvements ascendant et descendant sont obtenus 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 quad-copter le mouvement est ascendant, et si la force de portance est inférieure au poids du quad-copter le mouvement est descendant. [30]

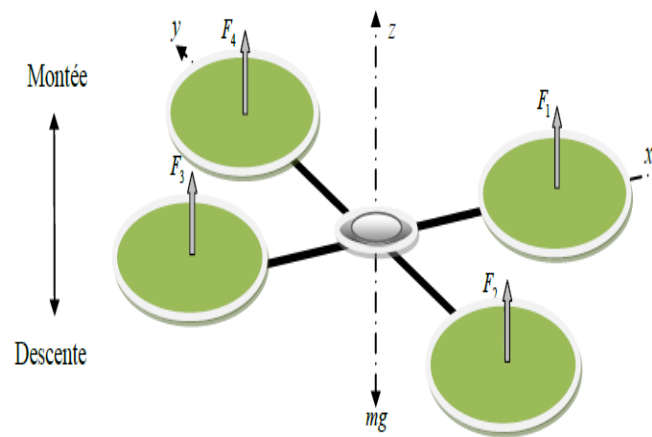


Figure II.5 : Illustration du mouvement vertical

### II.3.5. Mouvements de translation

Elle est divisé en deux :

- ❖ **Les translations verticales** : Elles sont définies lorsque le quadricoptère se déplace suivant l'axe  $z$ . En l'absence de perturbations, la force de poussée est toujours verticale et en montée elle est toujours supérieure au poids de le quadricoptère.
- ❖ **Les translations horizontales** : Elles sont définies de façon similaire aux translations verticales mais cette fois-ci dans le plan  $x-y$ . Lorsqu'une translation est effectuée suivant la direction  $x$  et la force de poussée maintient le système à une hauteur constante par rapport au sol. Le système effectue un vol connu dans la littérature sous le nom de "vol en palier".

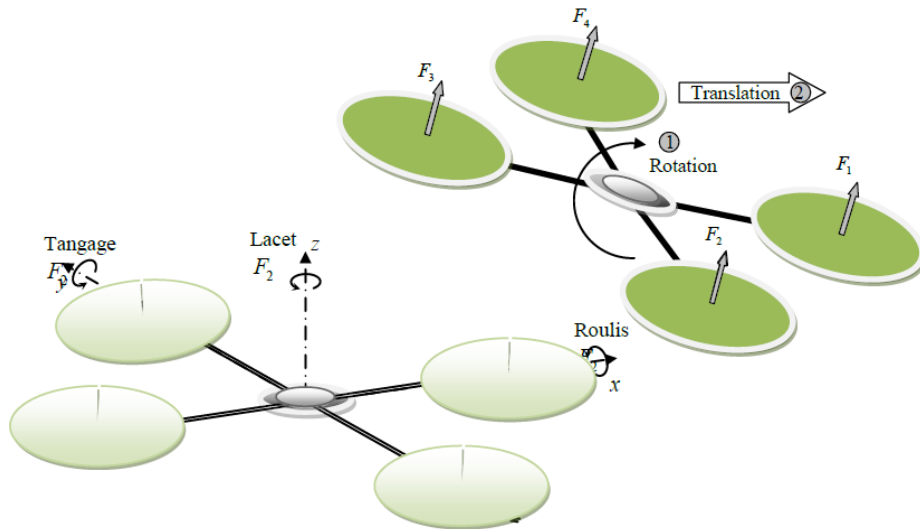


Figure II.6 : Mouvement de translation

## II.4 MODELE DYNAMIQUE

La modélisation des quadrotor est très difficile puisque la dynamique du système est fortement non linéaire et couplée. Afin de pouvoir comprendre au mieux le modèle dynamique développé ci-dessous, nous considérons 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.
- ❖ Les forces de portance et de traînée sont proportionnelles aux carrés de la vitesse de rotation des rotors, ce qui est une approximation très proche du comportement aérodynamique [31].

### II.4.1. Repères utilisés

Un quadrotor nécessite deux trièdres pour le repérer dans l'espace, ces repères sont :

1. **Le repère terrestre** : Il est noté :  $R_0 (O_0, X_0, Y_0, Z_0)$  . C'est un repère lié à la terre immobile.
2. **Le repère lié au corps du quadrotor**: Le repère lié au corps du quadrotor. Il est noté :  $R_1(O_1, X_1, Y_1, Z_1)$ . C'est un repère dont l'origine  $O_1$  coïncide avec le centre de gravité  $G$  du quadrotor.

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.

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

- ❖ **angle de roulis  $\phi$**  : rotation autour de  $X1$  ( $-\Pi < \phi < \Pi$ ).
- ❖ **angle de tangage  $\theta$**  : rotation autour de  $Y1$  ( $-2\Pi < \theta < 2\Pi$ ).
- ❖ **angle de lacet  $\psi$**  : rotation autour de  $Z1$  ( $-\Pi < \psi < \Pi$ ).
- ❖  $x$  : coordonnée du centre de gravité  $G$  du quadrirotor suivant  $X_0$ .
- ❖  $y$  : coordonnée du centre de gravité  $G$  du quadrirotor suivant  $Y_0$ .
- ❖  $z$  : coordonnée du centre de gravité  $G$  du quadrirotor suivant  $Z_0$ .
- ❖  $\Omega : [p, q, r]^T \in \mathbb{R}_0$  : la vitesse de rotation du quadrirotor par rapport repère inertiel.
- ❖  $V : [u, v, w]^T \in \mathbb{R}_0$  : la vitesse linéaire liée du quadrirotor par rapport repère inertiel [32].

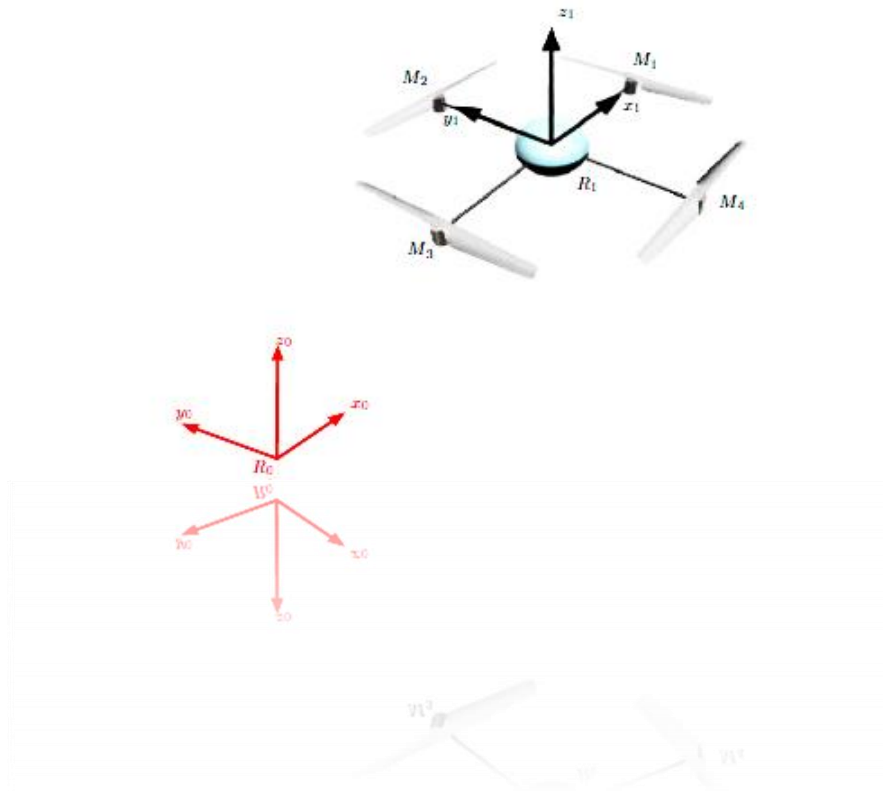


Figure II.7 : repérage du quadrirotor

### II.4.2 Matrice de rotation

Pour décrire la position et l'orientation du quad-copter, nous avons besoin de deux repères présidents.

Au début le repère mobile coïncide avec le repère fixe, après le repère mobile fait un mouvement de rotation autour de l'axe x d'un angle de roulis ( $-\pi/2 < \Phi < \pi/2$ ), suivi d'une rotation autour de l'axe y d'un angle de tangage ( $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ ), suivi d'une rotation autour de l'axe z d'angle de lacet ( $-\pi/2 < \psi < \pi/2$ ).

Donc on a la formule de la matrice de rotation R [33] :

$$\mathbf{R} = \text{Rot}_z(\psi) \times \text{Rot}_y(\theta) \times \text{Rot}_x(\Phi) = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\Phi & -s\Phi \\ 0 & s\Phi & c\Phi \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\theta & s\psi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta & c\psi s\theta \\ -s\theta & s\theta & c\theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Avec : c : cos , s : sin.

### II.4.3 Vitesses de rotation

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

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \text{Rot}_x(\Phi)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + (\text{Rot}_y(\theta) \text{Rot}_x(\Phi))^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

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

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} c\Phi \\ -\dot{\theta} s\Phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\psi} s\theta \\ \dot{\psi} c\theta \\ \dot{\psi} c\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Phi} - \dot{\psi} s\theta \\ \dot{\theta} c\Phi + \dot{\psi} s\theta \\ \dot{\psi} c\theta - \dot{\theta} s\Phi \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & s\phi c\theta \\ 0 & -s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s\phi \tan\theta & c\phi \tan\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Lorsque le quadri rotors

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

$$c\phi = c\theta = c\psi = 1, s\phi = s\theta = s\psi = 0.$$

Nous obtenons donc :

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [\Omega_x \quad \Omega_y \quad \Omega_z]^T \quad (\text{II.7})$$

#### II.4.4 Vitesses de translation

Les vitesses linéaires dans le repère fixe  $V_x^b, V_y^b, V_z^b$  sont exprimées en fonction des vitesses linéaires dans le repère mobile  $V_x^m, V_y^m, V_z^m$  par :

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix} = \mathbf{R} \times \begin{bmatrix} v_x^m \\ v_y^m \\ v_z^m \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

#### II.4.5. Effets physiques agissants sur le quadrirotor

Une fois le drone est en mouvement, sa dynamique est soumise à certaines forces et moments.

##### II.4.5.1 Les forces

Les forces agissant sur le système sont :

- ❖ **La force de pesanteur** : qui est donnée par  $P = m \times g$ , où :  $m$  est la masse totale de quadrirotor et  $g$  la gravité.
- ❖ **Les forces de poussée** : ces forces sont provoquées par la rotation des moteurs elles sont perpendiculaires sur le plan des hélices, et proportionnelles au carré de la vitesse de rotation des moteurs :

$$F_i = b\omega_i^2 \quad (\text{II.9})$$

Avec :  $i$  le nombre des moteurs ( $i=1..,4$ ) et  $b$  le coefficient de portance qui dépend de la forme et le nombre des pales et la densité de l'air.

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

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

$$T_h = d\omega^2 \quad (\text{II.10})$$

Avec  $d$  est le coefficient de drag il dépend de la fabrication de l'hélice.

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

$$F_t = K_{ft} V \quad (\text{II.11})$$

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

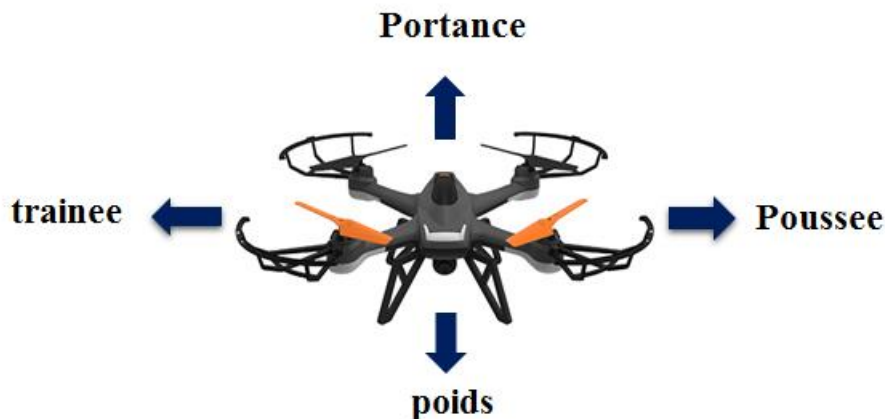


Figure II.8 : Forces exercées sur un drone

#### II.4.5.2 Les moments

Il y a plusieurs moments agissant sur un quad-coptère, qui sont dus aux forces de poussée et de traînée et aux effets gyroscopiques.

##### a. Moments dus aux forces de poussée :

- La rotation autour de l'axe  $x$  : due au moment créé par la différence entre les forces de portance des rotors droit et gauche, ce moment est donné par la relation suivante :



$$M_x = l(F_4 - F_2) = lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (\text{II.12})$$

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

- La rotation autour de l'axe  $y$  : due au moment créé par la différence entre les forces de portance des rotors avant et arrière, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_y = l(F_3 - F_1) = lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \quad (\text{II.13})$$

#### b. Moments dus aux forces de traînée :

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

$$M_z = d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (\text{II.14})$$

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

$$M_a = K_{fa}\Omega^2 \quad (\text{II.15})$$

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

#### II.4.5.3 Les effets gyroscopiques

Tout objet en rotation autour d'un axe est soumis à l'effet gyroscopique. C'est la capacité qu'a cet objet à conserver son axe de rotation ou, de façon plus précise, à conserver son moment angulaire.

Dans notre cas il y a deux moments gyroscopiques, le premier est le moment gyroscopique des hélices, l'autre est le moment gyroscopique dû aux mouvements du quadrirotor.

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

$$M_{gh} = \sum_{i=1}^4 \Omega \wedge Jr \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (-1)^{i+1} \omega_i \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec  $Jr$  est l'inertie des rotors.

**Moment gyroscopique dû aux mouvements de quadrirotor** : il est donné par la relation suivante :

$$M_{mg} = \Omega \wedge J\Omega \quad (\text{II.17})$$

Avec  $J$  est l'inertie du système.

#### II.4.6. Modélisation avec le formalisme d'Euler-Lagrange

##### II.4.6.1. Modélisation dynamique de bouabdellah et al. [34]

###### ➤ Cinématique

Si le solide subit trois rotations successives selon les angles aéronautiques, on peut alors exprimer tout point  $(x, y, z)$  du solide dans le repère inertiel par :

$$r_{xyz}(x, y, z) = R(\phi, \theta, \psi)(x \ y \ z)^t \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Alors : } \begin{cases} r_x = [c\psi c\theta]x + [c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi]y + [c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi]z \\ r_y = [s\psi c\theta]x + [s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi]y + [s\psi s\theta c\phi - s\phi c\psi]z \\ r_z = -s\psi x + [c\theta s\phi]y + [c\phi c\theta]z \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Les vitesses correspondantes sont obtenues par différentiation de (II.19), et le carré de la magnitude de la vitesse pour tout point est donnée par :

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 \quad (\text{II.20})$$

###### ➤ Énergies

- ✓ **Énergie cinétique** : A partir de l'équation (II.20) et en supposant que la matrice d'inertie est diagonale, on peut extraire l'expression d'énergie cinétique :

$$T = \frac{1}{2}J_x(\dot{\phi} - \dot{\psi}s\theta)^2 + \frac{1}{2}J_y(\dot{\theta}c\phi + \dot{\psi}s\phi c\theta)^2 + \frac{1}{2}J_z(\dot{\theta}s\phi - \dot{\psi}c\phi c\theta)^2 \quad (\text{II.21})$$

- ✓ **Énergie potentielle** : En utilisant la formule de l'énergie potentielle bien connue, on trouve :

$$U = \int x dm(x)(-gs\theta) + \int y dm(y)(gs\phi c\theta) + \int z dm(z)(gc\phi c\theta) \quad (\text{II.22})$$

###### ➤ Équations de mouvement :

En utilisant le modèle Lagrangien et la formule dérivée pour les équations du mouvement :

$$L = T - U_i \quad \Gamma_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (\text{II.23})$$

Ou  $q_i$ : les coordonnées généralisées.

$\Gamma_i$ : les forces généralisées.

Les trois équations du mouvement sont alors :

$$\begin{cases} J_x \ddot{\Phi} = \dot{\theta} \dot{\Psi} (J_y - J_z) \\ J_y \ddot{\theta} = \dot{\Phi} \dot{\Psi} (J_z - J_x) \\ J_z \ddot{\Psi} = \dot{\Phi} \dot{\theta} (J_x - J_y) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

D'autre part, les couples non conservatifs agissant sur le quadrirotor résultent tout d'abord de l'action de la différence de poussée de chaque paire :

$$\begin{cases} \tau_x = db(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ \tau_y = db(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ \tau_z = k(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Deuxièmement, à partir de l'effet gyroscopique résultant de la rotation des hélices

$$\begin{cases} \tau'_x = J_{rz} \omega_y (\omega_1 + \omega_3 - \omega_2 - \omega_4) \\ \tau'_y = J_{rz} \omega_x (\omega_2 + \omega_4 - \omega_1 + \omega_3) \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

#### ➤ **Modèle dérivé dynamique :**

Le modèle dynamique du quadrirotor décrivant les rotations roulis, tangage et lacet contient alors trois termes qui sont : l'effet gyroscopique résultant de la rotation du corps rigide, l'effet gyroscopique résultant de la rotation de l'hélice couplé avec la rotation du corps et enfin les moments générés par les actionneurs :

$$\begin{cases} J_x \ddot{\Phi} = \dot{\theta} \dot{\Psi} (J_y - J_z) - J \dot{\theta} \Omega_\tau + \tau_x \\ J_y \ddot{\theta} = \dot{\Phi} \dot{\Psi} (J_z - J_x) - J \dot{\Phi} \Omega_\tau + \tau_y \\ J_z \ddot{\Psi} = \dot{\Phi} \dot{\theta} (J_x - J_y) + \tau_z \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Avec :  $\Omega_\tau = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4$

#### II.4.6.2. Modélisation dynamique de lozano et al.

Nous présentons dans cette section le travail de lozano et *al.* [35] qui utilise l'approche d'Euler-Lagrange pour modéliser le quadrirotor. Dans ce travail, l'objectif est de trouver Lagrangien ( $L$ ). L'énergie cinétique est composée de deux termes. Le premier terme est l'énergie cinétique de translation et le deuxième terme est l'énergie cinétique de rotation.

Les coordonnées généralisées de l'hélicoptère sont décrites par :

$$q = (x, y, z, \psi, \theta, \phi) \in \mathbb{R}^6 \quad (\text{II.28})$$

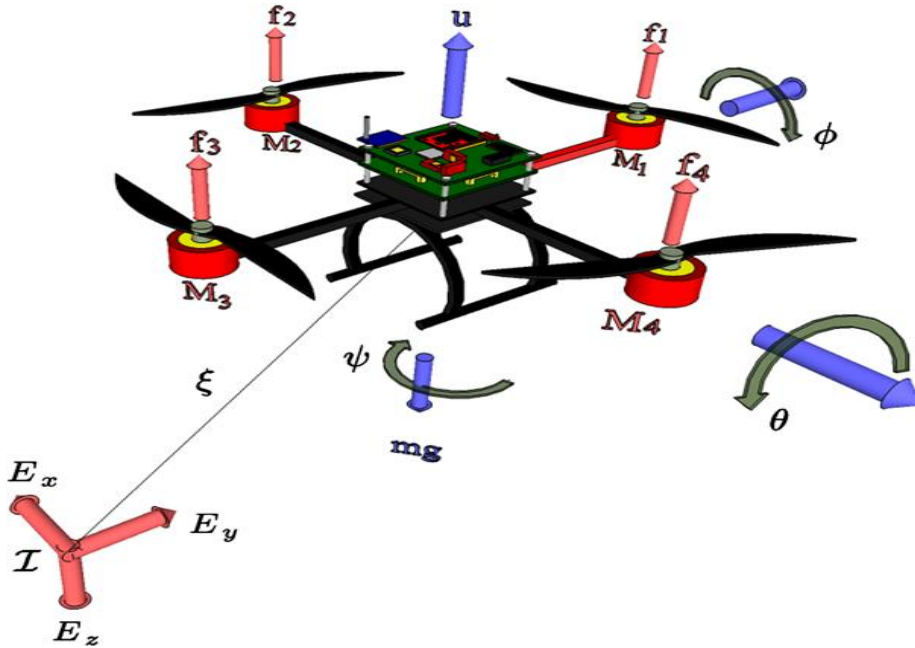


Figure II.9 : le quad-rotor dans un référentiel inertiel

Où  $\xi = (x, y, z)$  représentent la position du centre de masse de l'hélicoptère par rapport à un repère fixe I.

$\eta = (\psi, \theta, \phi)$  sont les trois angles d'Euler (lacet, tangage, roulis) et représentent l'orientation de l'hélicoptère. Le Lagrangien est :

$$L(q, \dot{q}) = T_{\text{trans}} - T_{\text{rot}} - U \quad (\text{II.29})$$

L'énergie cinétique de translation de l'hélicoptère est donnée par :

$$T_{\text{trans}} = \frac{m}{2} \dot{\xi}^T \dot{\xi} \quad (\text{II.30})$$

L'énergie cinétique de rotation est donnée par :

$$T_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \dot{\eta}^T \mathbb{J} \dot{\eta} \quad (\text{II.31})$$

Où  $\mathbb{J}$  représente la matrice d'inertie. L'énergie potentielle est donnée par :  $U = mgz$

Où  $z$  est la position verticale,  $m$  représente la masse de l'hélicoptère. Le Lagrangien  $L$  est :

$$L(q, \dot{q}) = \frac{m}{2} \dot{\xi}^T \dot{\xi} + \frac{1}{2} \dot{\eta}^T \mathbb{J} \dot{\eta} - mgz \quad (\text{II.32})$$

Le modèle dynamique de l'hélicoptère est obtenu des équations d'Euler-Lagrange avec la force généralisée externe.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \begin{bmatrix} F_{\xi} \\ \tau \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Où  $F_{\xi} = R\hat{F} \in R^3$  est la force de translation appliquée au quadri-rotor due aux entrées de commande,  $\tau \in R^3$  sont les moments généralisés et  $R$  est la matrice de transformation représentant l'orientation du quadri-rotor.

Nous écrivons ainsi :

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

où  $u = \sum_{i=1}^4 f_i$  est la poussée ou entrée collective.  $f_i = k\omega_i^2$  est la force produite par le moteur  $i$ ,  $k > 0$  est une constante et  $\omega_i$  est la vitesse angulaire du moteur  $i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ .

Les moments généralisés sur les variables de  $\eta$  sont :

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{\psi} \\ \tau_{\theta} \\ \tau_{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 \tau M_i \\ (f_2 - f_4)l \\ (f_3 - f_1)l \end{bmatrix}$$

Où  $l$  est la distance entre les moteurs et le centre de gravité et  $\tau M_i$  est le couple produit par le moteur  $M_i$ .

Nous obtenons donc :

$$m\ddot{\xi} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix} = F_{\xi} = R\hat{F} \quad (\text{II.35})$$

$$\mathbb{J}\ddot{\eta} + C(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta} = \tau \quad (\text{II.36})$$

Où :  $C(\eta, \dot{\eta}) = \mathbb{J} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\dot{\eta}^T \mathbb{J})$  est la matrice de Coriolis et contient les paramètres gyroscopiques et centrifuges.

Finalement nous obtenons :

$$m\ddot{x} = u(\sin\phi\sin\psi + \cos\phi\cos\psi\sin\theta) \quad (\text{II.37})$$

$$m\ddot{y} = u(\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \cos\psi\sin\phi) \quad (\text{II.38})$$

$$m\ddot{z} = u(\cos\theta\cos\phi - mg) \quad (\text{II.39})$$

$$\ddot{\psi} = \tilde{\tau}_\psi \quad (\text{II.40})$$

$$\ddot{\theta} = \tilde{\tau}_\theta \quad (\text{II.41})$$

$$\ddot{\phi} = \tilde{\tau}_\phi \quad (\text{II.42})$$

Où  $x$  et  $y$  sont les coordonnées dans le plan horizontal,  $z$  est la position verticale, et  $\tilde{\tau}_\psi$ ,  $\tilde{\tau}_\theta$  et  $\tilde{\tau}_\phi$  sont les nouveaux moments angulaires (moment de lacet, moment tangage et moment deroulis), ce qui sont liés aux couples généralisés  $\tau_\psi$ ,  $\tau_\theta$  et  $\tau_\phi$  par :

$$\tilde{\tau} = \begin{bmatrix} \tilde{\tau}_\psi \\ \tilde{\tau}_\theta \\ \tilde{\tau}_\phi \end{bmatrix} = \mathbb{J}^{-1}(\tau - C(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta})$$

Il faut remarquer que chacune des entrées du contrôle peut être utilisée pour contrôler un ou deux degrés de liberté comme suit. L'entrée collective  $u$  est essentiellement employée pour donner à l'altitude une valeur désirée. L'entrée  $\tilde{\tau}_\psi$  est employée pour commander le déplacement de lacet.  $\tilde{\tau}_\theta$  est employé pour commander le mouvement de tangage et le mouvement horizontal dans l'axe  $x$ . De même  $\tilde{\tau}_\phi$  est employé pour commander l'angle de roulis et le déplacement horizontal dans l'axe  $y$ .

#### II.4.7 Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler

Nous avons négligé la force de traînée selon les axes et le moment dû aux frottements aérodynamiques pour développer le modèle dynamique.

En utilisant la formulation de Newton-Euler, les équations sont écrites sous la forme suivante [36] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi} = V \\ m\ddot{\xi} = F_f + F_g \\ \dot{R} = RS(\Omega) \\ J\dot{\Omega} = -\Omega \wedge J\Omega + M_f - M_{gh} - Ma \end{array} \right. \quad (\text{II.43})$$

Avec :

$\xi$  : est le vecteur de position du quadrirotor.

$m$  : la masse totale du quadrirotor.

$\Omega$  : la vitesse angulaire exprimée dans le repère fixe.

$R$  : la matrice de rotation.

$\wedge$ : le produit vectoriel.

$J$  : la matrice d'inertie symétrique de dimension (3x3), elle est donnée par :

$$J = \begin{bmatrix} J_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz} \end{bmatrix}$$

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

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

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

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

$$F_i = b\omega^2$$

$F_g$  : est la force de pesanteur :

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

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

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

II.4.7.1. Dynamique de translation

$$\text{On a : } m\ddot{\xi} = F_f + F_g \quad (\text{II.44})$$

En remplaçant chaque force par son expression on obtient :

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ c\phi c\theta \end{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

Les équations dynamiques de mouvement de translation sont comme suit :

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} (c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi) U_1 \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} (c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi) U_1 \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} (c\phi c\theta) U_1 - g \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Avec :  $U_1 = b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2)$

II.4.7.2 Dynamique de rotation

$$\text{On a : } J\dot{\Omega} = -M_{gm} - M_{gh} - Ma + M_f \quad (\text{II.47})$$

En remplaçant chaque force par son expression on obtient :

$$\begin{bmatrix} J_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \wedge \left( \begin{bmatrix} J_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} J_r g(u) \dot{\theta} \\ J_r g(u) \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{fax} \phi^2 \\ K_{fay} \theta^2 \\ K_{faz} \psi^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

Les équations dynamiques de mouvement de rotation sont comme suit :



$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{J_{yy}-J_{zz}}{J_{xx}} \dot{\theta}\dot{\psi} - \frac{J_r g(u)}{J_{xx}} \dot{\theta} + \frac{U_2}{J_{xx}} \\ \ddot{\theta} = \frac{J_{zz}-J_{xx}}{J_{yy}} \dot{\phi}\dot{\psi} + \frac{J_r g(u)}{J_{yy}} \dot{\phi} + \frac{U_3}{J_{yy}} \\ \ddot{\psi} = \frac{J_{xx}-J_{yy}}{J_{zz}} \dot{\phi}\dot{\theta} + \frac{U_4}{J_{zz}} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

Avec :

$$g(u) = (\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4)$$

$$U_2 = lb(\omega_4^2 - \omega_2^2)$$

$$U_3 = lb(\omega_3^2 - \omega_1^2)$$

$$U_4 = d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2)$$

En conséquence, le modèle dynamique complet qui régit le quadrirotor est le suivant [37] :

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} (c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi)U_1 \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} (c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi)U_1 \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} (c\phi c\theta)U_1 - g \\ \ddot{\phi} = \frac{J_{yy}-J_{zz}}{J_{xx}} \dot{\theta}\dot{\psi} - \frac{J_r g(u)}{J_{xx}} \dot{\theta} + \frac{U_2}{J_{xx}} \\ \ddot{\theta} = \frac{J_{zz}-J_{xx}}{J_{yy}} \dot{\phi}\dot{\psi} + \frac{J_r g(u)}{J_{yy}} \dot{\phi} + \frac{U_3}{J_{yy}} \\ \ddot{\psi} = \frac{J_{xx}-J_{yy}}{J_{zz}} \dot{\phi}\dot{\theta} + \frac{U_4}{J_{zz}} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -lb & 0 & lb \\ -lb & 0 & lb & 0 \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

#### II.4.8 Représentation d'état du système

Notre espace d'état non linéaire  $\dot{x} = f(x, u)$  avec le vecteur d'état à 12 dimensions peut être représenté comme suite :  $x = (x_1, x_2, \dots, x_{12})^T = (\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}, x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z})^T$

Donc la représentation d'état est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \dot{x}_1 = x_2 \\
 \dot{x}_2 = \frac{J_{yy}-J_{zz}}{J_{xx}} x_4 x_6 - \frac{J_r g(u)}{J_{xx}} x_4 + \frac{U_2}{J_{xx}} \\
 \dot{x}_3 = x_4 \\
 \dot{x}_4 = \frac{J_{zz}-J_{xx}}{J_{yy}} x_2 x_6 + \frac{J_r g(u)}{J_{yy}} x_2 + \frac{U_3}{J_{yy}} \\
 \dot{x}_5 = x_6 \\
 \dot{x}_6 = \frac{J_{xx}-J_{yy}}{J_{zz}} x_2 x_4 + \frac{U_4}{J_{zz}} \\
 \dot{x}_7 = x_8 \\
 \dot{x}_8 = \frac{U_1}{m} (\cos(x_1) \sin(x_3) \cos(x_5) + \sin(x_1) \sin(x_5)) \\
 \dot{x}_9 = x_{10} \\
 \dot{x}_{10} = \frac{U_1}{m} (\cos(x_1) \sin(x_3) \sin(x_5) - \sin(x_1) \cos(x_5)) \\
 \dot{x}_{11} = x_{12} \\
 \dot{x}_{12} = \frac{U_1}{m} (\cos(x_1) \cos(x_3)) - g
 \end{array} \right. \quad (\text{II.52})$$

## II.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons décrit les mouvements de base du quadrirotor, puis nous avons donné deux modèles dynamiques les plus connus dans la littérature. Le modèle complet comprend presque tous les phénomènes physiques agissant sur le quadrirotor. Ce dernier modèle montre la nature couplée, complexe, non linéaire, multi-variable et le sous-actionnement de notre drone, ce qui rend la synthèse de la commande relativement difficile.

**CHAPITRE III**

**LA RECONNAISSANCE DE LA**

**PAROLE**

### III.1. INTRODUCTION

Depuis presque trente ans, la reconnaissance automatique de la parole est un domaine qui a captivé le public ainsi que de nombreux chercheurs. À ses balbutiements, les projections sur ses applications étaient très optimistes : quoi de plus naturel que de parler à une machine, sans avoir à s'encombrer d'un clavier ? Malheureusement, malgré l'incroyable évolution des ordinateurs et des connaissances, la reconnaissance automatique de la parole n'en demeure pas moins un sujet de recherche toujours actif...et les résultats obtenus sont encore loin de l'idéal qu'on aurait pu en attendre, il y a vingt ans.

Les systèmes de reconnaissance sont utilisés pour indexer de grandes bases de données audiovisuelles, pour rechercher des termes dans des flux audio ou encore comme interface de dialogue homme-machine. Dans la pratique, quand les conditions d'utilisation sont correctes, ces systèmes s'avèrent efficaces. Néanmoins, les principales limites des systèmes actuels sont relatives à leur robustesse : les conditions d'utilisation doivent être similaires à celles utilisées pour entraîner le système, l'environnement sonore peu bruité, les locuteurs ne peuvent pas parler simultanément. Souvent, l'utilisateur a dû s'adapter pour utiliser les logiciels.

La reconnaissance de la parole continue pour un vocabulaire moyen (quelques milliers de mots) sont actuellement possible dans un logiciel de reconnaissance de la parole. La reconnaissance de la parole humaine se situe à l'intersection de nombreux domaines tels que l'acoustique, l'électronique, la phonétique...Pour atteindre un haut niveau, un système de reconnaissance de la parole doit s'inspirer des travaux d'une vaste gamme de disciplines scientifiques : Mathématique, informatique et technologie.

Ce chapitre consiste à réaliser un Système de Reconnaissance Automatique de la Parole (SRAP) basé sur l'apprentissage approfondi (deep learning) qui est basé sur les réseaux de neurones convolutif (Convolution neural network).

### III.2. LE SIGNAL VOCAL

Le signal de parole est un phénomène de nature acoustique porteur d'un message. L'information d'un message parlé réside dans les fluctuations de la pression de l'air, engendrées, puis émises par l'appareil phonatoire. Ces fluctuations constituent le signal vocal. Elles sont détectées par l'oreille, laquelle procède à une certaine analyse. Les résultats sont transmis au cerveau qui les interprète [38]. Le signal de la parole est l'un des signaux les plus complexes, il n'est pas facile de le caractériser par un modèle simple. L'un des problèmes de la reconnaissance de la parole est la variabilité du signal. Les précurseurs dans le domaine du traitement de la

parole, pensaient que la parole était une simple juxtaposition d'éléments appelés "caractéristiques distinctives" ou invariants (phonèmes), et qu'à partir d'échantillons représentant les invariants d'une langue, on pouvait reconstituer ou reconnaître n'importe quelle phrase. Cette idée théorique n'est pas toujours vraie dans la reconnaissance de la parole continue à cause du problème de coarticulation. Pour surmonter ces difficultés, de nombreuses méthodes et modèles mathématiques originaux ou adaptés d'autres domaines ont été développés, parmi lesquelles on peut citer : la comparaison dynamique, les systèmes experts, les réseaux de neurones, les modèles stochastiques et en particulier les modèles de Markov cachés etc [39].

### III.2.1. Caractéristiques du signal de parole

La RAP est un problème difficile, essentiellement du fait des spécificités du matériau à interpréter : le signal vocal. Le signal acoustique de parole présente de caractéristiques qui rendent complexe son interprétation.

- Redondance : le signal acoustique transporte beaucoup plus d'informations que nécessaire, ce qui explique sa résistance aux bruits. Des techniques d'analyse ont été mises en œuvre pour extraire l'information pertinente sans trop la dégrader.
- Variabilité : le signal acoustique est éminemment variable d'un locuteur à l'autre (sexe, âge, etc.) mais aussi pour un locuteur donné (état émotif, fatigue, etc.), ce qui rend très ardu le problème de reconnaissance de la parole indépendamment du locuteur.
- Continuité : le signal acoustique est continu et les effets contextuels d'un son élémentaire sur ses voisines sont considérables [40].

### III.2.2. Numérisation

Le signal est une variation (dans le temps de préférence) d'une grandeur physique de nature quelconque porteuse d'information. L'opération de numérisation du signal audio se réalise en théorie en trois étapes (échantillonnage, quantification, codage) [41].

#### III.2.2.1. Echantillonnage

L'échantillonnage consiste à transformer une fonction  $s(t)$  à valeur continues en une fonction  $\hat{s}(t)$  discrète constituée par la suite des valeurs  $s(t)$  aux instants d'échantillonnage  $t=KT$  avec  $K$  un entier naturel. Le choix de la fréquence d'échantillonnage n'est pas aléatoire car une petite fréquence nous donne une présentation pauvre du signal. Par contre une très grande fréquence nous donne des mêmes valeurs, redondance, de certains échantillons voisins, donc il faut prélever suffisamment de valeurs pour ne pas perdre l'information contenue dans  $s(t)$ . Cette

problématique a été résolue par le théorème de Shannon « la fréquence d'échantillonnage assurant un non repliement du spectre doit être supérieure à 2 fois la fréquence haute du spectre du signal analogique » [42].

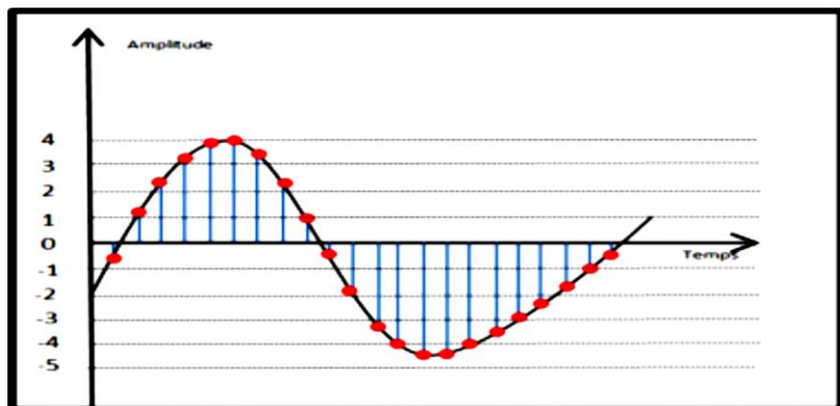


Figure III.1 : signal échantillonné

Pour la téléphonie, on estime que le signal garde une qualité suffisante lorsque son spectre est limitée à 3400 Hz et l'on choisit  $f_e = 8000$  Hz.

Pour les techniques d'analyse, de synthèse ou de reconnaissance de parole, la fréquence peut varier de 6000 à 16000 Hz. Puisque  $f_m = 5$  KHz alors  $f_e = 10$  KHz et donc il va falloir mesurer le signal tous le **1/10000seconde = 0,1**, [42].

### III.2.2.2. Quantification

Quantifier un signal consiste à placer les amplitudes des échantillons sur une échelle de valeurs à intervalles fixes. Chaque impulsion correspond donc à un nombre binaire unique. Une quantification à  $n$  bits permet d'utiliser  $2^n$  valeurs différentes. -Pour 8 bits, on a 256 valeurs et pour 16 bits, on a 65536 valeurs. La transformation d'une valeur physique (en volts) en une valeur binaire introduit donc une distorsion. De même lorsque l'impulsion dépasse la valeur maximale prévue [42].

### III.2.2.3. Le codage

C'est la représentation linéaire des valeurs quantifiés qui permet le traitement du signal sur machine [42].

## III.3. RECONNAISSANCE DE LA PAROLE

Bien que la reconnaissance vocale d'un seul mot diffère beaucoup de la reconnaissance vocale à grande échelle, plusieurs des idées sous-jacentes sont les mêmes. Les systèmes

dereconnaissance vocale traditionnels utilisent couramment des modèles de Markov cachés (HMM) ainsi que de nombreuses fonctionnalités d'ingénierie et modèles de mélanges gaussiens (GMM) pour les modèles acoustiques. Les premiers pas vers l'utilisation des réseaux de neurones en reconnaissance vocale utilisaient des réseaux de neurones pour la modélisation acoustique au lieu de GMM [43]. Celles-ci ont depuis été pour la plupart remplacées par des architectures neuronales formées de bout en bout telles que DeepSpeech.

### III.3.1. Quelques applications

On utilise la reconnaissance vocale dans différents domaines tels que:

- Une dictée vocale peut être associée à un traitement de Texte : Un locuteur parle et le texte s'affiche ; ainsi, il n'a plus besoin de taper son texte au clavier.
- Les serveurs d'informations par téléphone.
- La messagerie.
- Elle permet l'autonomie : par exemple en médecine, lorsqu'un chirurgien a les deux mains occupées, il peut parler pour demander une information technique au lieu de taper sur un clavier (autonomie qui est aussi valable en industrie).
- La sécurité possible grâce à la signature vocale
- La possibilité de commande et de contrôle d'appareils à distance.

### III.3.2. Les méthodes utilisées pour la reconnaissance vocale

On peut classer les méthodes de reconnaissance en deux classes :

- **La méthode globale** : Cette méthode considère le plus souvent le mot comme unité de reconnaissance minimale, c'est-à-dire indécomposable. Dans ce type de méthode, on compare globalement le message d'entrée (mot, phrase) aux différentes références stockées dans un dictionnaire en utilisant des algorithmes de programmation dynamique. Cette méthode a pour avantage d'éviter l'explicitation des connaissances relatives aux transitions qui apparaissent entre les phonèmes. Ce type de méthode est utilisé dans les systèmes de reconnaissance de mots isolés, reconnaissance de parole dictée avec pauses entre les mots et présente l'inconvénient de limiter la taille du dictionnaire. Dans cette catégorie on trouve principalement la méthode DTW (Dynamic Time Warping), et la méthode HMM (Hidden Markov Models) [44].
- **la méthode analytique** : Cette méthode fait intervenir un modèle phonétique du langage. Il y a plusieurs unités minimales pour la reconnaissance qui peuvent être choisies (syllabe, demi-syllabe, diphone, phonème, phone homogène, etc.). Le choix

parmi ces unités dépend des performances des méthodes de segmentation utilisées. La reconnaissance dans cette méthode, passe par la segmentation du signal de la parole en unités de décision puis par l'identification de ces unités en utilisant des méthodes de reconnaissance des formes (classification statistique, réseau de neurones, etc.) ou des méthodes d'intelligence artificielle (systèmes experts par exemple). Cette méthode est beaucoup mieux adaptée pour les systèmes à grand vocabulaire et pour la parole continue. Les problèmes qui peuvent apparaître dans ce type de système sont dus en particulier aux erreurs de segmentation et d'étiquetage phonétique. C'est pourquoi le DAP (Décodage Acoustico-Phonétique) est fondamental dans une telle approche [41].

### III.3.3. La programmation dynamique

Lorsqu'un locuteur, même entraîné, répète plusieurs fois une phrase ou un mot, il ne peut éviter les variations du rythme de prononciation ou de la vitesse d'élocution, ces variations entraînent des transformations non linéaires dans le temps du signal acoustique, ce qui fait qu'on ne pourra comparer directement point à point (matching) deux formes acoustiques sans correction temporelle au préalable. Pour établir une meilleure correspondance entre les axes temporels des deux mots, en même temps que leurs comparaisons, on utilise une technique appelée technique d'alignement temporel dynamique ou DTW. C'est une technique basée sur la programmation dynamique qui consiste à trouver la trajectoire optimale entre le mot de référence et le mot inconnu [45].

### III.3.4. Les modèles acoustiques

Un décodage acoustico-phonétique (DAP) est défini généralement comme la transformation de l'onde vocale, en unités phonétiques - une sorte de transcodage qui fait passer d'un code acoustique à un code phonétique - ou plus exactement comme la mise en correspondance du signal et d'unités phonétiques prédéfinies (opération de couplage / identification) dans lequel le niveau de représentation passe du continu au discret.

Les modèles acoustiques sont des modèles stochastiques qui sont utilisés conjointement à un modèle de langage afin de prendre des décisions quant-à la suite de mots contenue dans la phrase.

Le rôle du modèle acoustique est de calculer la probabilité qu'un événement linguistique (phonème, mot, ...) ait généré une séquence de vecteurs de paramètres extraits d'un signal de parole.



Quelques caractéristiques importantes des modèles acoustiques doivent être prises en compte. D'un point de vue utilisable, les modèles acoustiques doivent être robustes puisque les conditions acoustiques de la tâche de reconnaissance sont souvent différentes des conditions d'entraînement. En effet, le signal de parole possède de nombreuses variabilités qui ont pour conséquence d'augmenter la disparité entre la réalisation acoustique et le contenu linguistique. D'un point de vue pratique, les modèles acoustiques doivent être efficaces. Pour que leur utilisation soit acceptable, il est nécessaire qu'ils respectent certaines contraintes temporelles et donc proposer des temps de réponse relativement courts.

Les paramètres d'un modèle acoustique sont estimés à partir d'un corpus d'entraînement. Ce corpus d'entraînement est généralement transcrit manuellement. Cela permet d'identifier les segments de parole correspondant à chaque événement linguistique [46].

#### III.3.4.1. Modèle de Markov caché

Les modèles de Markov d'ordre 1 sont des automates probabilistes à états finis qui se basent sur l'hypothèse que "le futur ne dépend que de l'état présent". L'état du modèle au temps  $t$  ne dépend donc que de l'état du modèle au temps  $t - 1$  :

$$P(q_t | q_1, q_2, \dots, q_{t-1}) \approx P(q_t | q_{t-1})$$

Où:  $q_t$  est l'état du système au temps  $t$ .

À chaque étape temporelle, le modèle évolue suivant la fonction de transition et passe potentiellement dans un nouvel état ; l'évolution du système n'est connue qu'à travers des statistiques [47].

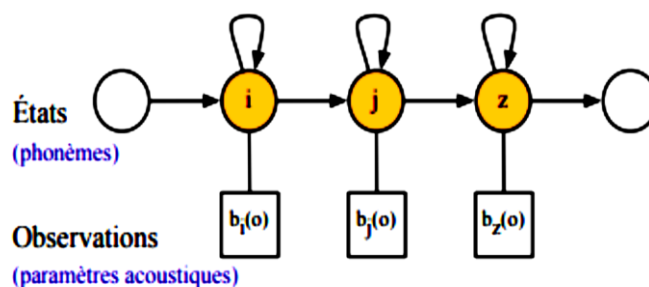


Figure III.2 : Modèle de Markov caché

### III.4. LES RESEAUX DE NEURONES ET LES RESEAUX PROFONDS

Un réseau de neurones est un objet mathématique comprenant plusieurs couches de neurones. Le réseau est généralement structuré en trois types de couches de neurones (entrée, sortie et cachée). Lorsque le réseau possède plusieurs couches cachées on parle d'un réseau de neurones profonds (deep neural network) et donc de mécanisme d'apprentissage profond (deeplearning) [48]

### III.4.1 Un réseau de neurones

Un réseau de neurones est un système composé d'un ensemble de neurones. On caractérise un réseau de neurones par :

- Son type (en couches, complets. . .) ;
- Son niveau de complexité (le nombre de neurones) ;
- La fonction d'activation, une fonction mathématique qui permet de transformer un signal entrant dans un neurone en signal de sortie ;
- Chaque connexion reliant deux neurones à un poids ( $w_1, w_2, w_3$ ) ;
- L'objectif visé : apprentissage supervisé ou non, optimisation, systèmes dynamiques.

Le but est de trouver les poids corrects des connexions.

Les neurones sont organisés en couche successive : une couche d'entrée qui représente les données, des couches cachées qui représentent des résultats d'analyse intermédiaires et une couche de sortie qui représente le résultat. Un simple réseau de neurones. Chaque neurone intermédiaire représente une somme pondérée des valeurs des neurones de la couche précédente [48] (figure III.6).

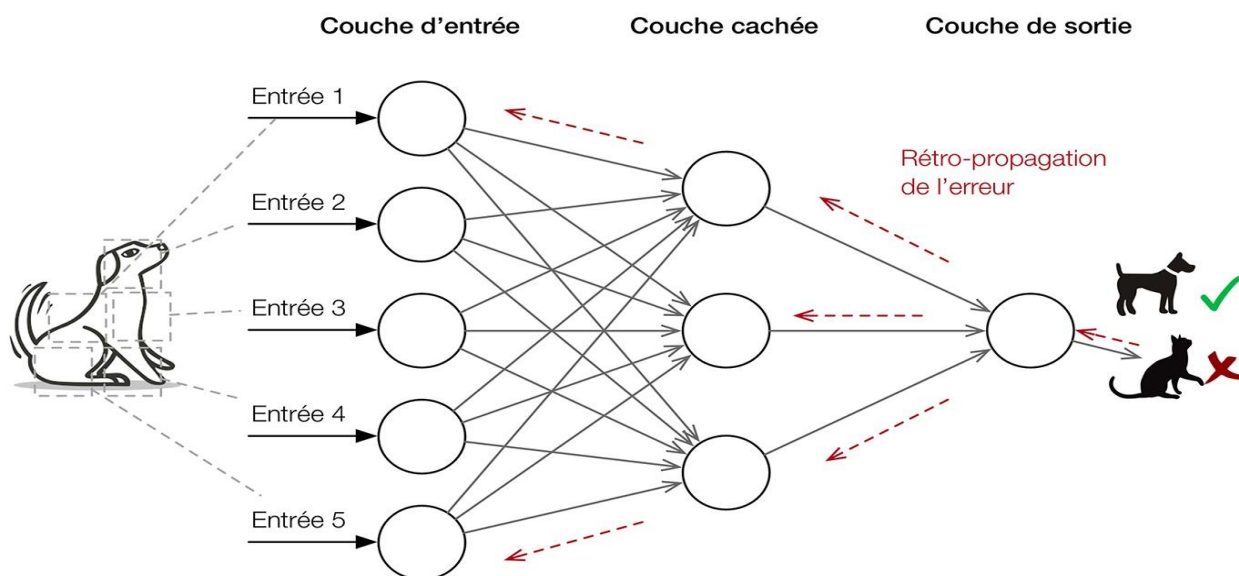


Figure III.3 : un réseau de neurones

### III.4.2. L'apprentissage en profondeur (Deep learning)

L'apprentissage en profondeur est un sous-ensemble de l'apprentissage automatique dans lequel les modèles, généralement des réseaux de neurones artificiels, utilisent plusieurs couches pour créer une représentation plus riche des données. Les algorithmes d'apprentissage automatique traditionnels tels que les machines vectorielles de support nécessitent des fonctionnalités faites à la main pour obtenir des résultats optimaux, tandis que les algorithmes

d'apprentissage en profondeur sont capables de créer leurs propres fonctionnalités à partir de données plus brutes, en fonction de ce qui est appris comme pertinent pendant la formation.

L'apprentissage en profondeur permet aux modèles de calcul composés de plusieurs couches de traitement d'apprendre des représentations de données avec plusieurs niveaux d'abstraction. Ces méthodes ont considérablement amélioré l'état de l'art en matière de reconnaissance vocale, de reconnaissance visuelle d'objets, de détection d'objets et de nombreux autres domaines tels que la découverte de médicaments et la génomique. L'apprentissage en profondeur découvre une structure complexe dans de grands ensembles de données en utilisant l'algorithme de rétro-propagation pour indiquer comment une machine doit modifier ses paramètres internes qui sont utilisés pour calculer la représentation dans chaque couche à partir de la représentation de la couche précédente [49].

#### III.4.3. Réseau de neurones à convolution (Convolution neural network)

Les CNN sont les variantes populaires de l'apprentissage en profondeur qui sont largement adoptées dans les systèmes ASR. CNN présentent de nombreuses avancées intéressantes, à savoir le partage de poids, les filtres convolutifs et la mise en commun. Par conséquent, les CNN ont réalisé des performances impressionnantes en ASR. Les CNN sont composés de plusieurs couches convolutives. La figure 5 montre le schéma de principe de CNN. LeCun et Bengio[50] décrivent les trois états de la couche convolutive, c'est-à-dire la convolution, la mise en commun et la non-linéarité. Les CNN profonds ont franchi une nouvelle étape en atteignant une performance approximative au niveau humain grâce à architectures avancées et formation optimisée. Les CNN utilisent une fonction non linéaire pour traiter les données de bas niveau. Les CNN sont capables d'apprendre des fonctionnalités de haut niveau avec une grande complexité et l'abstraction. La mutualisation est au cœur des CNNs qui réduit la dimensionnalité d'une carte des caractéristiques. Maxout est une non-linéarité largement utilisée et a montré son efficacité dans les tâches ASR [51].

La mise en commun est un concept important qui transforme la représentation des entités jointes en informations précieuses en conservant les informations utiles et en éliminant les informations insignifiantes. Les petits décalages de fréquence qui sont courants dans le signal vocal sont gérés efficacement à l'aide de la mise en commun. La mise en commun aide également à réduire la variance spectrale présente dans la parole d'entrée. Elle mappe l'entrée de  $p$  unités adjacentes à la sortie en appliquant une fonction spéciale. Après les non-linéarités élémentaires, les entités sont passées à travers la couche de regroupement. Cette couche s'exécute sous-échantillonnage sur

les cartes d'entités provenant de la couche précédente et produit le nouveades cartes avec une résolution condensée. Cette couche réduit considérablement la dimension spatiale d'entrée. Il sert les deux objectifs principaux. Le premier est que la quantité de paramètres ou le poids est réduit de 65%, diminuant ainsi le coût de calcul. Le second est qu'il contrôle lesur-ajustement. Ce terme fait référence au moment où un modèle est si adapté aux exemples de formation.

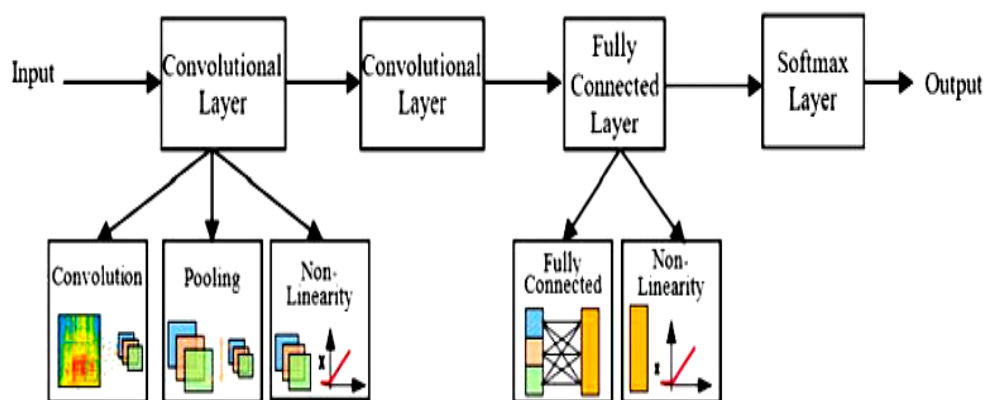


Figure III.4 : schéma fonctionnel du réseau neuronal convolutif

#### III.4.4. Fonctions d'activation

Les fonctions d'activation sont des non-linéarités utilisées entre les couches convolutées afin que le réseau de neurones puisse modéliser des données plus complexes que des données linéaires. Une fonction d'activation courante est l'unité linéaire rectifiée (ReLU), qui est une fonction qui prend l'entrée  $x$  et renvoie  $\max(0, x)$ . Le ReLU et ses variantes telles que PReLU ont principalement remplacé les anciennes fonctions d'activation sigmoïde et tanh. Cela est dû à une efficacité d'entraînement bien supérieure par rapport aux anciennes fonctions d'activation. [52].

#### III.4.5. Apprentissage des réseaux de neurones profonds (Training deep neural networks)

Les réseaux de neurones sont entraînés à l'aide de la rétro propagation et de la descente de gradient. La rétro propagation est utilisée pour calculer les gradients par rapport à chaque poids dans le réseau en fonction de l'erreur de la sortie. Dans les tâches de classification, l'erreur est généralement la perte d'entropie croisée entre la sortie du réseau et la cible. Les gradients sont utilisés pour donner une direction dans laquelle ajuster les poids afin que l'erreur soit minimisée. Le calcul des sorties et de l'erreur pour un lot d'entrées, le calcul du gradient moyen pour les exemples du lot et l'ajustement des poids en fonction du gradient s'appellent la descente de gradient stochastique (SGD). La descente de gradient stochastique est une approximation

stochastique de l'optimisation de la descente de gradient, où au lieu de prendre une seule étape d'apprentissage pour chaque itération complète de l'ensemble d'apprentissage, des étapes sont prises après chaque lot où le gradient moyen par lot agit comme une estimation pour le vrai dégradé [43].

La quantité de mise à jour des poids est définie par le gradient ainsi que par un taux d'apprentissage. Cette valeur joue un grand rôle dans la formation des réseaux de neurones, car un taux d'apprentissage trop élevé n'atteindra jamais un minimum approprié et un taux d'apprentissage trop faible peut rester bloqué est des minima sous-optimaux ou nécessiter des temps d'entraînement très longs car chaque étape d'entraînement seulement met à jour le poids par une petite marge. Pour contrer cela, il est courant d'utiliser une sorte de calendrier de taux d'apprentissage, par exemple en diminuant le taux d'apprentissage après un certain nombre de mises à jour, ou lorsque la perte d'un ensemble de validation suspendu a cessé de diminuer (Smith 2015). Une autre option consiste à utiliser des optimiseurs comme Adam [53] qui utilise des taux d'apprentissage adaptatifs.

#### III.4.6. Le son comme données

L'ensemble de données se compose d'un ensemble de fichiers WAVE, qui durent tous environ une seconde. Pour utiliser les données, chaque fichier est échantillonné dans un vecteur avec une fréquence d'échantillonnage de 16 000. Une stratégie courante pour la reconnaissance vocale consiste à extraire d'abord les caractéristiques de la forme d'onde brute. Les fonctions vocales couramment utilisées comme les spectrogrammes, les banques de filtres log-Mel et les coefficients cestraux à fréquence Mel (MFCC) convertissent la forme d'onde brute en un domaine temps-fréquence. Ces fonctionnalités sont ensuite utilisées comme entrée d'un modèle montrent comment les banques de filtres log-Mel peuvent être utilisées comme caractéristiques d'entrée dans un réseau neuronal [54].

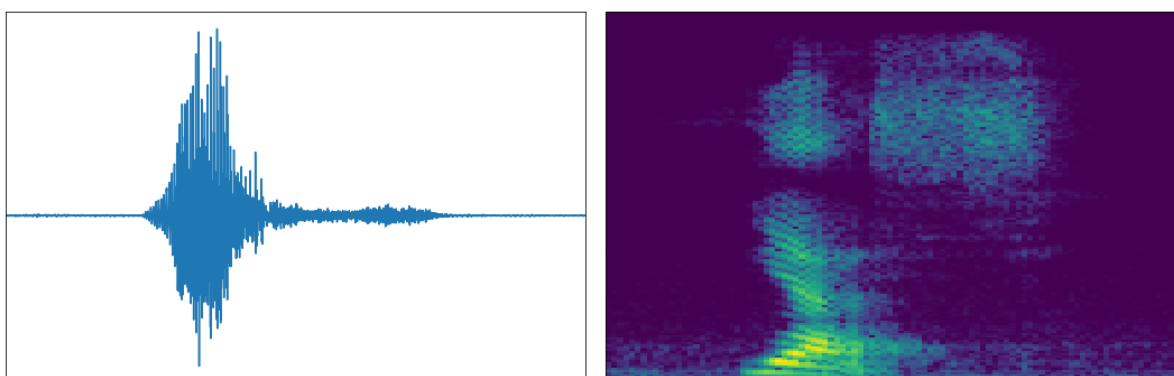


Figure III.5: Une présentation d'un fichier wave

### III.5. DONNÉES

#### III.5.1. Base de données (dataset)

On utilise le jeu de données commande vocale l'ensemble de données se compose de 3000 énoncés d'une seconde de 6 mots courts tels que « up », « down », « right » et « left ». « on », « off » L'ensemble de données vise à aider à créer des interfaces vocales pour les applications avec détection de mots clés, ce qui peut être utile sur les appareils mobiles et les microcontrôleurs

Le but est de classer les mots suivants : "up", "down", "left", "right", "on", "off". Tous les autres mots sont étiquetés comme « inconnus » et sont utilisés pour aider le modèle à apprendre une représentation pour tous les mots qui ne sont pas dans les 6 mots à classer. La classe finale est « silence », qui représente des échantillons sans mot. L'ensemble de test fourni par Kaggle comprend environ 150 000 énoncés supplémentaires, y compris des mots et des locuteurs qui n'apparaissent pas dans le jeu de données commande vocale

Les fichiers de l'ensemble de données sont organisés en dossiers par étiquette, les noms de fichiers commencent par un hachage représentant le locuteur, suivi d'un nombre représentant le nombre de fois où l'énoncé du même locuteur apparaît dans l'ensemble de données. Les données sont divisées en ensembles d'apprentissage et de validation à l'aide du hachage afin que le même locuteur n'apparaisse pas dans les deux ensembles. Kaggle a également fourni un ensemble de fichiers audio qui sont désignés comme bruit de fond, en utilisant ces fichiers, nous créons des données pour la classe de silence ainsi que le bruit de fond qui est utilisé pendant l'entraînement. Certains fichiers jugés silencieux mais mal étiquetés ont été corrigés et utilisés comme silence supplémentaire pendant la formation.

### III.6. IMPLEMENTATION DU PROGRAMME EN PYTHON

Tout d'abord, on importe toutes les bibliothèques nécessaires dans notre notebook. LibROSA et SciPy sont les bibliothèques Python utilisées pour traiter les signaux audio.

```
import librosa #importer librosa un package python pour l'analyse musicale et audio.
```

```
import IPython.display as ipd # est une bibliothèque python pour afficher. Display Object. Créez des objet audio.
```

```
import matplotlib.pyplot as plt #importer Matplotlib une bibliothèque complète pour créer des visualisations statiques, animées et interactives en Python
```

```
import numpy as np # NumPy est une bibliothèque python utilisée pour travailler avec des tableaux, fonctions pour travailler dans le domaine de l'algèbre linéaire, de la transformée de Fourier et des matrices
```

```
from scipy.io import wavfile #scipy est une bibliothèque qui utilise NumPy pour des fonctions plus mathématiques. SciPy utilise des tableaux NumPy comme structure de données de base
```

```
import warnings # on cas ou un messages d'avertissement il informe l'utilisateur d'alerter dans une condition dans un programme
```

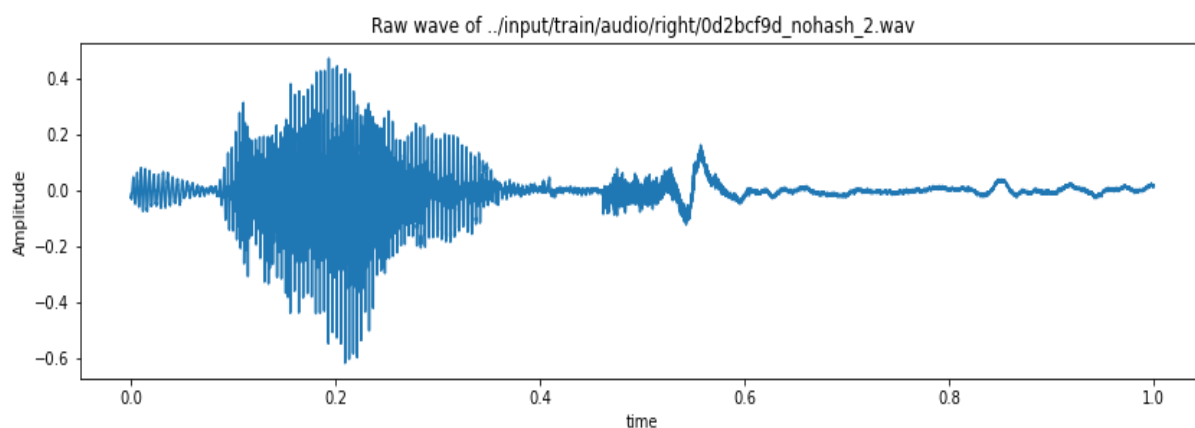
```
import os # Le module OS en python fournit des fonctions d'interaction avec le système d'exploitation . OS , fait partie des modules utilitaires standard de Python
```

```
warnings.filterwarnings("ignore") # Le filtre d'avertissements contrôle si les avertissements sont ignorés, affichés ou transformés en erreurs (levant une exception).
```

### III.6.1. Exploration et visualisation des données

L'exploration et la visualisation des données nous aident à mieux comprendre les données ainsi que les étapes de prétraitement.

Visualisation du signal audio dans le domaine des séries temporelle



**Figure III.6 : Une présentation d'un fichier wave a droite (right)**

#### **La fréquence d'échantillonnage des signaux audio:**

Fréquence d'échantillonnage est de 16000 Hz

#### **-Ré échantillonnage :**

D'après ce qui précède, nous pouvons comprendre que la fréquence d'échantillonnage du signal est de 16 000 Hz. Ré échantillonnons-le à 8000 Hz car la plupart des fréquences liées à la parole sont présentes à 8000 Hz :

**Maintenant, comprenons le nombre d'enregistrements pour chaque commande vocale :**

Pour chaque commande on a une 500 fichier audio (wave) pour entrainer le réseau de neurone cnn lors que le nombre des fichier audio (wave) augmente on aura un bon apprentissage et une bonne Précision

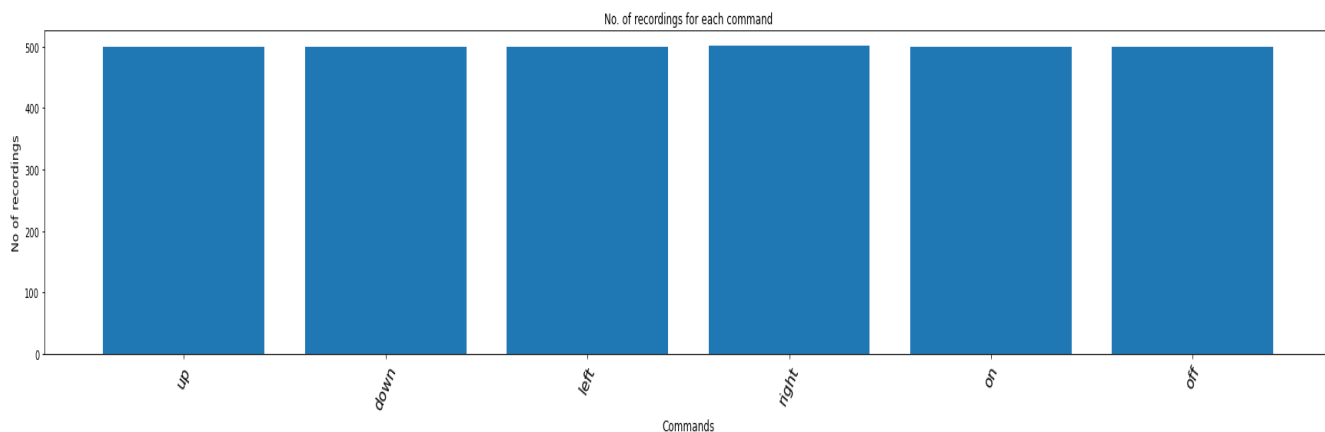


Figure III.7 : Le nombre d'enregistrements pour chaque commande vocale

**Durée des enregistrements :**

**Un regard sur la répartition de la durée des enregistrements :**

Chaque fichier audio est enregistré sur 1s y a des fichiers audio qui comportent rien et sont utilisés pour aider le modèle à apprendre une représentation pour tous les mots qui ne sont pas dans les 6 mots à classer. La classe finale est « silence », qui représente des échantillons sans mot

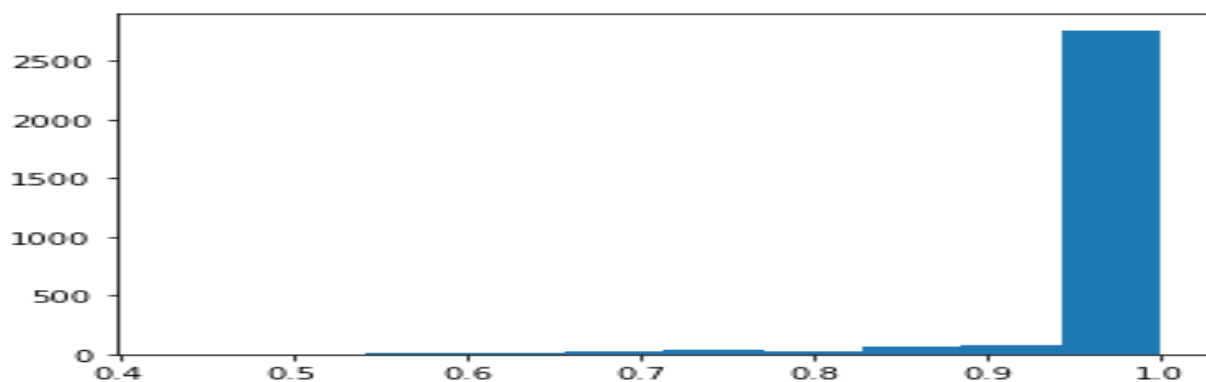


Figure III.8 : Représentation de la durée des enregistrements



## **CHAPITRE IV**

# **COMMANDE VOCALE DU QUADRIROTOR**

## IV.1 INTRODUCTION

Le contrôle des appareils est un élément essentiel de l'automatisation. À l'avenir, la reconnaissance vocale technique sera la méthode de contrôle des appareils, des ordinateurs et des robots. Il y a une énorme demande qui attend que cette technologie entre en vigueur. La reconnaissance vocale est une technique autonome et très moins coûteuse qui peut être utilisée pour contrôler les appareils électriques.

Une commande vocale est une interface d'entrée d'un système informatique permettant de passer des ordres à l'aide de messages vocaux. L'utilisateur parle dans un microphone, et un ordinateur, couplé à un logiciel de reconnaissance vocale, analyse ses paroles, et détermine la commande à exécuter.

La reconnaissance vocale est la technologie par laquelle les sons, les phrases prononcées par les individus sont converties en signaux électriques et ces signaux sont transformés en modèles de codage auxquels une signification est attribuée. Ce concept pourrait plus généralement être appelé reconnaissance sonore ou reconnaissance vocale. La voix humaine est principalement concentrée ici, car nous utilisons le plus naturellement et le plus fréquemment nos voix pour communiquer nos pensées aux autres dans notre Contrôle des appareils électriques via des commandes vocales

Notre but dans ce chapitre c'est de réaliser un système de régulation de type PID, puis faire une simulation des trajectoires du quad-coptère sous cette loi de commande.

## IV.2. ALGORITHME DE CONTROLE

### IV.2.1 Commande par régulation PID

Le régulateur PID, ou correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est un algorithme de contrôle qui permet d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans plusieurs domaines où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques. Parmi les avantages de ce régulateur nous citons [55] :

- Structure simple.
- Bonne performance dans plusieurs processus.
- Fiable, même sans un modèle spécifique du système de contrôle.

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

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

Le PID permet trois actions en fonction de cette erreur :

- Une action Proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain  $K_p$  pour améliorer la rapidité du système, plus  $K_p$  est grand plus le temps de réponse diminue.
- Une action Intégrale : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps  $s$ , puis divisée par un gain  $K_i$  pour éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent et améliorer la précision mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage.
- Une action Dérivée : l'erreur est dérivée suivant un temps  $t$ , puis multipliée par un gain  $K_d$  ce qui accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle.

La structure PID classique est montrée sur la figure suivante :

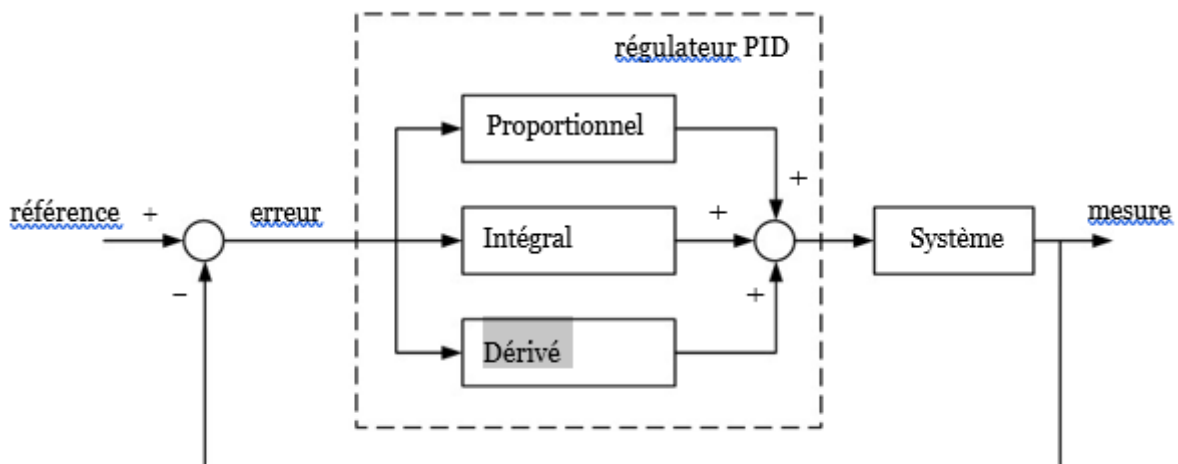


Figure IV.1 : Principe de la commande par PID.

#### IV .2.2. Principe de la commande

L'idée centrale de ce type de régulateur est de délivrer un signal de commande à partir de la différence entre une consigne  $y_{ref}$  et une mesure  $y$ . Soit  $e$  l'écart entre  $y_{ref}$  et  $y$  défini par  $e = y_{ref} - y$ , l'expression du signal de commande  $U$  généré par un correcteur PID est donnée dans le domaine temporel par:

$$U(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(\tau)}{dt} \quad (IV.1)$$

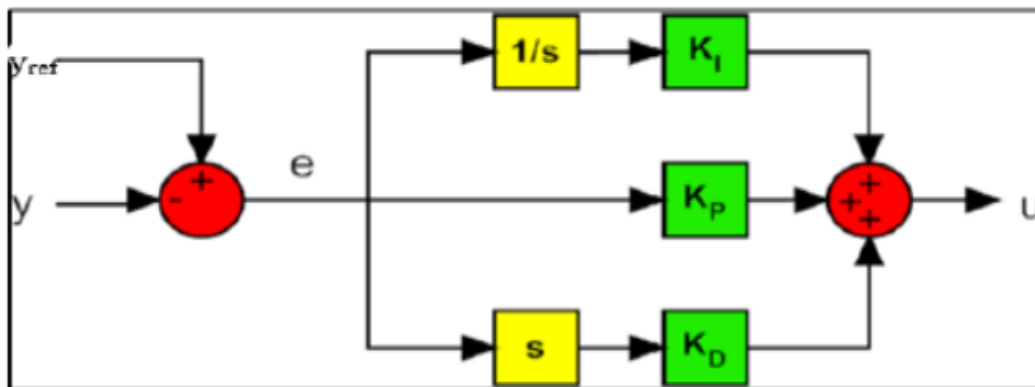


Figure IV.2 : Structure du PID traditionnelle.

U: La variable générique contrôlée.

e : L'erreur entre la tâche  $y_{ref}$  et la sortie du processus  $y$ .

$k_p$  : Coefficient proportionnel.

$k_i$  : Coefficient intégral.

$k_d$  : Coefficient dérivé.  $1/s$  : opérateur de LAPLACE d'intégration

S : opérateur de LAPLACE dérivation

Dans la première contribution (P), l'erreur est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système [56]:

$$P = K_P e(t)$$

L'idée étant d'augmenter l'effet de l'erreur  $e(t)$  sur le système afin qu'il réagisse plus rapidement aux changements de consignes. Plus la valeur de  $K_P$  est grande plus la réponse l'est aussi. En revanche, la stabilité du système s'en trouve détériorée et dans le cas d'un  $K_P$  démesuré, le système peut même diverger. La contribution de I varie en fonction de l'intégrale de l'erreur [57].

$$I = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (\text{IV.2})$$

Même si cette composante augmente le dépassement et le temps de stabilisation, elle a une propriété unique : elle élimine l'erreur d'état stationnaire [57].

$$I = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{IV.3})$$

Ceci aide à diminuer le temps de stabilisation.

Dans le domaine de Laplace, la structure traditionnelle PID peut être réécrite conformément à  $U(s) = (K_P + K_I s + s K_D) e(s)$

Comme cette fonction est impropre, il n'est pas physiquement possible (en raison de la composante dérivé). Après une certaine fréquence, la contribution dérivative doit être atténuée pour filtrer le bruit hors bande. Pour cette raison, dans le dérivateur un véritable pôle est ajouté comme indiqué dans

$$U(s) = \left( K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{s K_D}{1 + s K_D / K_P} \right) e(s) \quad (\text{IV.4})$$

La structure PID traditionnelle présente deux principaux inconvénients :

- L'action de dérivation est calculée à partir de l'erreur. Si la tâche ajoute une étape dans la référence, la sortie du dérivateur peut présenter une impulsion. Le mouvement pointu peut saturer l'actionneur et propager loin du système par rapport à la zone linéaire. Pour cette raison la plupart des architectures PID présentent l'action de dérivé de la sortie du processus seulement.
- L'action de l'intégration combinée avec un actionneur de saturation peut provoquer un effet non linéaire, celui-ci peut diminuer la performance du système de contrôle. Lorsque la valeur de l'intégrale est assez grande et l'erreur change de signe il est nécessaire d'attendre beaucoup de temps pour restaurer le comportement en tant que système linéaire. Ce phénomène est appelé Intégrante Wind-up. Pour l'éviter, on ajoute un saturateur.

L'intégrale pour limiter les valeurs maximales et minimales. La figure montre la structure PID améliorée [55].

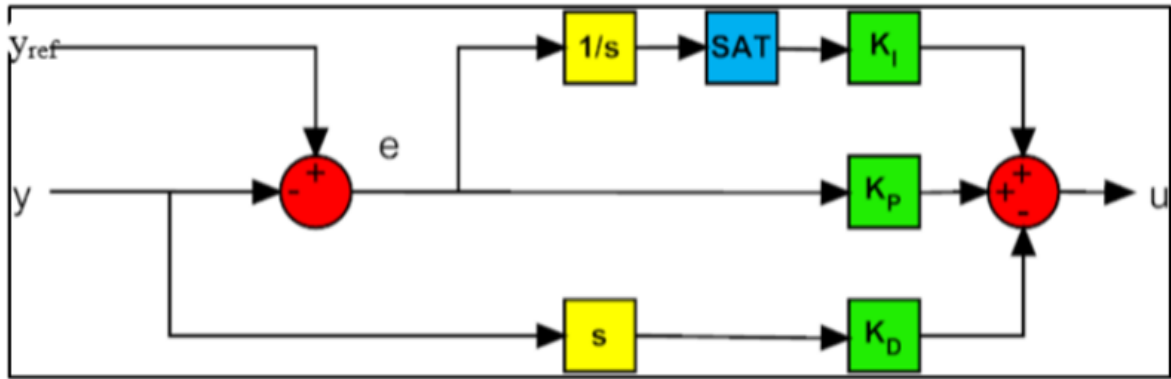


Figure IV.3 : Structure du PID améliorée.

Le quad-coptère est un système sous-actionné à 6 DDL, 4 entrées pour commander 6 sorties.

Le système est couplé entre deux boucles : une boucle interne qui contrôle les mouvements de rotation (roulis tangage et lacet), et qui doit être plus rapide 3 que la 2eme boucle externe responsable à contrôler les mouvements de translation.

Donc ce système est composé de 6 PID, 3 régulateurs des mouvements de rotation dans laboucle interne et les 3 dans la boucle externe.

Pour notre cas nous voulons que les sorties du régulateur de positions soient des accélérations  $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})$

Si on pose  $U = \ddot{x}$ , et  $e_x = x - x_d$  avec  $x_d = \text{constant}$ , l'expression générale du PID devient comme suit

$$\ddot{e}_x(t) = K_P e_x(t) + K_I \int_0^t e_x(\tau) d\tau + K_D \frac{de_x(\tau)}{dt} \tag{IV.5}$$

En dérivant cette équation nous obtenons l'équation suivante :

$$\ddot{e}_x(t) = K_P \dot{e}_x(t) + K_I e_x(t) + K_D \ddot{e}_x(t) \tag{IV.6}$$

Dont la solution en régime permanent est :  $e = 0$  avec des gains bien choisis. Ainsi,  $\ddot{x} = \ddot{x}_d$  ce qui assure le comportement souhaitable.

Il faut d'abord faire une rotation pour pouvoir faire une translation

Les accélérations angulaires sont régulées à partir de l'équation suivante :

$$U_i = K_P e_i(t) + K_I \int_0^t e_i(\tau) d\tau + K_D \frac{de_i(\tau)}{dt} \tag{IV.7}$$

Avec :  $i = \phi, \theta, \psi$

Le modèle dynamique de notre quad-coptère contient deux effets gyroscopiques, l'influence de ces effets est dans notre cas moins importante que ceux du rotation des moteurs, ce qui va simplifier notre modèle [58].

Donc les commandes  $U_2, U_3, U_4$  sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} U_2 = \ddot{\varphi} \times J_{xx} \\ U_3 = \ddot{\theta} \times J_{yy} \\ U_4 = \ddot{\psi} \times J_{zz} \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

L'expression de  $U_1$  est déterminée depuis l'équation dynamique de translation  $\ddot{z}$  :

$$U_1 = \frac{m(\ddot{z}+g)}{\cos \varphi + \cos \theta} \quad (\text{IV.9})$$

avec  $\cos \varphi + \cos \theta$  égale pas à zero

Après avoir exprimé les commandes nous allons les utiliser pour déterminer les expressions des vitesses de rotation des moteurs nous obtenons :

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\left| \frac{U_1}{4b} - \frac{U_3}{2lb} + \frac{U_4}{4d} \right|} \\ \omega_2 = \sqrt{\left| \frac{U_1}{4b} - \frac{U_2}{2lb} + \frac{U_4}{4d} \right|} \\ \omega_3 = \sqrt{\left| \frac{U_1}{4b} + \frac{U_3}{2lb} - \frac{U_4}{4d} \right|} \\ \omega_4 = \sqrt{\left| \frac{U_1}{4b} + \frac{U_2}{2lb} - \frac{U_4}{4d} \right|} \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

Les commandes  $U_1, U_2, U_3, U_4$  sont reconstruites à partir des expressions des vitesses des moteurs par l'équation (II.50).

### IV.3 SYSTEME A COMMANDE VOCALE

Un système à commande vocale typique se compose de trois sous-systèmes principaux : capture vocale, reconnaissance vocale et exécution de commandes, comme illustré sur la figure 1. Le sous-système de capture vocale enregistre voix, qui sont amplifiées, filtrées et numérisées, avant transmis au sous-système de reconnaissance vocale. Ensuite, le cru des signaux numériques capturés sont d'abord prétraités pour supprimer les fréquences qui sont au-

delà de la plage sonore audible et pour rejeter le signal segments contenant des sons trop faibles pour être identifiés. Ensuite, les signaux traités entrent dans le système de reconnaissance vocale.

En règle générale, un système de reconnaissance vocale fonctionne en deux phases: activation et reconnaissance. Pendant la phase d'activation, le système ne peut pas accepter des entrées vocales arbitraires, mais il attend d'être activé. À activer le système, un utilisateur doit soit dire des mots de réveil prédéfinis ou appuyez sur une touche spéciale. Par exemple, Amazon echo prend «Alexa» comme le mot de réveil d'activation. Apple Siri peut être activé en appuyant sur et maintenez le bouton d'accueil enfoncé pendant environ une seconde ou par "Hey Siri »si la fonction« Autoriser Hey Siri »est activée 1. Pour reconnaître le réveiller les mots, les microphones continuent à enregistrer les sons ambiants jusqu'à ce qu'une voix soit recueillie. Ensuite, les systèmes utiliseront soit le haut-parleur ou algorithme de reconnaissance vocale indépendant du locuteur pour reconnaître la voix. Par exemple, Amazon Echo exploite algorithmes indépendants du locuteur et accepte «Alexa» prononcée par tout un tant que la voix est claire et forte. En comparaison, Apple Siri dépend du locuteur. Siri doit être formé par un utilisateur et uniquement accepte «Hey Siri» de la même personne. Une fois activé, le SR le système entre dans la phase de reconnaissance et utilisera généralement le haut-parleur indépendant algorithmes pour convertir les voix en textes, c'est-à-dire en commandes dans nos cas.

Notez qu'un SR dépendant du locuteur est généralement exécuté localement et une SR indépendante du locuteur est effectuée via un service cloud [28]. Pour utiliser le service cloud, les signaux traités sont envoyés aux serveurs, qui extraira des caractéristiques (généralement des coefficients cepstraux à fréquence Mel ) et reconnaître les commandes via l'apprentissage automatique algorithmes (par exemple, les modèles de Markov cachés ou les réseaux de neurones). Enfin, les commandes sont renvoyées. Étant donné une commande reconnue, le système d'exécution de commande lancera l'application correspondante ou exécutera une opération. Les commandes acceptables et les actions correspondantes sont système dépendante et définie au préalable. Systèmes à commande vocale populaires inclure les smartphones, les appareils portables, les appareils domestiques intelligents,



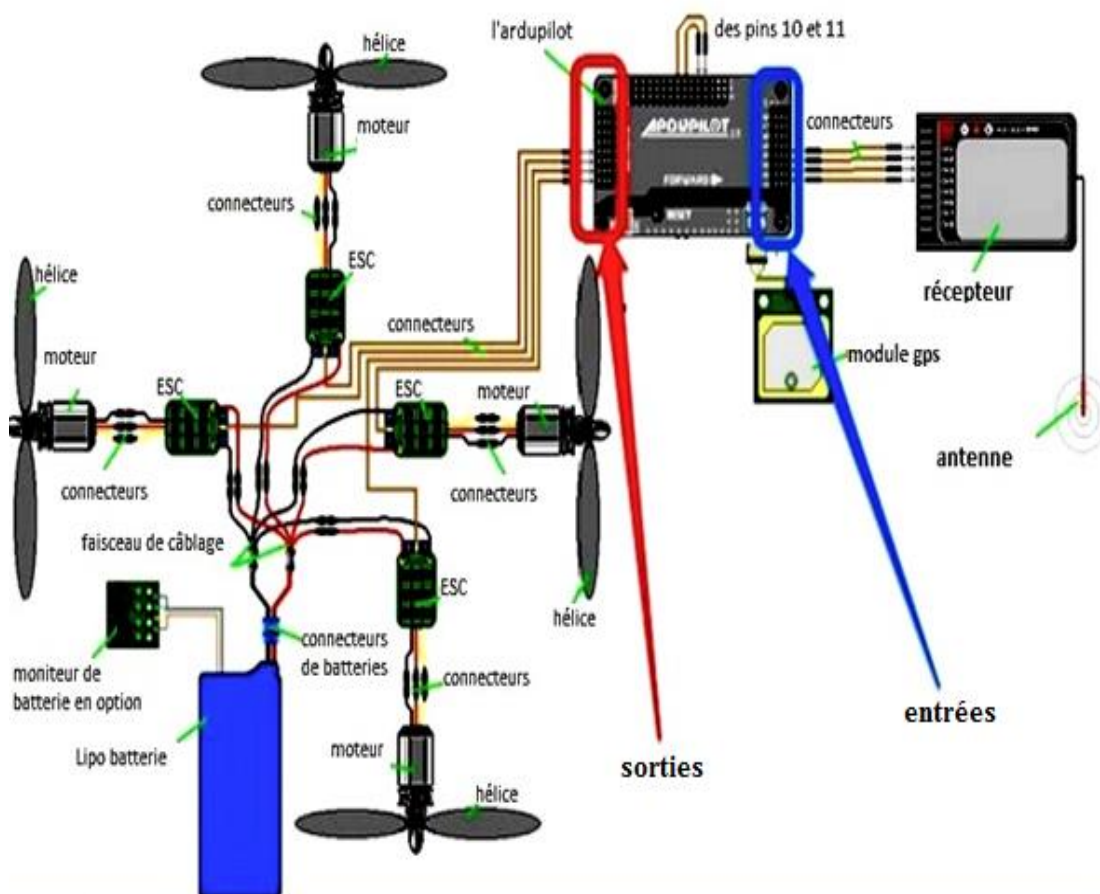
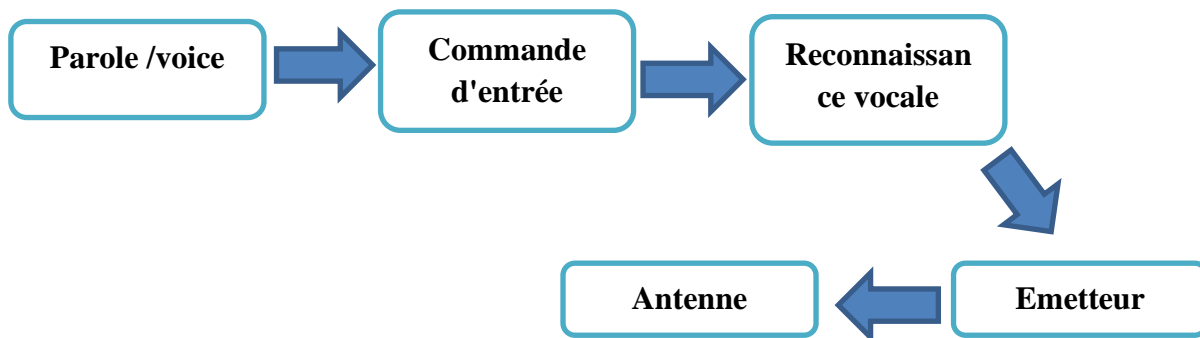


Figure IV.4 : Schéma fonctionnel du système a commande vocale

#### IV.4 LE DEROULEMENT DES COMMANDES

Tout d'abord, l'erreur s'agit d'une différence entre les valeurs réelles envoyées par le capteur, et les consignes envoyées par le système de reconnaissance vocale. Cette erreur est

utilisée ensuite pour le calcul des PID. Les résultats du calcul vont construire les impulsions pour les ESC, qui vont à leur tour commander les moteurs.

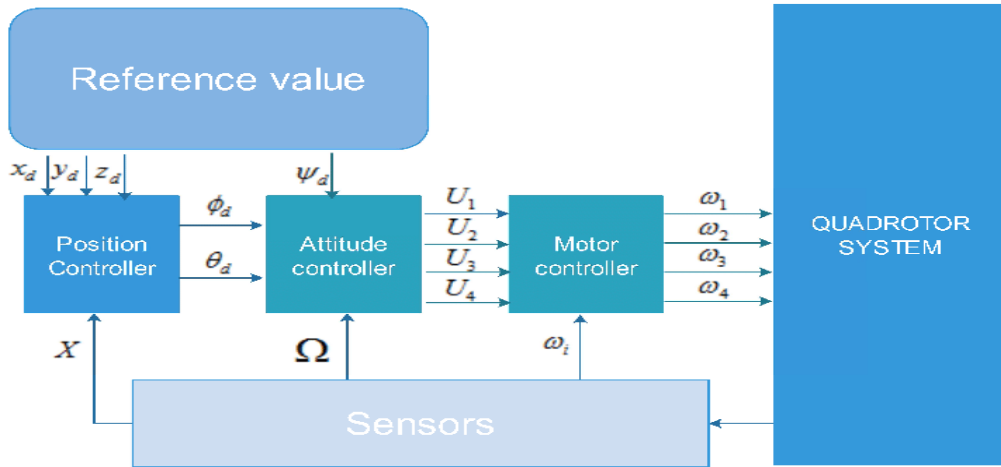


Figure IV.5: Structure system de contrôle avec PID

Le premier bloc est le bloc des entrées il contient le signal vocal traiter pour avoir la position désirée. Ensuite, les consigne vont être comparées avec les valeurs réelles, et les régulées par PID. Les sorties des PID ( $\ddot{x}$ ,  $\ddot{y}$ ,  $\ddot{z}$ ) et l'entrée  $\psi_d$  vont définir les expressions de  $\phi_d$  et  $\theta_d$  Ya aussi le bloc responsable de la régulation des angles  $\theta_d$ ,  $\phi_d$ ,  $\psi_d$  par d'autres PID.

Le dernier bloc contient un couplage entre les commandes  $U_1, U_2, U_3, U_4$  et les vitesses de rotation  $w_1, w_2, w_3, w_4$ .

Les commandes  $U_1, U_2, U_3, U_4$  sortantes vont agir sur notre système dans le dernier bloc.

#### IV.5. SIMULATION ET RESULTATS

Les paramètres que nous avons identifiés sont cités dans le tableau suivant :

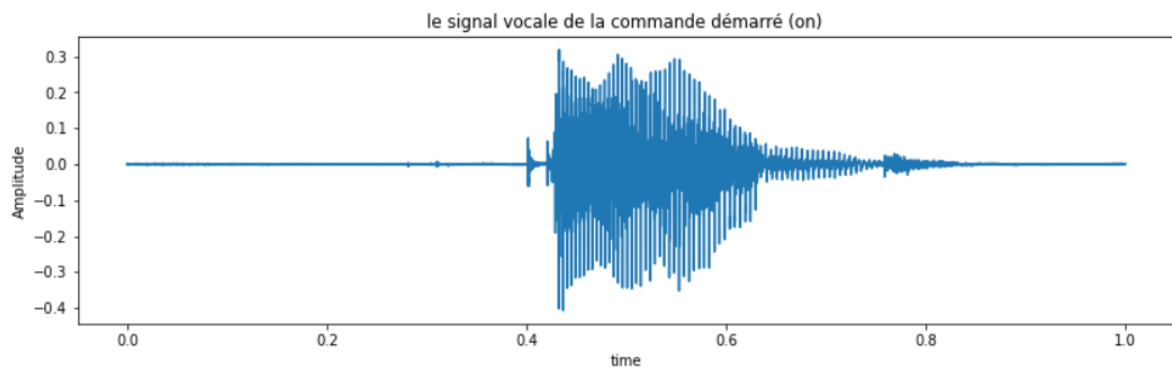
Tableau III.1 : Tableau des paramètres du qudri-rotors

Paramètres	Valeur	Unité
M	1.2	G
G	9.81	m.s <sup>2</sup>
Ixx	0.0123	Kg.m <sup>2</sup>
Iyy	0.0123	Kg.m <sup>2</sup>
Izz	0.0224	Kg.m <sup>2</sup>
Jr	2.7e-5	Kg.m <sup>2</sup>
Dxm	0.16	M
Dym	0.16	M
Dzm	0.05	M
B	1.076e-5	N.sec <sup>2</sup>

D	1.632e-7	N.m.sec <sup>2</sup>
Vitesse de rotation maximal du moteur	925	(rad/s)
Vitesse de rotation maximal du moteur	75	(rad/s)

#### IV .5.1. La commande démarré (on)

On lance la première commande le système de la reconnaissance vocale commence le traitement de la vocale il prend une seconde pour l'opération

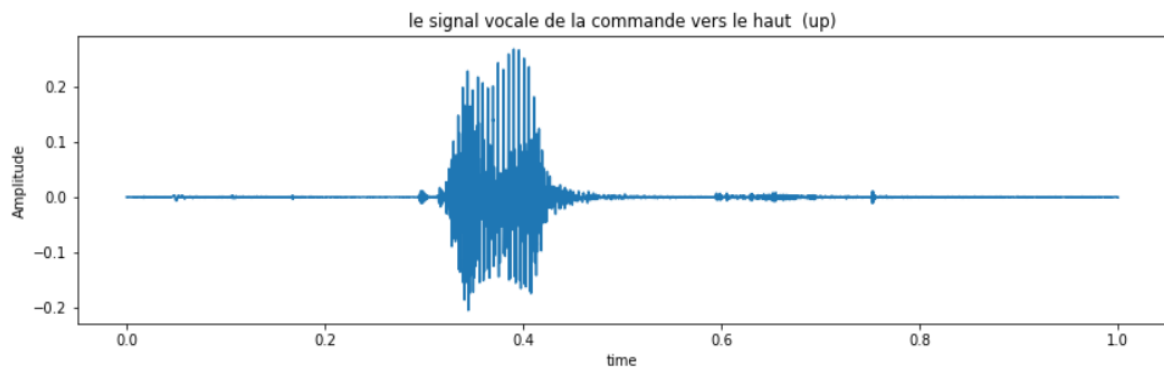


**Figure IV.6 : Le signal vocal de la commande démarré (on)**

les propulseurs commencer à tourner jusqu'à ce qu'il atteigne une vitesse constante mais il va rester au sol jusqu'à ce qu'on lance la commande suivante

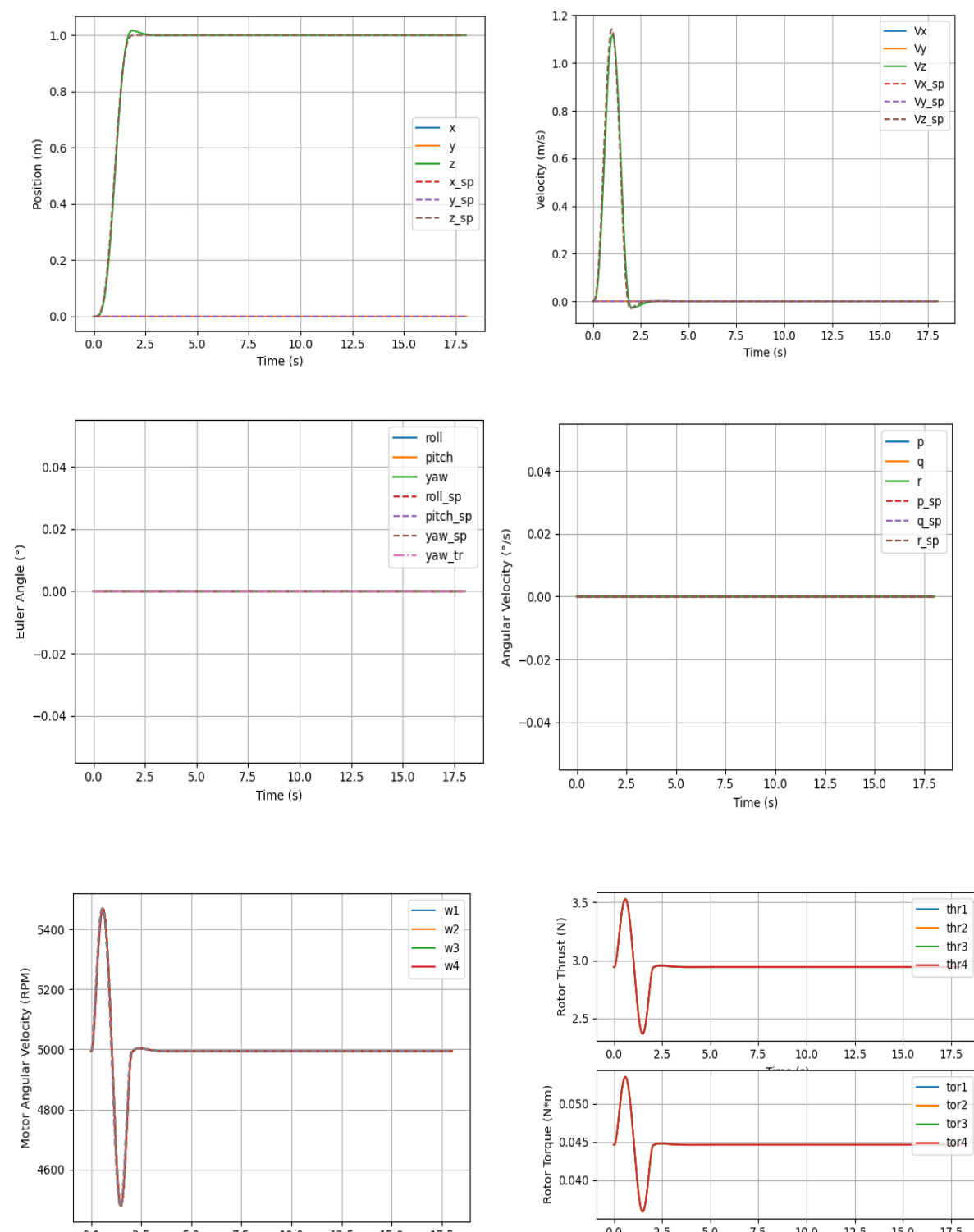
#### IV.5.2. La commande vers le haut (up)

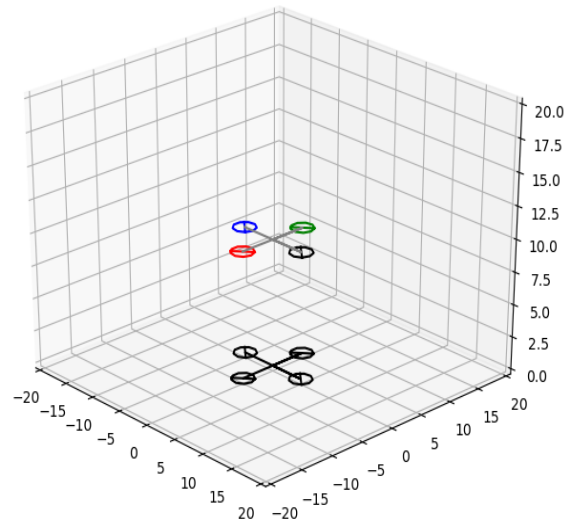
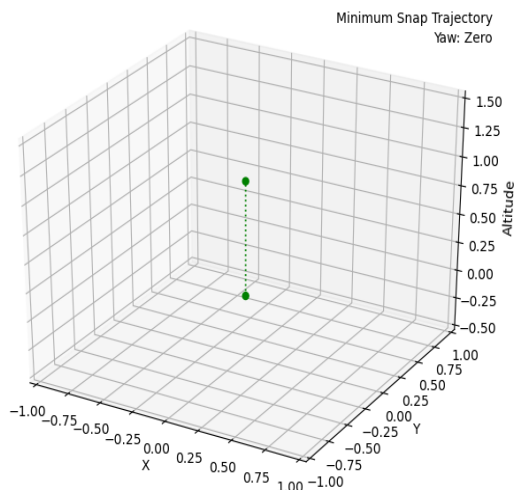
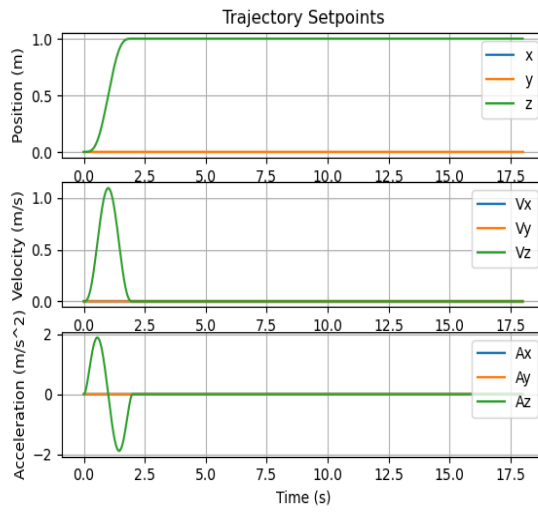
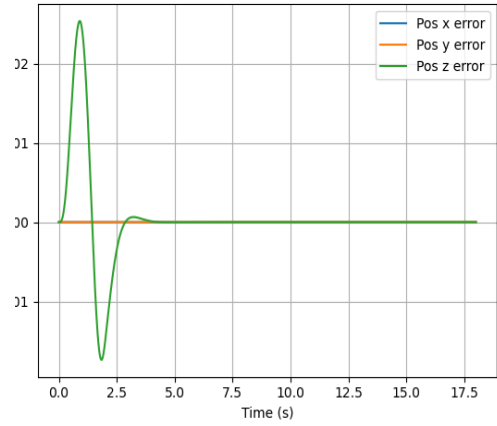
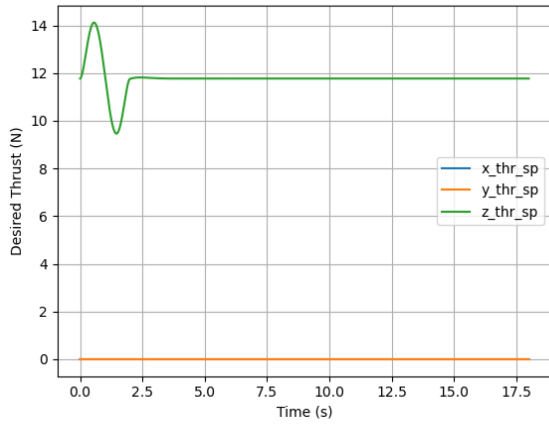
Lorsque on lance la première commande vers le haut (up) le système de la reconnaissance vocale va prendre une seconde pour traiter le signal vocal



**Figure IV.7: le signal vocal de la commande vers le haut (up)**

après l'avoir notre quadri rotor va monter vers le haut avec une altitude de 1 mètre d'après les graphes on remarque exactement a l'instant  $t=2s$  que on a un mouvement de position en z avec une vitesse de translation  $V_z$  notre quadri rotor va monter verticalement jusqu'au point désiré avec une vitesse des moteurs constante c'est pour cela on a rien dans les graphes des angles ya aucune rotation autour les axes (x,y,z) Nous remarquons aussi que les trajectoires réelles convergent vers les références en des temps acceptables. De plus l'erreur statique est nulle pour les tracés. La perturbation dans les tracés est due a la stabilisation de quadri rotor lorsque elle a atteint l'altitude désiré

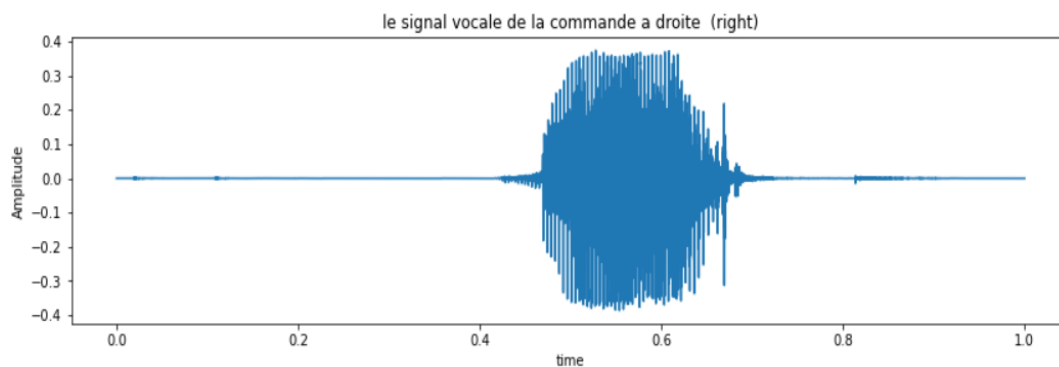




**Figure IV.8 : La représentation 3d de la commande vers le haut (up)**

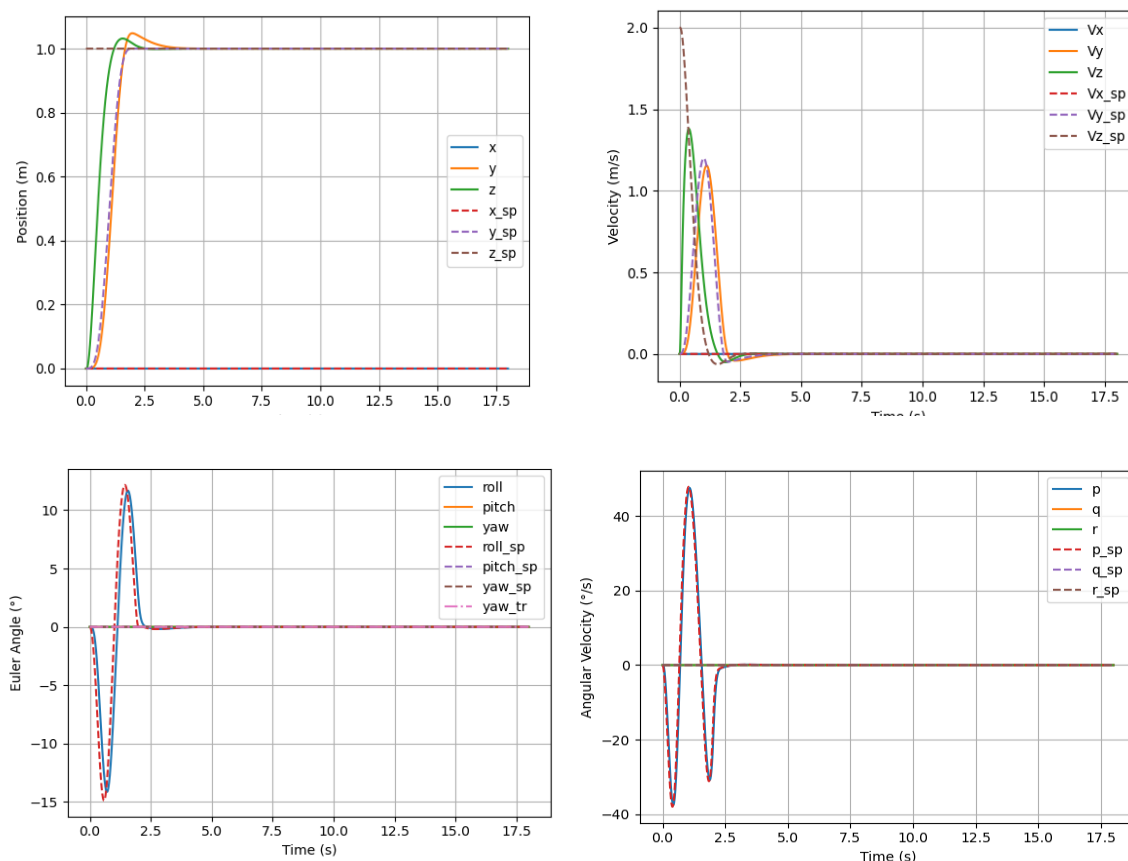
### IV .5.3. La commande vers la droite (right)

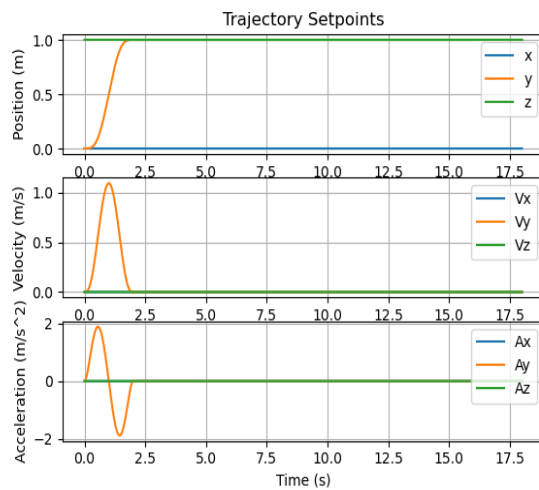
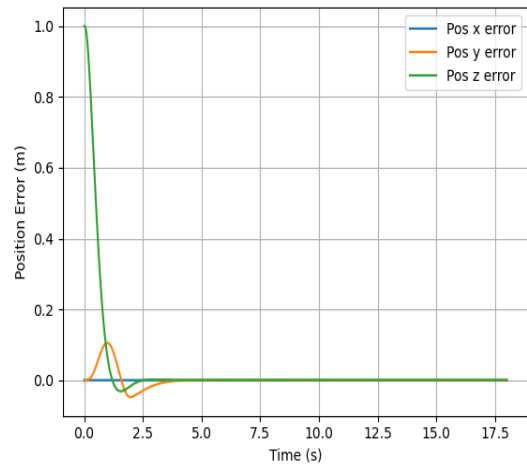
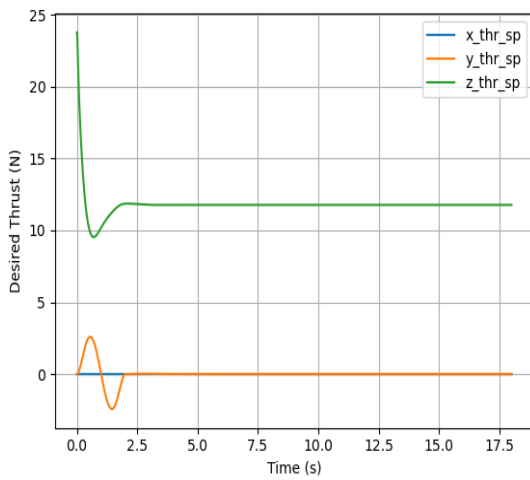
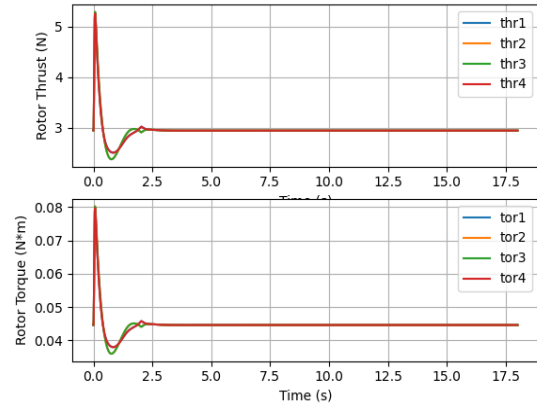
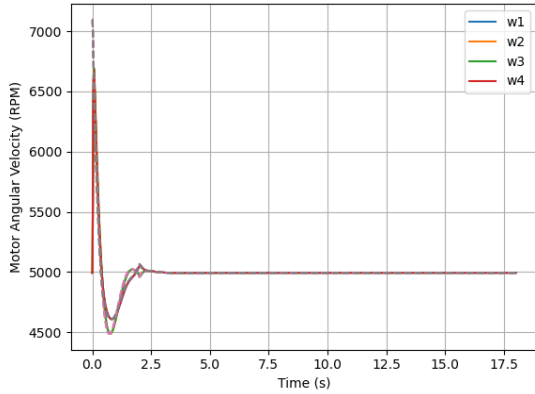
Après qu'il fais la premier commande de mouvement La même chose pour le système de la reconnaissance vocale il va prendre une seconde pour le traitement de la commande



**Figure IV.9 : Le signal vocale de la commande vers la droite (right)**

après l'avoir le quadri rotor il est déjà sur une altitude de 1 mètre il va faire un mouvement de translation vers la droite avec une distance de 1 mètre aussi selon l'axe y avec des vitesses de translation  $V_y$  et  $V_z$  par ce que il est déjà sur une altitude dans le graphe des angles on va avoir une rotation sur l'axe x (MOUVEMENTS DE ROULIS.) causée par le changement des vitesses des propulseurs droit et gauche l'inclinaison se fais sur l'angle  $\phi$  lorsque il atteint vers la droite un mètre il se stabilise une autre fois à l'aide de régulateur PID.





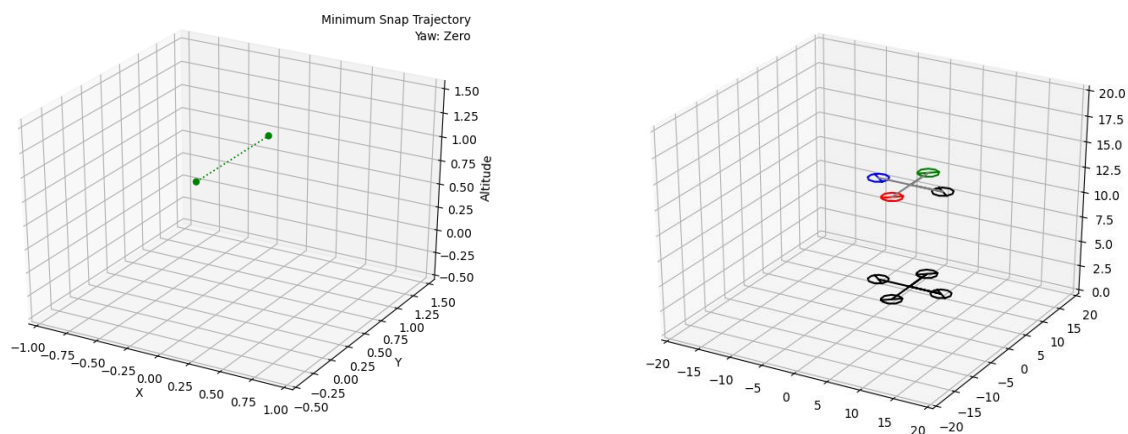


Figure IV.10 : La représentation 3D de la commande vers la droite

#### IV .5.4.La commande vers la gauche (left)

L'angle responsable sur les côtes gauche et droite c'est toujours  $\phi$ (MOUVEMENTS DE ROULIS.) , en suit on lance la commande left donc une fois elle arrive après une seconde le système de la reconnaissance vocale traite le signal

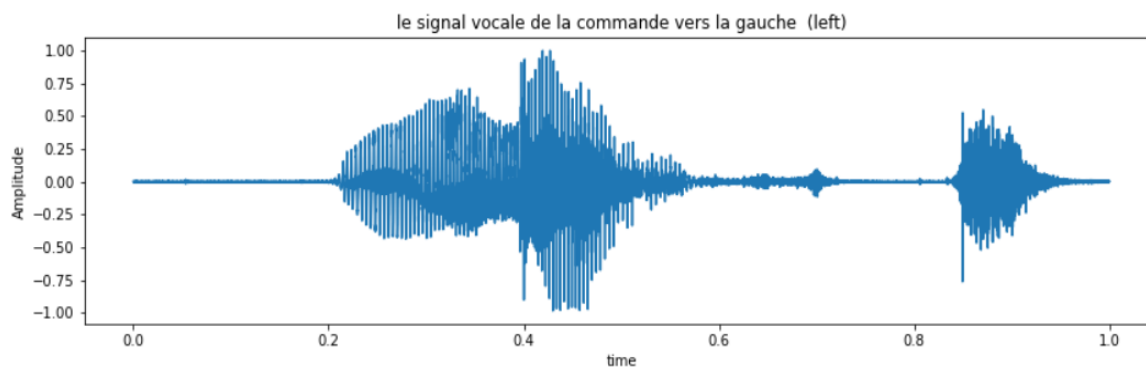
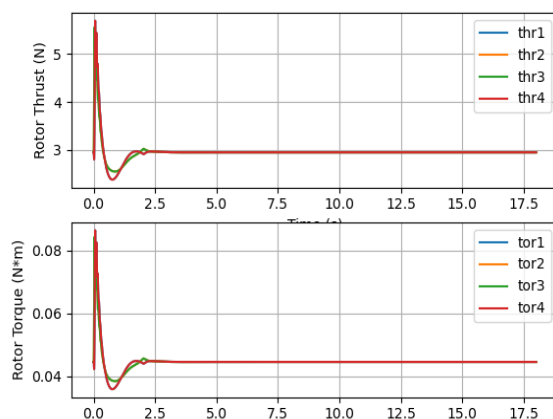
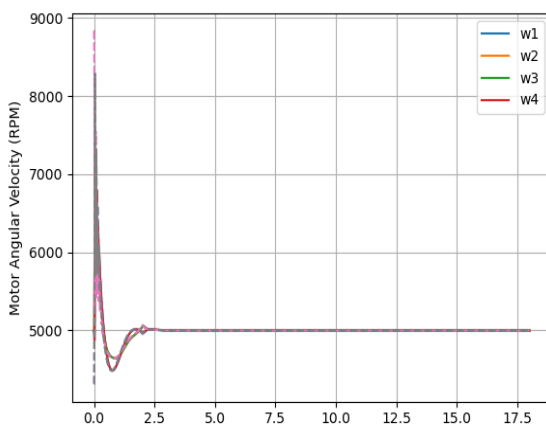
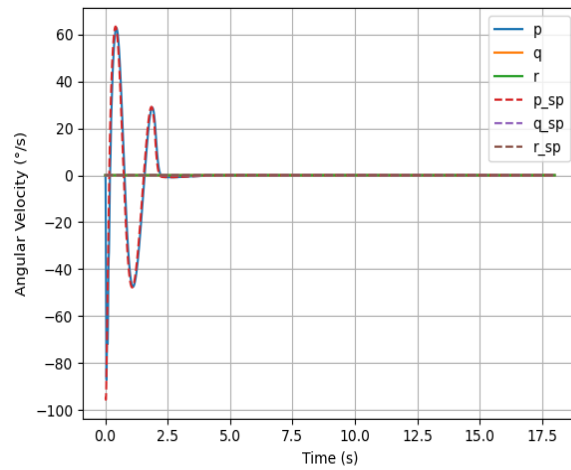
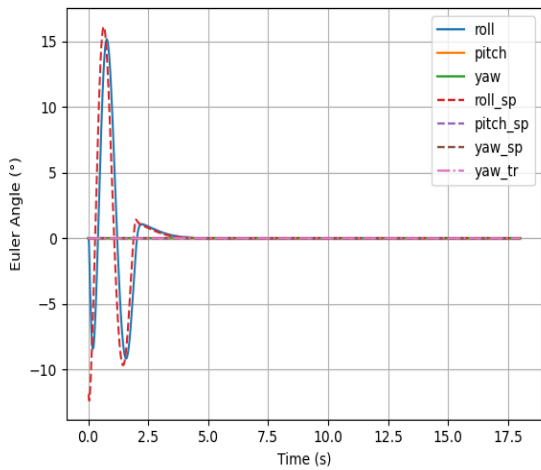
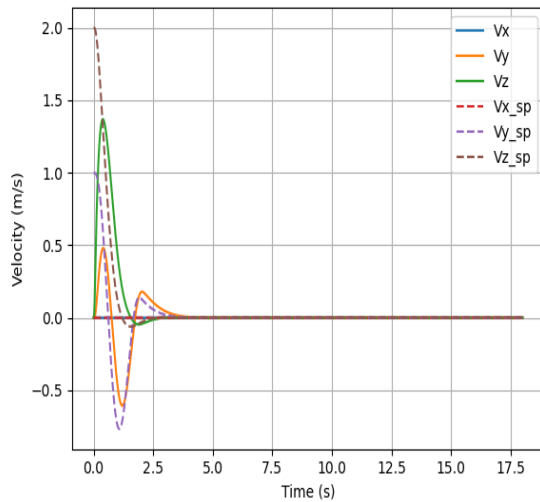
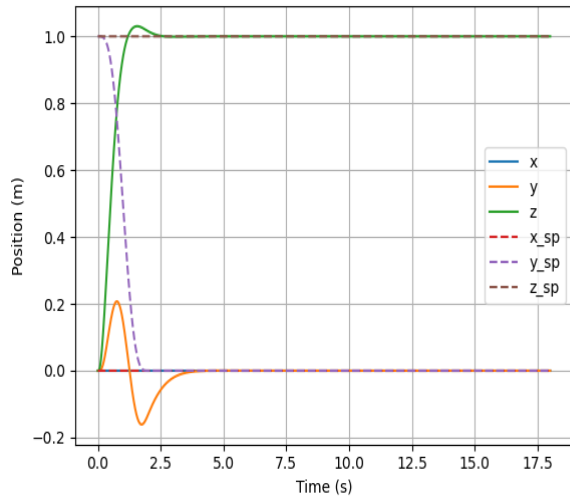


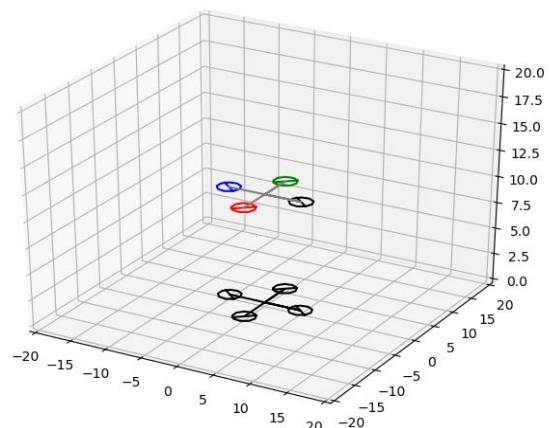
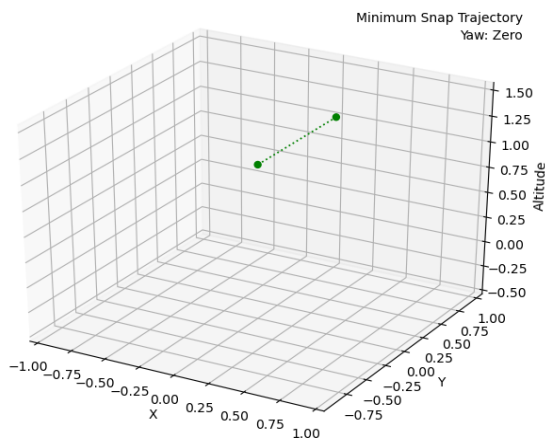
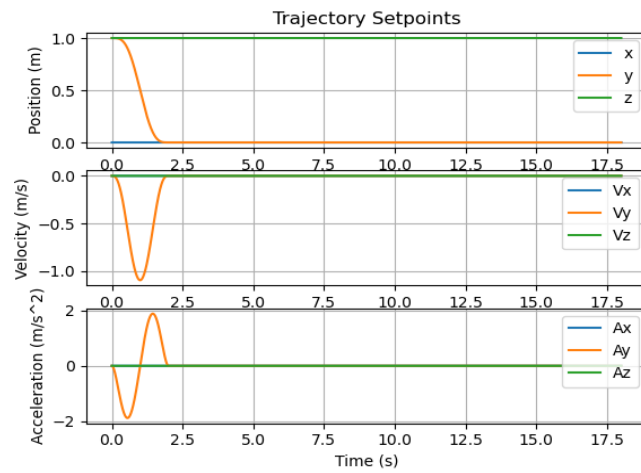
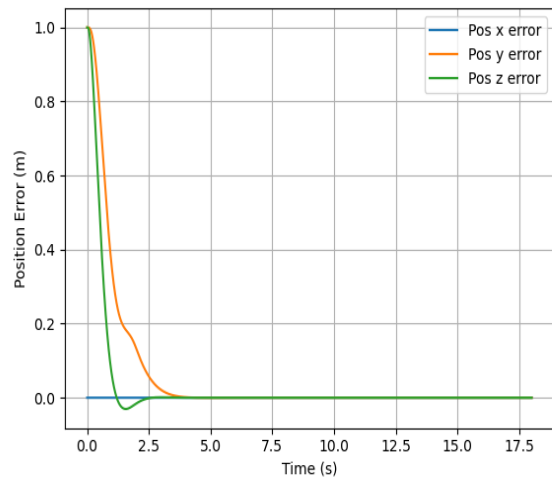
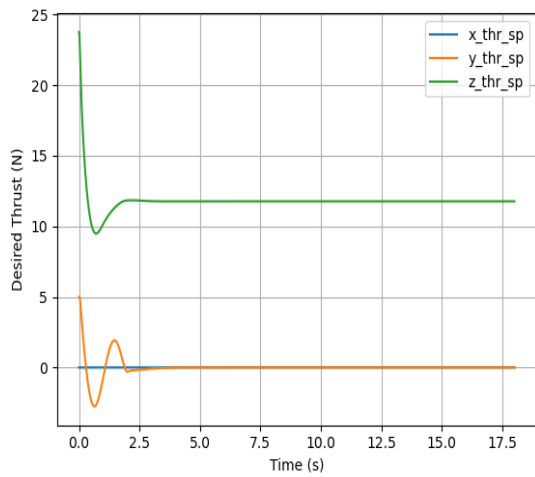
Figure IV.11 : Le signal vocale de la commande vers la gauche (left)

le quadri rotor fais une autre fois un mouvement vers la gauche de 1 mètre il revient le y a 0 par contre le z il reste sur 1 comme elle montre la figure, pour la vitesse on aura aussi une vitesse  $V_z$  et  $V_y$  avec une rotation autour de l'axe x provoque par le changement des vitesses des propulseurs droite et gauche on voit sur la figure des erreur une petite perturbation due a la



stabilisation de quadri rotor lorsque il arrive au point désiré a laide toujours par le régulateur PID.

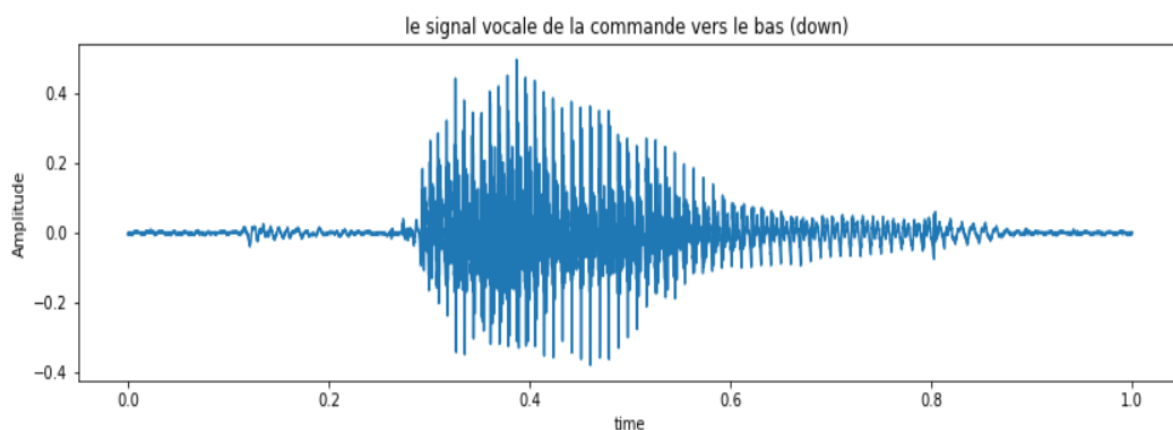




**Figure IV.12: Représentation 3d de la commande vers la gauche (left)**

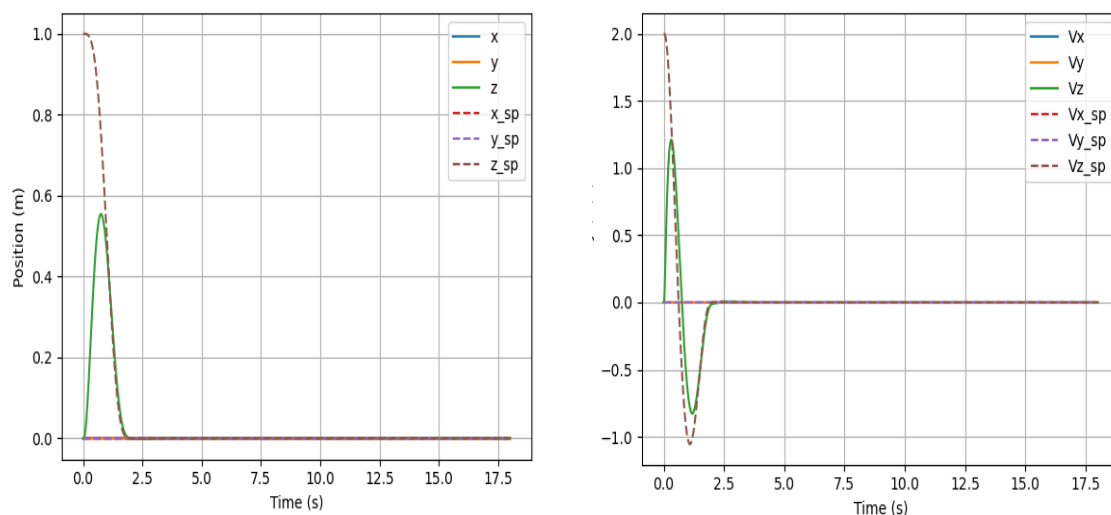
#### IV .5.5. La commande vers le bas (down)

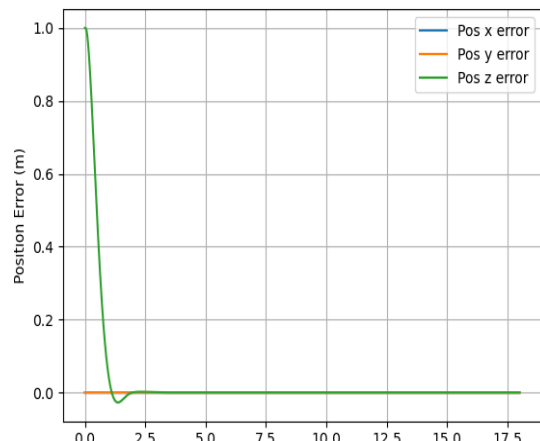
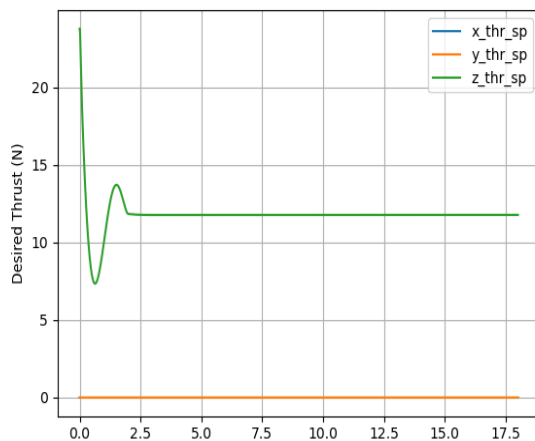
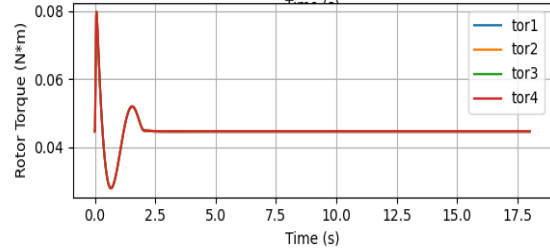
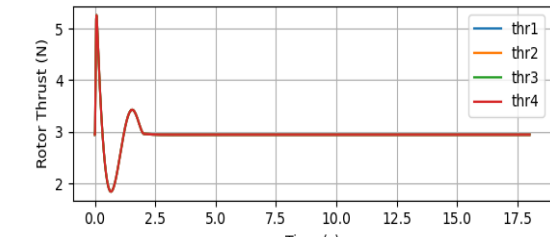
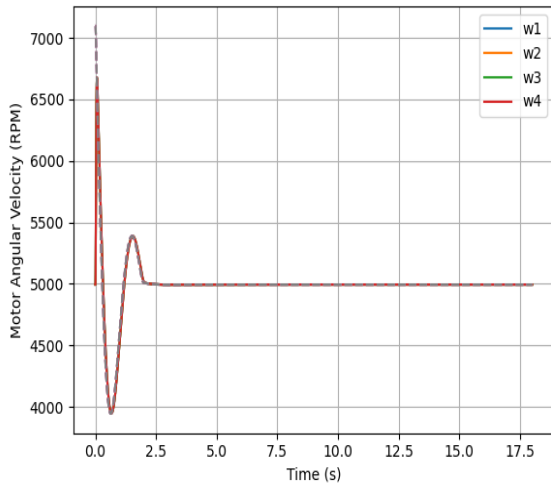
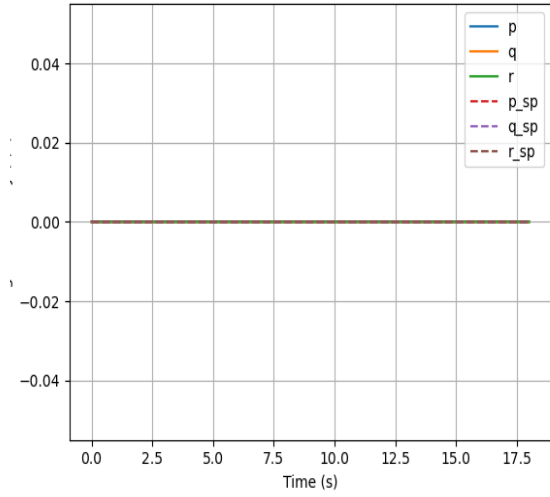
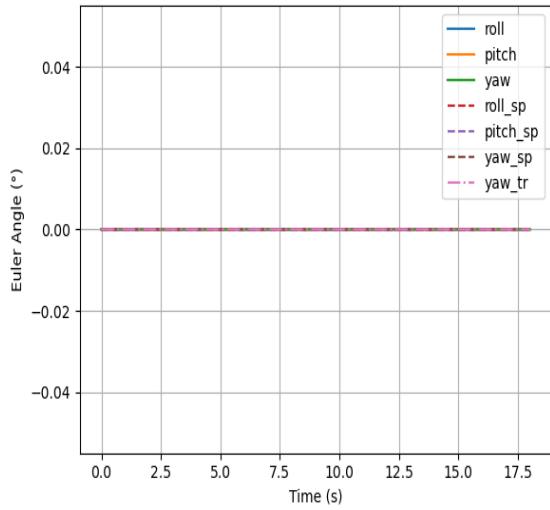
On lance la commande le système de la reconnaissance vocale traite le système dans un seul second



**Figure IV.13 : le signal vocal de la commande vers le bas (down)**

Et pour la dernière commande les propulseurs se réagissent à la même instant pour faire le descendre vers le bas on remarque une diminution de la vitesse jusqu'à la position initiale les commande sont tous réglé sur une distance d'un mètre avec la présence de régulateur PID on remarque aussi que les angles sont tous nulle avec une vitesse de translation  $V_z$  vers  $z=0$  lorsque elle atteint la position final on lance la commande off pour faire arrêter le quadri rotor.





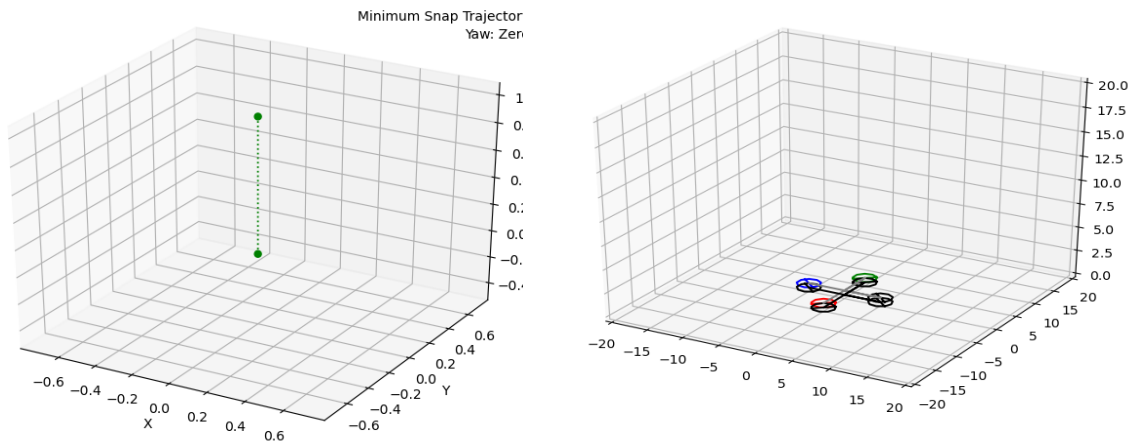
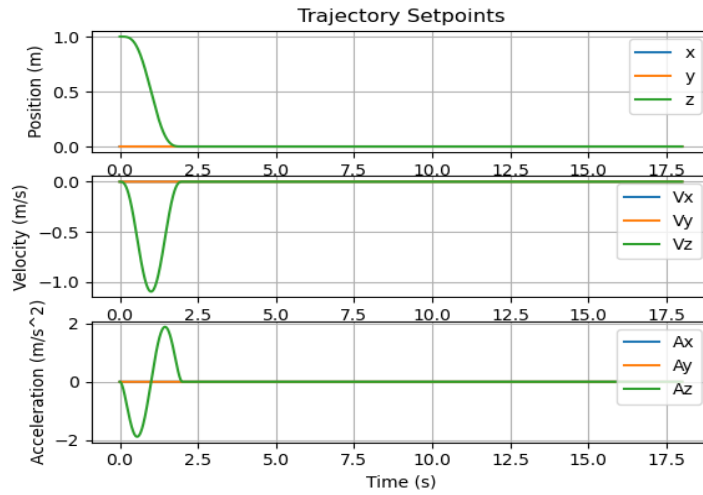
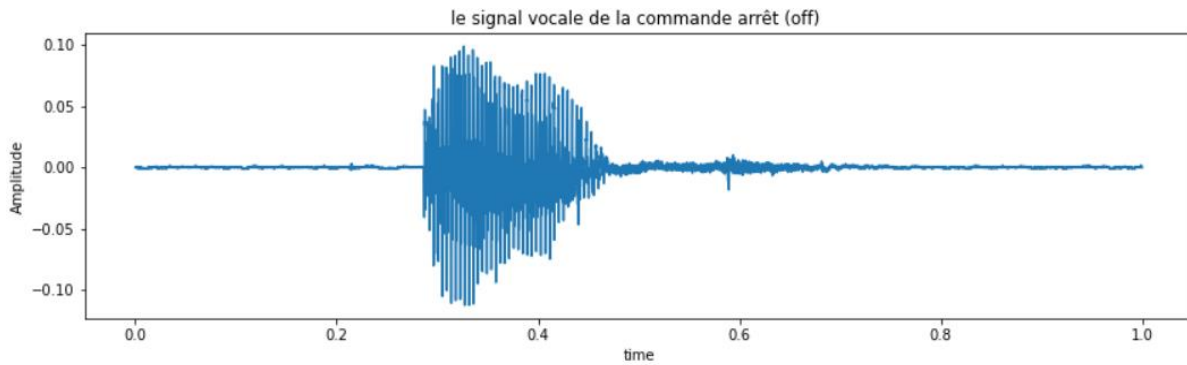


Figure IV.14 : La représentation 3d de la commande vers le bas (down)

**IV .5.6. La commande arrêt (off)**

Lorsqu'il atteint la dernière position on lance cette commande pour arrête notre système les propulseurs vont s'arrêtes automatiquement.



**Figure IV.15 : Le signal vocal de la commande arrêt (off)**

#### IV.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes commandes appliquées au quadri rotor, et cela afin d'obtenir un comportement en simulation le plus proche possible du comportement réel. Ensuite, nous avons synthétisé des régulateurs PID pour stabiliser notre système et améliorer sa précision et rapidité. Les commandes de la reconnaissance vocale ont été appliquées sur le modèle de simulation et ont donné de bons résultats.

### CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la conception d'un quadri rotor à commande vocale, nous pouvons dire que nous avons touché à un nouveau domaine de l'intervention de l'aéronautique, c'est le domaine de l'informatique.

Une description des différentes configurations des drones hélicoptères est donnée. Nous proposons aussi des configurations plus modernes réalisées très récemment.

Ensuite nous proposons une modélisation, en se basant sur les lois de la cinématique (Euler / Lagrange),

Le système de reconnaissance vocale était créé à l'aide de logiciel python 3 qu'il nous a aidé à utiliser des bibliothèques spécialement pour l'intelligence artificiel. Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'identification des paramètres du quadri rotor pour pouvoir contrôler les différents mouvements en utilisant la technique PID. De bons résultats de simulation sous python ont été obtenus.

En ce qui concerne les travaux futurs, il serait intéressant d'améliorer la stabilité du quadricoptère et en fonction du résultat final, d'améliorer également le comportement et la précision de la reconnaissance. De plus, il serait intéressant d'ajouter quelques fonctionnalités pour le système de reconnaissance vocale comme une base de communication pour contrôle le quadrirotor a une dans une large surface, ainsi que le contrôleur PID qui a pu être affiné à nouveau pour que la valeur de sa réponse soit meilleure.

### REFERENCES

- [1] D. Pesenti-Rossi, J.Peyrou, N.Baron, P.Allouch, S.Aubert, Z.Boueri, B.Livarek. IRM cardiaque : technologie actuelle, applications cliniques et perspectives futures. *Annales de Cardiologie et d'Angéiologie*. 62 (2013) 326-341.
- [2] P. Cohendet and E. Zuscovitch. L'évolution de la technologie spatiale et son impact économique: Reflexion sur la transposition du modèle européen aux pays du tiers-monde. *Advances in Space Research*. 3 (1983) 23-31.
- [3] N. Roberto, Z.E. Natalizio, G. Ruggeri, M. Poss, A. Molinaro. MeDrone: On the use of a medical drone to heal a sensor network infected by a malicious epidemic. *Ad Hoc Networks*. 50 (2016) 115-127.
- [4] J. Li, L. Deng, Y. Gong, and R. Haeb-Umbach, "An overview of noiserobust automatic speech recognition," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 22, no. 4, pp. 745–777, 2014.
- [5] Y. Wang and M. J. Gales, "Speaker and noise factorization for robust speech recognition," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 2149–2158, 2012.
- [6] T. Hain, L. Burget, J. Dines, P. N. Garner, F. Grézl, A. E. Hannani, M. Huijbregts, M. Karafiat, M. Lincoln, and V. Wan, "Transcribing meetings with the AMIDA systems," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 20, no. 2, pp. 486–498, 2012.
- [7] Shonda L. Bernadin and Rahul Patel, 'Evaluating the Performance of Voice Recognition Approaches for Autonomous Vehicular Systems' *Proceedings of the IEEE Southeast Conference*. (2015)
- [8] M. Hussein, H. Espinoza, Y. Ouhammou, M. Ladeira, R. Castiñeira. Towards a framework of key technologies for drones. *Microprocessors and Microsystems*. 77 (2020) 103142.
- [9] O. Zubeldia. L'armée française et l'utilisation des drones dans les missions de reconnaissance, de 1960 au conflit du Kosovo.. *Revue historique des armées*. 261(2010)62-71.
- [10] S. Allahham, M. F. Al-Sa'd, A. Al-Ali, A. Mohamed, A. Erbad. DroneRF dataset: A dataset of drones for RF-based detection, classification and identification. *Data in Brief*. 26(2019) 104313.



## REFERENCES

- [11] M. Hassanalian, A. Abdelkefi. Classifications, applications, and design challenges of drones. A review *Progress in Aerospace Sciences*. 91( 2017) 99-131.
- [12] R. Nouacer, M. Hussein, H. Espinoza, Y. Ouhammou, R. Castiñeira. Towards a framework of key technologies for drones. *Microprocessors and Microsystems*. 77 (2020) 103142.
- [13] Z. Yaou, Z. Wansheng, L. Tiansheng, & L. Jingsong. The attitude control of the four-rotor unmanned helicopter based on feedback linearization control. *WSEAS Transactions on Systems*. 4 (2013) 229-239.
- [14] D. Kao, M. Chen, W. Wu, J. Lin, F. Tsai. Drones Forensic Investigation: DJI Spark Drone as A Case Study. *Procedia Computer Science*. 159 (2019) 1890-1899.
- [15] A. Benallegue, M. Mokhtari and L. Fridman. High-order sliding-mode observer for a quadrotor UAV. *International journal of robust and nonlinear control*, 18 (2008) 427-440.
- [16] S. Thorel. Conception et réalisation d'un drone hybride sol/air autonome. MINES ParisTech - École nationale supérieure des mines de Paris. France (2014). Thèse de doctorat.
- [17] O. J. Woodman. An introduction to inertial navigation. Cambridge : University of Cambridge, Computer Laboratory ( 2007).
- [18] A. Torres, W. Hoffmann, I. Lamprecht. Thermal investigations of a nest of the stingless bee *Tetragonisca angustula* Illiger in Colombia. *Thermochimica Acta*. 458 ( 2007) 118-123.
- [19] I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic, R. Marino. An extended direct scheme for robust adaptive nonlinear control. *Automatica*. 27(1991) 247-255.
- [20] H. Bouadi M. Bouchoucha, M. Tadjine. Modelling and stabilizing control laws design based on backstepping for an uav type-quadrotor. *IFAC Proceedings Volumes*. 40 (2007) 245-250.
- [21] S. Bandyopadhyay, R. Ali-Fehmi. Breast Carcinoma: Molecular Profiling and Updates. *Clinics in Laboratory Medicine*. 33 (2013) 891-909.
- [22] E. Gonzalez , C. Noguera, W. D. Meuter. Distributed debugging for mobile networks. *Journal of Systems and Software*. 90 (2014) 76-90.
- [23] J. Lee, Y. Kagamihara, S. Kakei. Two modes of motor commands for tracking movement of the wrist. *Neuroscience Research*. 65 (2009) 202.

## REFERENCES

- [24] L. Yaou, L. Jiping, B. Helmut, D. Yunyun, L. Kuncheng. Microstructural abnormalities in the trigeminal nerves of patients with trigeminal neuralgia revealed by multiple diffusion metrics. *European Journal of Radiology*. 82 (2013) 783-786.
- [25] M A Imtiaz 2016 Isolated Word Automatic Speech Recognition ( ASR ) System using MFCC , DTW & KNN pp 106–110 (Asia Pacific Conference on Multimedia and Broadcasting (APMediaCast))  
vol 24, no 11, pp 2146–2157 (IEEE/ACM Trans. Audio Speech Lang. Process)
- [26] Plannerer, B. (2005). An introduction to speech recognition. Retrieved October 10, 2013, from <http://speech-recognition.de/pdlinintroSR.pdf>
- [27] Ovidiu T. (2005). The "SVM - Support Vector Machines" . Retrieved November 5, 2013, from <http://www.support-vector-machines.org!>
- [28] <https://wiki.pathmind.com/convolutional-network>
- [29] A. Tayebi and S. McGilvray, "Attitude Stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft", *IEEE Transaction On control System Technology* pp.562-571, May 2006.
- [30] F. MOHAMEDI et N. SACI. Simulation d'un drone sous MATLAB. En vue de l'obtention du diplôme master professionnel informatique. Université de Béjaia, faculté des Sciences Exactes, 2016.
- [31] Z. CHEKAKTA et A. ZOUBIRI. Conception, Modélisation et Commande d'un UAV de type Quadrirotor. Projet de Fin d'étude Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat. Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 21 juin 2016.
- [32] L. Laib and D.E. Maamria, "Commande d'un Quadrirotor", Mémoire d'ingénieur, École Nationale Polytechnique, Alger, 2011.
- [33] H. KHEBBACHE. Tolérance aux défauts via la méthode backstepping des systèmes non linéaires Application : Système UAV de type Quadrirotor. Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme de Magister, département d'électrotechnique, faculté de Technologie, université FERHAT ABBAS de Setif, 06/06/2012.
- [34] F. MORBIDI. Initiation à la robotique. Institution : Laboratoire MIS. Équipe Perception et Robotique. Université de Picardie Jules Verne. ME 1.1, licence professionnelle automatisme et robotique. Laboratoire MIS, équipe perception et robotique. Université de Picardie Jules Verne, 2007.

## REFERENCES

- [35] L. Rodolfo, A. Enrique López, R. Lozano, et C. Pégard, "Quad Rotorcraft Control Vision-Based Hovering and Navigation", ISSN 2193-1577 (electronic) *Advances in Industrial Control*
- [36] R. Lozano, P. Castillo, S. Salazar et D. Lara, "Stabilisation de véhicules aériens à décollage vertical : Théorie et application", *Rapport heurdiasync*, UMR CNRS 6599-UTC Compiegne, 2005
- [37] M.TADJINE H.BOUADI, M.BOUCHOUCHA. Sliding Mode Control based on Backstepping Approach for an UAV Type-Quadrotor. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 1(2). World Academy of Science, Engineering and Technology, 2007.
- [38] R. Boite et M. Kunt. *Traitement de la parole*, thèse de doctorat Presses Polytechniques Romandes. Lausanne (1987).
- [39] M.A.Anusuya, S.K.Katti. *Speech Recognition by Machine: International Journal of Computer Science and Information Security*. 6 (2009).
- [40] H.Cerf-Danon, M.El-Bèze, B.Merialdo. *Reconnaissance automatique de la parole*. Centre Scientifique IBM – France. Vol 4 – 1991.
- [41] A. Bendahmane. *Cours de Traitement Automatique de la Parole*. Polycopié de l'USTO. Algérie (2014).
- [42] M. Didiche. *Modélisation neuro-prédictive pour la classification phonétique*. Thèse Doctorat. Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie (2014).
- [43] Y.LeCun, Y.Bengio and G.Hinton. *Deep learning*. *Nature*. 521(2015) 436.
- [44] Dave Namrata. *Feature extraction methods LPC, PLP and MFCC in speech recognition*. *International Journal For Advance Research in Engineering And Technology*. 1(2013).
- [45] Robert Paul. *Le petit Robert*. Paris (1976).
- [46] L. Barrault. *Diagnostic pour la combinaison de systèmes de reconnaissance automatique de la parole*. École Doctorale 166 I2S « Mathématiques et Informatique ». Université d'Avignon, France (2008).
- [47] L. Orosanu. *Reconnaissance de la parole pour l'aide à la communication pour les sourds et malentendants*. École doctorale IAEM Lorraine. Université de Lorraine, Metz et Nancy. France (2015).
- [48] A. Dubois, D. Diallo, S.Clemencon, I. Khammassi, A. Diallo. *Prospective intelligence artificielle - État de l'art et perspectives pour la France* (2019).
- [49] A.Krizhevsky, I.Sutskever, G.E. Hinton. *Imagenet classification with deep convolutional neural networks*. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. (2012).

## REFERENCES

- [50] Y. LeCun, Y. Bengio. Convolutional networks for images, speech, and time series. *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. 10 (1995) 3361.
- [51] X. Zhang, J. Trmal, D. Povey, S. Khudanpur. Improving deep neural network acoustic models using generalized maxout networks. In: *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). International Conference on IEEE*. (2014).
- [52] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G.E. Hinton. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. In *Advances in neural information processing systems*. (2012) 1097-1105.
- [53] D.P. Kingma, and J. Ba. Adam: A Method for Stochastic Optimization, *CoRR*. vol. abs/1412.6980 (2014).
- [54] T.N. Sainath and C. Parada. Convolutional neural networks for small-footprint keyword spotting. In *Sixteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*.
- [55] A. BALLIT et M. BADRAN. Modélisation et contrôle d'un quadricoptère. Université Libanaise Faculté de génie - Al Hadath - Département Electrique, 2012.
- [56] Tommaso bersciani « Modelling, Identification and control of a Quadcopter helicopter » master thesis, Department of Automatic control lund university 2013
- [57] T. Bresciani, Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter. Lund University, October 2008
- [58] S. BOUABDALLAH. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. Mémoire présenté pour l'obtention du grade docteur en sciences, Ecole polytechnique fédérale LAUSANNE. Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur. Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2007.