

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2018

Faculté: Sciences de l'Ingénierat
Département: Electronique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé :
Etude et réalisation d'un système de Commande embarqué pour le contrôle d'un UAV (Unmanned Aerial Vehicles).

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electronique

Spécialité: Electronique des systèmes embarqués

Par :

DIARRA ZEGUE DIT MOUSSA

DEVANT Le JURY

Président : M. RAJAETI A/ Ghani	MCB	UBM Annaba
Directeur de mémoire: M. DOGHMANE Nouredine	Prof	UBM Annaba
Examineurs: M. FEZARI Mohamed	Prof	UBM Annaba
Mme HARIZE Saliha	MCA	UBM Annaba

Dédicaces

D'abord je rends grâce à DIEU TOUT PUISSANT et au prophète Mahomet (PSL). Je dédie ce présent mémoire de fin d'études à ma famille, notamment à :

-Mes très chers parents : Abou DIARRA et Nia FOFANA. Sans leurs sacrifices (souvent dans des conditions extrêmement difficiles), leurs conseils, leurs assistances et leurs bénédictions, je ne serai jamais arrivé à un tel niveau. Ils ont dédié et consacré leurs vies à notre éducation et à notre pleine réussite dans les études et dans la vie. Que Dieu leur accorde longue vie, et qu'il les bénisse pour toujours.

-Mes deux sœurs (Sandama DIARRA et Zeinabou DIARRA), à mon frère (Drissa DIARRA), ainsi qu'à mon cousin (Souleymane DIARRA). Tout au long de ce parcours, ils ont toujours été des soutiens et des sources de motivation pour moi, notamment dans les circonstances complexes. Que Dieu les bénisse et leur facilite le chemin de la réussite dans leurs études et projets futurs.

- Toutes les personnes, qui de près ou de loin, ont été aux côtés de ma famille, à un moment ou à un autre, pour me soutenir, afin que je puisse réaliser ce parcours.

-A toutes ces personnes (enseignants et professeurs) qui m'ont enseigné ou encadré du primaire jusqu'à l'université, et grâce à qui, j'ai pu gravir les échelons, jusqu'à ce niveau.

-A tous mes oncles, toutes mes tantes, ainsi que les amis de mes parents et de ma famille, qui ont toujours su être des nôtres, quelles que soient les circonstances et dont les soutiens, m'ont permis de réaliser ce parcours.

-A toutes les bonnes volontés, dont les actions, à un moment ou un autre, ont été prépondérantes, pour m'aider à poursuivre mes études et atteindre ce niveau.

Je dédie en fin, ce présent mémoire, à chaque personne, dont l'aide, les conseils et le concours, m'a/ m'ont permis de franchir tous les obstacles qui se sont dressés sur mon chemin, ou qui ont été à mes côtés ou de cœur avec moi, du début jusqu'à la fin de ce parcours en Algérie.

Remerciements

Je remercie une fois de plus DIEU TOUT PUISSANT, par la grâce de qui, j'ai pu effectuer ce parcours, également su et pu franchir les obstacles, et arriver au terme de ce parcours des études. Du plus profond de mon cœur, et pour l'éternité, j'exprimer ma très grande reconnaissance :

-A tous les membres de ma famille : pour leurs présences à mes côtés et leurs soutiens tout au long de ce parcours.

-A mon tonton Docteur Lassina TRAORE et toute sa famille : pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

-A mon tonton Hama BARRY et toute sa famille : pour leurs soutiens, leurs aides, leurs sacrifices pour moi, notamment au début de ce parcours jusqu'à aujourd'hui.

-A mon encadreur : le très émérite Professeur Nouredine DOGHMANE. J'ai eu un sacré privilège de l'avoir comme encadreur. Sans son concours, son assistance, son courage, et sa très grande disponibilité, je n'aurais pas pu réaliser ce travail et avoir les résultats escomptés dans le bref temps dans lequel a été effectué ce projet de fin d'études. A sa famille, et à l'école des Sciences Techniques d'Annaba, j'exprime également ma très profonde gratitude.

- Je tiens également à remercier Mr KOUADRIA Nasreddine pour avoir accepté d'être président de mon jury. Egalement, mes remerciements les plus sincères aux membres de mon jury, notamment le professeur FEZARI Mohamed et Mme HARIZE Saliha, pour avoir accepté de juger mon travail. Je leur adresse ma profonde considération.

- Au gouvernement et au peuple Algérien pour leur hospitalité, leur humanisme, leur fraternité. Ils m'ont permis d'avoir une très bonne formation de qualité dans leur université. Je ne pourrai jamais l'oublier.

-A l'Université Badji Mokhtar d'Annaba en général, et en particulier, l'ensemble des enseignants du département d'Electronique. Mention spéciale au chef du dit département : Dr Redjati, dont les conseils m'ont guidé vers cette spécialité. Je ne le regrette pas.

- A Mr KEBIR Abdeljalil, doctorant au département d'électronique de l'université Badji Mokhtar d'Annaba, dont l'aide a été d'un apport hautement majeur pour la réalisation et la réussite de ce projet.

- A Mr BOUDIBA Ouissam, qui nous a beaucoup aidés, surtout par ses conseils constructifs et par l'envoi de l'étranger de certains équipements non disponibles sur place, qu'il trouve ici l'expression de mes sincères respects.

- A Mr BOUAKIRA Hatem, qui a accepté de m'emprunter le châssis de son drone. Je lui serais toujours reconnaissant et il peut croire à mon amitié la plus sincère. Grand merci également à son papa.

- Aux responsables et agents des résidences universitaires (1000 lits et 19 Mai) de Sidi-Amar/Annaba, tant pour la qualité de l'hébergement que de la restauration durant tout mon parcours en Algérie.

-A tous mes camarades étudiants, avec qui, j'ai partagé les mêmes classes ou que j'ai connus tout au long de mon parcours en Algérie. Ils ont chacun, d'une manière ou d'une autre, été sources d'enrichissement social, culturel ou intellectuel, pour moi.

- A toutes les personnes proches ou lointaines, qui m'ont aidé d'une façon ou d'une autre, à pouvoir effectuer ce parcours durant toutes ces années d'études, et arriver notamment à réaliser le présent projet de fin d'études.

Que tous et toutes, de près ou de loin, reçoivent mes très vifs remerciements, pour toujours. Ce présent mémoire de fin d'études, porte en son âme, une reconnaissance éternelle.

Résumé

Depuis quelques années les avions sans pilotes appelés drones ou UAV sont devenus partie prenante de la vie quotidienne. Leurs domaines d'application sont très diversifiés allant des plus banales aux plus sensibles. En effet, ils sont maintenant utilisés aussi bien dans la vie de chacun du commun des mortels (par exemple délivrer des colis postaux ou faire le taxi volant) que dans la vie professionnelle (drones de combats par exemple). Ces avions sans pilotes sont commandés à distance via des liaisons sans fil à différentes portées (de quelques mètres à quelques dizaines de milliers de km). Les petits drones utilisent généralement des moteurs électriques sans balais (brushless). Ils sont alimentés à partir de batteries LiPo et de contrôleurs électroniques de vitesse (ESC). L'autonomie de ces petits drones est un challenge à lever. Notre projet de fin d'études consiste donc à réaliser un drone quadrirotor avec une commande embarquée sous forme d'un simple module ardupilot (APM 2.6) commandé à distance par radiocommande RC et un raspberry muni d'une caméra HD. L'objectif bien évidemment est d'assurer un vol stable avec une transmission d'images à travers une liaison WiFi.

Abstract

In recent years unmanned aircraft called UAVs have become part of everyday life. Their application fields are very diverse ranging from the most basic to the most sensitive. Indeed, they are now used as well in the life of the common of mortals (for example to deliver postal parcels or to make the flying taxi) than in professional life (combat drones for example). These unmanned planes are remotely controlled via wireless links at different ranges (from a few meters to a few tens of thousands of km). Small drones generally use AC brushless electric motors. They are powered from Li-Po batteries and electronic speed controllers (ESC). The autonomy of these small drones is a challenge to lift. Our master thesis consists in creating a quadrotor drone with an on-board command in the form of a simple Ardupilot module (APM 2.6) remotely controlled by RC radio and a Raspberry PI 2 equipped with an HD camera. The goal, of course, is to ensure a stable flight with image transmission over a WiFi connection.

ملخص

في السنوات الأخيرة أصبحت الطائرات بدون طيار جزءاً من الحياة اليومية. مجالات التطبيق الخاصة بها متنوعة جداً تتراوح بين العادية والأكثر حساسية. في الواقع، يتم استخدامها الآن كذلك في حياة البشر العاديين (على سبيل المثال لتقديم الطرود البريدية أو كسيارة أجرة طائرة) وكذلك في الحياة المهنية الأكثر تعقيداً (الطائرات المقاتلة بدون طيار على سبيل المثال). يتم التحكم في هذه الطائرات عن بعد عبر وصلات لاسلكية في نطاقات مختلفة (من بضعة أمتار إلى بضعة آلاف من الكيلومترات). تستخدم الطائرات الصغيرة محركات كهربائية بدون فرشاة. يتم تشغيلها عبر بطاريات وأجهزة تحكم في السرعة. الاعتماد على الطاقة الذاتية لهذه الطائرات الصغيرة بدون طيار يعتبر تحدياً يجب رفعه. هدف مشروع نهاية دراستنا هو إنشاء طائرة بدون طيار رباعية الطبقات مع وضع جهاز التحكم على متنها. يتم التحكم فيها عن بعد من قبل راديو. هذه الطائرة تكون مجهزة بكاميرا عالية الدقة.

Liste des abréviations

AC : Alternating Current
AFHDS : Automatic Frequency Hopping Digital System
APM : Auto Pilot Mega
BPSK : Binary Phase Shift Keying
CAN : Convertisseur Analogique NUMérique
CCW : Clockwise spinning motor
CAN : Convertisseur Numérique Analogique
CSI : Camera Serial Interface
CW : Counter-Clockwise spinning motor
dBm : decibel-milliwatts
DC : Direct Current
DDL : Degré De Liberté
DHCP : Dynamic Host Configuration Protocol
ESC : Electronic Speed Control
FM : Frequency Modulation
EEPROM : Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FPV : First-person view
GFSK : Gaussian frequency shift keying
GNU : GNU's Not UNIX (C'est un système d'exploitation)
GPIO : General Purpose Input/Output
GPS : Global Positioning System
HD: High Definition (1920x1080)
HALE: High-Altitude Long Endurance
HDMI : High Definition Multimedia Interface
HTTP : Hypertext Transfer Protocol
HTTPS : Hypertext Transfer Protocol Secure
I-BUS: Intelligent Input Bus
IP : Internet Protocol
JPEG : Joint Photographic Expert Groupe
Li-Po : Lithium Polymer
MALE : Medium Altitude Long Endurance
MIMO : Multiple Inputs Multiple Outputs
MJPEG : Motion Joint Photographic Experts Group
MLI : Modulation en Largeur d'Impulsions
OSD : On Screen Display
OS : Operating System
PCB : Printed Circuit Board
PC : Personal Computer
PID : Parallèle, Integral, Dérivée
PITCH : Tangage
PoE : Power over Ethernet
PPM : Pulse-position modulation
PV : Process Value
PWM : Pulse width modulation

QUAD-CORE : four independent units (Quatre unites indépendantes appelées CORE)
RCA: Radio Corporation of America
RC : Radio Commande
RJ45: Registered Jack 45
ROLL : Roulis
RPM : Revolutions per minute (tours par minutes)
SD : Secure Digital
SP : Set Point
SSH : Secure SHell
THROTTLE: Altitude
UAV : Unmanned Aerial Vehicle
USB : Universal Serial Bus
VLAN : Virtual Local Area Network
VLC : VideoLAN Client
WiFi : Wireless Fidelity
WLAN : Wireless Local Area Netowk
WPA-SSID : WiFi Protected Access-Service Set IDentifier
WPA-PSK : WiFi Protected Access-Pre-Shared Key
YAW : Lacet

Liste des figures

Titre de la figure	Page
Figure I.2 : Exemple d'un drone à voilure tournante	
Figure I.2 : Exemple d'un drone à voilure tournante	
Figure I.3 : Exemple d'un quadrirotor	
Figure I.4 : Exemple d'un drone de type HALE	
Figure I.5 : Exemple d'un drone de type MALE	
Figure I.6 : Exemple d'un Micro quadrirotor	
Figure II.1 : Structure générale d'un quadrotor	
Figure II.2 : Sens de rotation d'un quadrirotor .	
Figure II.3 : Mouvement lacet	
Figure II.4 : Mouvement Roulis et Tangage	
Figure II.5 : Exemples d'hélices pour drone.	
Figure II.6 : Les deux types d'hélices pour drone.	
Figure II.7 : Montage des quatre hélices d'un quadrirotor	
Figure II.8 : Exemple d'un moteur Brushless	
Figure II.9 : Electronic Speed Controler (ESC)	
Figure II.10 : Montage en étoile du stator du Moteur Brushless	
Figure II.11 : Alimentation triphasée délivrée par l'ESC	
Figure II.12 : Types de châssis (Configuration en « X » et en configuration en « + »)	
Figure II.13 : Batterie LiPo	
Figure II.14 : Exemple de caméra à embarquer sur quadricoptère	
Figure II.15 : Principe de fonctionnement d'une radiocommande	
Figure II.16 : Illustration du mouvement vertical	
Figure II.17 : Illustration du vol stationnaire	
Figure II.18 : Illustration du vol de translation	
Figure III.1 : Drone en tant qu'un système MIMO	
Figure III.2 : Force et Moment	
Figure III.3 : Moment résultant de deux forces	
Figure III.4 : Schéma du modèle du quadrirotor (les principaux couples et forces)	
Figure III.5 : Géométrie du Quadrirotor.	
Figure III.6 : Principe de 'Roll-pitch-yaw convention''	
Figure III.7 : Schéma de principe du rôle d'un contrôleur de vol	
Figure III.8 – Structure du PID traditionnelle	
Figure III.9 – Configurations des PIDs de l'ardupilot	
Figure IV.1 : Ardupilot APM 2.6	
Figure IV.2 : Constitution de l'Ardupilot APM 2.6	
Figure IV.3 : Fenêtre principale du software de l'Ardupilot APM 2.6	
Figure IV.4 : Connexion de l'Ardupilot APM 2.6 avec un PC	
Figure IV.5 : Configuration du débit	
Figure IV.6 : Configuration de la carte APM 2.6, installation de la Firmware dans la carte.	
Figure IV.7 : Configuration de la carte APM 2.6 , choix du type de quadricoptère	
Figure IV.8 : Calibration des accéléromètres de l'APM dans le logiciel Mission Planner.	
Figure IV.9 : Configuration de la radio calibration (RC FS-i6) dans le logiciel Mission Planner.	

Figure IV.10 : Configuration des modes de vol dans l'APM 2.6 à travers le logiciel Mission Planner	
Figure IV.11 : Radiocommande FlySKy FS i6	
Figure IV.12 : Récepteur FS-IA6B	
Figure IV.13 : EMAX, MT2204-2300KV	
Figure IV.14 : Hélices utilisées	
Figure IV.15 : photo du châssis utilisé	
Figure IV.16 : Mécanisme de fonctionnement de l'ensemble	
Figure IV.17 : Alimentation de l'APM 2.6 et du Récepteur	
Figure IV.18 : photo du drone complet réalisé	
Figure IV.19 : Appairage de la télécommande RC au récepteur	
Figure V.1 : Equipements nécessaires à la transmission vidéo	
Figure V.2 : Raspberry Pi 3, B	
Figure V.3 : Caméra HD du Raspberry Pi	
Figure V.4 : Caméra HD connectée au Raspberry Pi par le port CSI	
Figure V.5 : Port GPIO du raspberry	

Liste des tableaux

Titre du tableau	Page
Tableau II.1 : Caractéristiques du moteur Brushless 2280 KV	
Tableau II.2 : Pourcentage de charge d'une batterie Li-Po	
Tableau III.1 : Les Mouvements du drone vs forces générées par les moteurs	
Tableau IV.1 : Caractéristiques de APM 2.6	
Tableau IV.2 : Caractéristiques de la radiocommande RC FlySKy FS i6	
Tableau IV.3 : Caractéristiques du récepteur FS-IA6B	
Tableau IV.4 : Caractéristiques du moteur MT2204-2300KV	
Tableau V.1 : Caractéristiques du Raspberry	

SOMMAIRE

Intitulé	Page
Introduction générale	
Chapitre I : Généralité et Etat de l'art sur les UAVs	
I.1.Introduction	
I.2. Etat de l'art	
I.3. Généralités sur les UAV	
I.3.1.Définition d'UAV	
I.3.2.Bref Historique	
I.3.3. Classification des drones	
A. Selon la taille	
B. Selon le mode de propulsion	
I.3.4.Utilisation des drones	
I.3.5. Les applications des drones	
I.4. Drone civil : définition, avantages, législation et Les contraintes	
I.4.1.Les principaux avantages du drone	
I.4.2.Les principaux intérêts du drone	
I.4.3.Les contraintes	
I.5.Drone civil: la réglementation	
I.6.Conclusion	
Chapitre II: principe de fonctionnement et Modélisation D'un drone quadrirotor.	
II.1 Introduction	
II.2 Description générale d'un quadricoptère	
II.3 Fonctionnement	
II.3.1 Sens de rotation des voilures tournantes :	
II.3.2 Le mouvement vertical	
II.3.3 Le mouvement lacet	
II.3.4 Le roulis et le tangage	
II.4. Partie Mécanique & Electronique	
II.4.1. Composants	
II.4.1.1 Les hélices	
II.4.1.2 Moteurs électriques	
II.4.1.3 Contrôleurs de vitesse (ESC)	
II.4.1.4 Contrôleur de vol	
II.4.1.5 Le châssis :	
II.4.1.6 Les Batteries :	
II.4.1.7 La Caméra embarquée :	
II.4.1.8 La Radio-commande (RC) :	
II.4.1.9 Les Capteurs :	
II.5 Modes de vol :	
II.5.1 Vol vertical :	
II.5.2 Vol stationnaire :	
II.5.3.Vol de translation :	
II.6. Conclusion :	
Chapitre III : Algorithme de contrôle	
III.1 Introduction	
III.2 Le Contrôle du drone sur les trois axes du lacet, tangage et roulis	

III.3 Dynamiques du drone en vol	
III.4. Modélisation dynamique du Quadrirotor :	
III.5 Rôles du contrôleur de vol	
III.5.1 Régulateur Proportionnel P	
III.5.2 Régulateur Proportionnel Intégral P_I	
III.5.3 Régulateur Proportionnel Intégrale Dérivé P_I_D	
III.6 Régulateurs PID d'un contrôleur de vol	
III.7 Conclusion	
Chapitre IV : Réalisations Pratiques de l'UAV et du système de commande embarqué de contrôle.	
IV.1 Introduction	
IV.2 L'UAV Réalisé :	
IV.3 Le système de commande embarqué réalisé :	
IV.3.1 La carte ardupilot Mega (APM 2.6) :	
IV.3.1.1 Caractéristiques techniques de l'APM 2.6 :	
IV.3.1.2 Câblage de l'APM 2.6 :	
IV.3.1.3 Paramétrage de l'APM 2.6 :	
IV.3.2 Le récepteur FS-IA6B :	
IV.4 La radiocommande FlySKy FS - i6	
IV.5 Le récepteur FS-IA6B	
IV.6 Moteurs et hélices utilisés	
IV.7 Le châssis :	
IV.8 Mécanisme de fonctionnement de l'ensemble :	
IV.9 Calibrage des ESC avec la télécommande	
IV.9.1. Appairage de la télécommande au récepteur	
IV.9.2. Calibrage des ESC	
IV.10. Conclusion	
Chapitre V : système de transmission vidéo embarqué	
V.1 Introduction	
V.2 Raspberry Pi	
V.3 Camera HD Raspberry Pi	
V.4 Configuration du Raspberry Pi et de la caméra	
V.4.1 Activation du SSH dans Raspbian	
V.4.2 Configuration de la connexion WiFi du Raspberry	
V.4.3 Activation de la Caméra HD	
V.5 Méthodes de transmission vidéo	
V.5.1 streaming VLC	
V.5.2 MJPG-streamer	
V.6 Raspberry et caméra HD embarquée	
V.7 Conclusion	
Conclusion générale	
Perspectives	
Références bibliographiques	
Annexe	

Introduction générale :

Les UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) ou drones aériens, suscitent un très grand intérêt, depuis quelques années et ceci s'accroît au fil des ans. Loin d'être fortuite, cette raison est due au fait qu'ils sont utilisés dans divers domaines. En effet, les UAVs (ou drones aériens) font l'objet de nombreuses applications aussi bien pour les professionnels que pour les amateurs, dont entre autres : la cartographie, la prise de vue aérienne, la transmission vidéo, les applications militaires (reconnaitances, combats, surveillances, déminage...), dans l'Agriculture moderne (pour recueillir des données précises), l'environnement, la livraison des colis, la Modélisation des sols et les bâtiments en 3D, la diffusion Wi-Fi, l'intervention dans des milieux hostiles (zones radioactives, catastrophes naturelles ou zones inaccessibles pour les humains), et tout récemment en Chine et en Russie des « UAV – Taxi ». Les applications pour les prochaines années à venir, seront encore plus nombreuses et vont certainement toucher davantage de domaines, au regard des nombreuses recherches technologiques dédiées aux UAVs, dans divers endroits du monde.

La recherche ou la conception, dans le domaine des UAVs est essentiellement pluridisciplinaire. En effet, la conception d'un UAV nécessite et fait appel aux connaissances de plusieurs disciplines, notamment : l'électronique (surtout les systèmes embarqués), l'automatique, l'informatique, la mécanique, l'aéronautique, la robotique et les télécommunications. Ce présent mémoire, objet d'un projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en « Electronique des Systèmes Embarqués », met d'amont en aval, en exergue l'étude et la réalisation d'un système de commande embarqué pour le contrôle d'un UAV. Le modèle d'UAV choisi, est un quadrirotor ou quadricoptère (c'est-à-dire quatre hélices et quatre moteurs). Les drones quadrirotors sont parmi les plus complexes des objets volants, à cause de non linéarité de leur dynamique de vol, et le fort couplage de leurs variables.

L'objectif de ce travail est donc d'une part de concevoir un drone aérien de type quadrirotor, ensuite d'autre part, réaliser un système de commande embarqué en vue de pouvoir contrôler (piloter) cet UAV conçu.

PROBLEMATIQUE :

D'amont en aval de ce mémoire de fin d'études, le travail qui sera effectué vise à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les caractéristiques électroniques, électriques, mécaniques, automatiques, aérodynamiques voire robotiques d'un UAV de type quadricoptère ? (Partie Etude)
- Comment concevoir un système de contrôle embarqué dédié au contrôle d'un UAV ? Il s'agira essentiellement de garantir la stabilité de cet engin volant même en présence de phénomène imprévisible telle qu'une rafale de vent ou bien encore la présence d'un obstacle ...etc.
- Pourvoir ajouter d'autres circuits électroniques permettant par exemple de capter et de transmettre des images en temps réel.

Chapitre I : Généralités sur les UAVs

I.1 Définition d'un drone (encore appelé UAV) :

Un drone ou Unmanned Aerial Vehicle (UAV) est un aéronef sans pilote à bord, et qui peut voler de façon autonome ou être contrôlé à distance depuis le sol, par le moyen d'un système de commande embarqué (radiocommande, smartphone...). Le mot « drone » est une extrapolation d'un terme anglais qui signifie « faux-bourdon » (le mâle de l'abeille). En français, le terme est employé pour désigner des véhicules aériens, terrestres, de surface ou sous-marins, alors que la classification anglo-saxonne distingue chaque type d'appareil.

La taille d'un drone aérien peut aller de quelques centimètres pour les modèles miniatures à plusieurs mètres pour les drones spécialisés (surveillance, renseignement, combat, transport, loisirs). L'autonomie en vol va de quelques minutes à plus de 40 heures pour les drones de longue endurance. A titre d'illustration, en octobre 2014, un drone spatial nommé X-37B lancé par l'armée américaine est revenu sur Terre après 22 mois passés à naviguer dans l'espace. Les UAVs conçus pour le loisir (comme celui que nous allons concevoir) peuvent avoir une autonomie allant de 45 minutes à quelques heures.

Le véhicule aérien sans pilote à long terme décrit les drones volants et les hélicoptères. S'il fonctionne dans l'air, nous l'appellerons un *UAV*. Le drone amateur le plus populaire est le quadrirotor ou quadricoptère. Enfin, la caractéristique essentielle des drones est qu'ils sont récupérables, ce qui permet de les réutiliser. Cela les différencie des missiles, avec lesquelles ils sont souvent confondus par beaucoup de gens.

Les UAVs ou drones aériens sont en mesure d'intégrer et faire fonctionner ensemble plusieurs systèmes embarqués, comme entre autre : transporter des caméras, des capteurs, des équipements de communication ou d'autres dispositifs.

I.2. Etat de l'art sur les UAVs :

Le développement des UAVs, est la résultante des progrès scientifiques et technologiques opérés en matière de propulsion, de matériaux, de l'électronique, des ordinateurs, des capteurs, des instruments de navigation, etc.

De nos jours les UAVs jouent un rôle très prépondérant dans l'aviation moderne. En effet, les nouvelles générations des drones, aptes à effectuer un vol stationnaire, sont conçues pour être petits, plus légers et avec certaines fonctions d'autonomies. [1] [2] [3] [4] [5].

Contrairement aux drones à voilure fixe, le principe de fonctionnement des UAV à voilure tournante (exemple le quadrirotor), objectif de notre mémoire, est basé sur le principe des

Hélicoptères. Il s'agit d'engins volants, appelés également aérodyne, dont la sustentation est assurée par un ou plusieurs rotors. Ces rotors, ou voilures tournantes, garantissent la **portance** de l'appareil à savoir la force nécessaire pour que l'engin puisse s'élever et se maintenir en altitude [1] [2] [3] [4].



Figure I.1 : Exemple d'un drone à voilure fixe



Figure I.2 : Exemple d'un drone à voilure tournante



Figure I.3 : Exemple d'un quadrirotor

I.3 Présentation des UAV :

I.3.1.Bref Historique :

La simplicité de la configuration des quadrirotors, ainsi que leurs capacités à supporter des charges utiles et leurs couts réduits, sont autant de raisons qui ont motivé plusieurs travaux de recherche sur ces UAVs. Au lendemain de la première année du 3^e millénaire, plusieurs centres de recherche, notamment des groupes de spécialistes en aéronautique, en électronique ou en robotique ont commencé à publier les premiers résultats à propos de la modélisation et de la commande de cet hélicoptère à quatre rotors. Actuellement, de nombreux projets de recherche sont basés sur des jouets. Des chercheurs en ont conçus en embarquant plus de capteurs et des systèmes de communication. Peu de groupes s'intéressent à la conception et la réalisation des quadrirotors, et la minorité de ces groupes le fait de manière optimale (considération de la conception et le contrôle).

I.3.2 Classification des drones :

Les drones peuvent être répartis selon plusieurs critères : la taille, l'altitude, les systèmes de contrôle, etc.

A. Selon la taille :

On distingue les drones Haute Altitude Longue Endurance (HALE), Moyenne Altitude Longue Endurance (MALE), micro drones et mini drones. Ces catégories sont résumées ci-après :

- **HALE :** Pour "High-Altitude Long Endurance", ce sont des drones de grande taille, le plus souvent à voilure fixe. Ils sont capables de rester très longtemps en vol et de collecter des informations sur de très longues périodes (entre 12 et 48 heures).
- **MALE :** Pour "Medium Altitude Long Endurance", sont utilisés pour des vols de longue durée à moyenne altitude opérationnelle, ayant une grande autonomie.

Ces deux types de drones font partie de la classe de grande taille. Ils peuvent embarquer des armes, ce qui nécessite généralement d'avoir un humain dans la boucle, ce dernier doit garder la décision de tir et pouvoir à tout moment annuler la mission.

- **Mini drones :** Ce sont des drones légers et de taille réduite (jusqu'à quelques kilogrammes et d'une envergure jusqu'à 1 à 2 mètres) ils ont une autonomie relativement faible (de 10 à 30 minutes) et généralement utilisés pour l'observation de zones difficiles à l'accès.
- **Micro drones :** Ce sont des drones ayant des tailles variant du centimètre à quelques dizaines de centimètres. Généralement propulsés électriquement. Ils permettent de faire des vols à l'intérieur. ils emportent de faibles charges.



Figure I.4 : Exemple d'un drone de type HALE



Figure I.5 : Exemple d'un drone de type MALE



Figure I.6 : Exemple d'un Micro quadrirotor

B. Selon le mode de propulsion :

On peut aussi classer les drones selon le fonctionnement aérodynamique :

- **Les drones à voilures fixes :** sont des drones utilisant les ailes fixes dans leur mode de déplacement, qui sont soit :

- ✓ **Plus lourd que l'air** : type avion.
- ✓ **Plus léger que l'air** : type Dirigeable.
- **Les drones à ailes battantes** : de type oiseau ou insecte.
- **Drones à voilures tournantes** : Ce type présente les avantages suivants :
 - ✓ Un décollage et atterrissage verticaux.
 - ✓ Sont capables d'effectuer un vol stationnaire à basse vitesse et à faible altitude.

Les drones à voilure tournante se subdivisent en plusieurs sous-classes dont notamment **Mono-rotors, birotors, tri-rotors, et Quadrirotors.**

I.3.3 Utilisation des drones :

Les drones sont utilisés pour plusieurs besoins. En ce qui concerne, le domaine militaire par exemple, il y'a entre autres :

- La préservation maximale de la vie des soldats en tenant l'information disponible en temps réel.
- La prise de décision tactique en générant des modifications majeures dans la manière de concevoir non seulement les opérations aériennes, mais, au-delà, les principes mêmes des opérations inter armées.
- Les missions principales telles que la reconnaissance, l'espionnage et l'écoute.

Dans le domaine civil, ils sont également utilisés entre autres pour :

- La recherche et le sauvetage dans les endroits inaccessibles et dangereux, comme les montagnes, la mer et les centrales chimiques.
- La reconnaissance des frontières, l'évaluation des dommages, la surveillance des feux de forêt, des lignes électriques haute tension, le survol des régions éloignées, montagneuses et peu accessibles, des zones de pêche et des routes maritimes très fréquentées et dangereuses, les niveaux de pollution atmosphérique ou en mer, la surveillance du trafic routier, les tracés terrestres et la cartographie.
- la surveillance des pipelines de pétrole et de gaz, surveillance de cargaisons dangereuses, des sources d'eau, des vestiges archéologiques, des filons de matières premières ou de combustible.
- Les prises de vue aériennes, ainsi que la transmission vidéo (mode temps réel ou mode enregistrement).

I.3.4 Les applications des drones :

Les drones peuvent faire un nombre important d'applications, parmi lesquelles on peut citer [2] :

- Services publics et collectivités (Assistance police, Enquête écologique...)
- Agriculture (Surveillance des zones agricoles, Analyse des cultures...)
- Cartographie (géomètre expert, Analyse numérique des terrains, reconstitution 3D...)
- Architectures et urbanisme (Etude de chantier ou de grands ouvrages sur des angles de vue permettant une meilleure implantation).
- Intervention en sécurité civile (Intervention dans des situations d'urgence afin d'apporter un soutien aux autorités locales pour la surveillance de zones sinistrée).
- Tourisme et suivi d'évènements (Films et photos touristiques avec des angles de vue ne peuvent être effectués avec du matériel standard).
- Missions dangereuses (détection de gaz toxiques, radiations).
- Surveillance :
 - ✓ Surveillance de territoire réglementée (chasse, pêche...)
 - ✓ Surveillance de chantiers routiers, ferroviaires, bâtiments et travaux publics...)
 - ✓ Surveillance des frontières
 - ✓ Surveillance du trafic routier et du transport de matières dangereuses.
 - ✓ Contrôles de zones à risques, Surveillance d'installations (panneaux solaires, éoliennes, antennes, etc.).

I.4 Drone civil : définition, avantages, législation et Les contraintes :

Un drone civil c'est un robot ou aéronef volant, truffé de capteurs, piloté à distance et qui permet d'embarquer un appareil photo et une caméra.

I.4.1. Les principaux avantages du drone civil :

Parmi la ribambelle d'avantages des drones civils, on peut citer entre autres :

- -Mise en œuvre rapide par une unité proche d'une zone d'opération ou au contact et dont les données sont exploitées sur place [5].
- Souplesse d'opération (envoi, récupération, réutilisation).

- Gain de temps par une mise en œuvre rapide
- Accès à des endroits difficiles voire impossibles pour l'homme.
- Evolution dans des zones difficiles d'accès
- Inspection de zones dangereuses ou polluées
- Mise en action rapide
- Le plus économique des moyens aériens
- Vol stationnaire
- Vision 360°
- L'absence d'équipage à bord permet des missions de plus longue Durée [1].
- La réduction des coûts financiers de conception, d'entretien [1].
- Limiter et éviter des risques humains dans les environnements dangereux [2].
- peuvent exécuter des missions de grande flexibilité [3].
- La capacité de charge utile relativement haute et variée [4]
- La mobilité stratégique car ils sont en générale aérotransportable et trouveront une place sur des plates-formes d'envol marine réduite comme des patrouilleurs de haute mer [5].

I.4.2. Les principaux intérêts du drone :

Intrinsèquement, l'utilisation d'un drone possède les avantages suivants :

- Angles de vue originaux
- Coût plus faible qu'un hélicoptère
- Précision des prises de vues
- Le drone est également un formidable outil de communication moderne et dynamique par la déclinaison de notre concept 4D
- Valorisation de l'image de marque
- Optimisation et différenciation de sa communication
- Mise en valeur d'actions spécifiques
- Captation de nouveaux clients et partenaires.

I.4.3. Les contraintes rencontrées par les drones :

Parmi les bémols auxquels sont confrontés les drones, il y'a entre autres :

- En tant qu'engins non habités et présentant des risques de défaillances techniques irrécupérables, ils nécessitent des certifications rigoureuses pour être autorisés à voler.
- Il y a très peu d'éléments disponibles en matière d'étude de fiabilité, de concept de maintenance sur les drones en général et de couts d'acquisition et de soutien en particulier [5].
- La photographie aérienne peut être sujette à des réclamations pour atteinte à la vie privée et liberté personnelle.
- Problème de tenue mécanique suites aux dommages subies pendant les atterrissages forcés [6].
- Règlementation contraignante
- Pilotage « sensible »

I.5 Drone civil: la réglementation:

L'usage des drones, fait l'objet d'une réglementation dans plusieurs pays. Par exemple en Algérie, la loi relative aux drones inclut des dispositions qui portent à la fois sur le droit civil ainsi que le droit pénal. D'autre part, le pilotage des drones est également encadré par le code des transports et le code de l'aviation civile [9]. Tant pour la sécurité des aéronefs que celle des personnes au sol, ou encore pour le respect de la vie privée et du droit à l'image : il est très important que les pilotes connaissent et appliquent ces textes. Les fabricants de drones ont l'obligation de fournir une notice d'information concernant les bonnes pratiques et règles à respecter pour l'usage d'un drone avec caméra ou non.

I.6 Conclusion :

Ce chapitre présente d'une manière succincte les définitions et les descriptions des drones. A cet effet, un historique et quelques exemples de ce type d'objets volants ont été présentés. Il s'agit donc d'un état de l'art sur les drones. De même, nous avons rappelé que l'utilisation des drones est réglementée à travers le monde et notamment en Algérie.

Chapitre II : Principe de fonctionnement D'un drone

quadrirotor.

Dans ce deuxième chapitre, il s'agit d'aborder les principes qui régissent le fonctionnement des quadrirotors et mettre en exergue la modélisation dynamique (ou mathématique) en vue de la commande du système d'un quadrirotor.

II.1. Introduction :

L'un des paramètres complexes de la conception et du contrôle d'un UAV est de pouvoir déterminer et comprendre profondément ses différents mouvements, ainsi que sa dynamique et par conséquent ses équations dynamiques (ou mathématiques). Cela est indispensable non seulement pour la conception du contrôleur de vol de l'UAV, mais également pour s'assurer qu'il existe une compatibilité entre les simulations de son comportement et la réalité lorsque la commande est appliquée pour son contrôle. Pour rappel, le quadrirotor est classé dans la catégorie des systèmes volants les plus complexes vu le nombre d'effets physiques qui affectent sa dynamique à savoir :

- ✓ les effets aérodynamiques.
- ✓ la gravité.
- ✓ les effets gyroscopiques.
- ✓ les frottements et le moment d'inertie [10] [11].

Cette complexité résulte essentiellement du fait que chaque mode de vol a son expression propre pour chacun de ces effets. Ainsi les modèles dynamiques du quadrirotor que nous allons concevoir, vont changer en fonction des tâches planifiées et en fonction des milieux de navigation définis.

II.2. Description générale d'un quadrirotor :

Un quadrirotor est un robot mobile aérien à quatre rotors défini dans l'espace par 6 DDL [9]. Ces 4 rotors sont généralement placés aux extrémités d'un châssis ou cadre, et l'électronique de contrôle est habituellement placée au centre de ce châssis ou cadre. Afin d'éviter à l'appareil de tourner sur lui-même sur son axe de lacet, il est nécessaire que deux hélices tournent dans un sens, et les deux autres dans l'autre sens. Pour pouvoir diriger l'appareil, il est nécessaire que chaque couple d'hélice tournant dans le même sens soit placé aux extrémités opposées d'une branche du châssis ou du cadre.

Le fonctionnement d'un quadrirotor est assez particulier. En faisant varier astucieusement la puissance des moteurs, il est possible de le faire monter/descendre, de l'incliner à gauche/droite (roulis) ou en avant/arrière (tangage) ou encore de le faire pivoter sur lui-même (lacet) [14], le quadrirotor a six degrés de libertés : trois mouvements de rotation et trois mouvements de

translation. Ces six degrés doivent être commandés à l'aide de quatre déclencheurs seulement ;
Donc c'est un système sous actionné (le nombre des entrées inférieur au nombre des sorties).

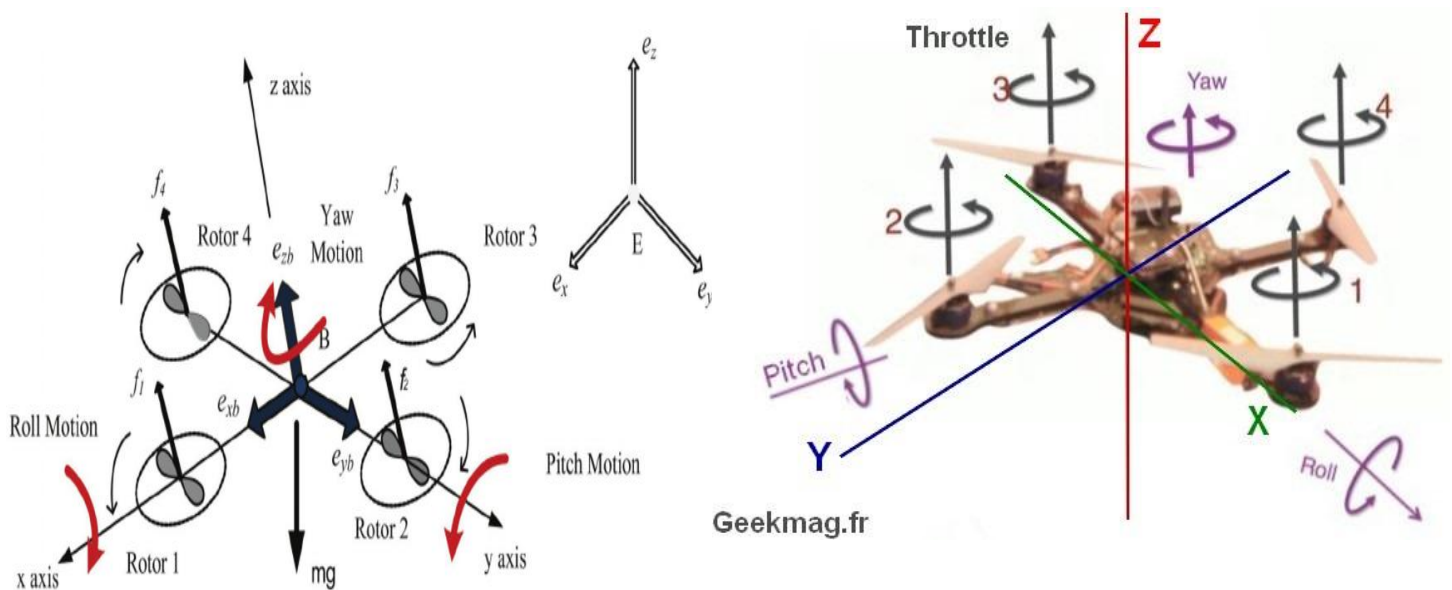


Figure II.1 : Structure générale d'un quadrotor

II.3 Fonctionnement

Le fonctionnement d'un quadricoptère est assez particulier. On distingue quatre mouvements possibles : le vertical, le lacet, le roulis et tangage (respectivement en anglais : throttles, yaw, roll and pitch).

II.3.1 Sens de rotation des voilures tournantes :

Afin d'éviter un mouvement de lacet (l'appareil tourne sur lui-même), il est nécessaire que deux rotors tournent dans un sens et que les deux autres tournent dans l'autre sens. En plus, pour diriger l'appareil, les rotors tournant dans le même sens doivent être placés l'un en face de l'autre (voir la figure II.2). De plus, pour faciliter la gestion des commandes et les calculs, le rotor numéro A est choisi comme l'avant du micro hélicoptère.

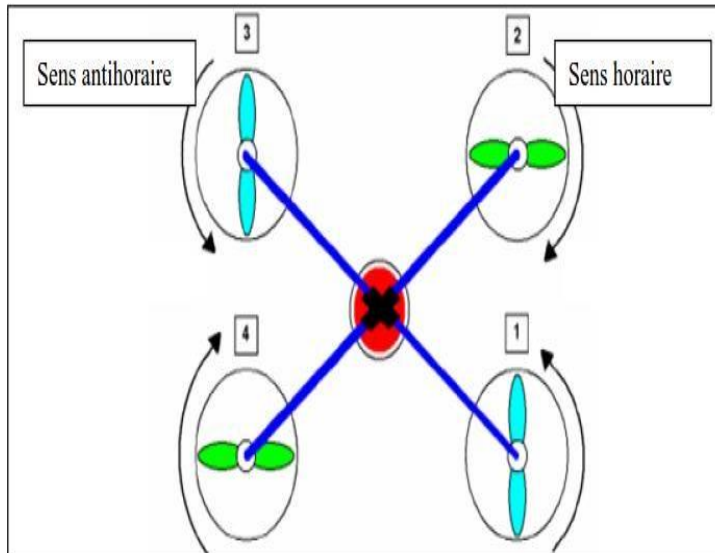


Figure II.2 : Sens de rotation d'un quadrirotor .

II.3.2 Le mouvement vertical (Throttle)

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

II.3.3 Le mouvement lacet (Yaw)

Le mouvement de lacet sert à faire tourner le quadricoptère sur lui-même. Il est obtenu en augmentant la vitesse des hélices à pas normal et en diminuant proportionnellement la vitesse des hélices à pas inversé.

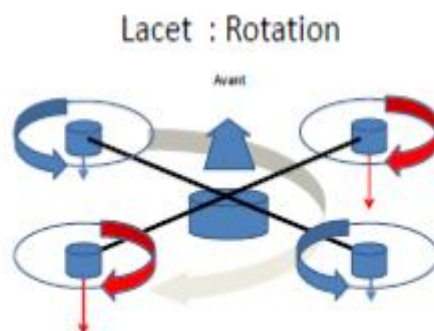


Figure II.3 : Mouvement lacet

II.3.4 Le roulis et le tangage (Roll and Pitch)

Le roulis et le tangage sont des mouvements assez similaires visant à pencher le quadricoptère sur un axe ou sur un autre. Ce mouvement est obtenu en augmentant la vitesse d'une hélice et en abaissant proportionnellement la vitesse de l'hélice opposée (hélice du même couple).

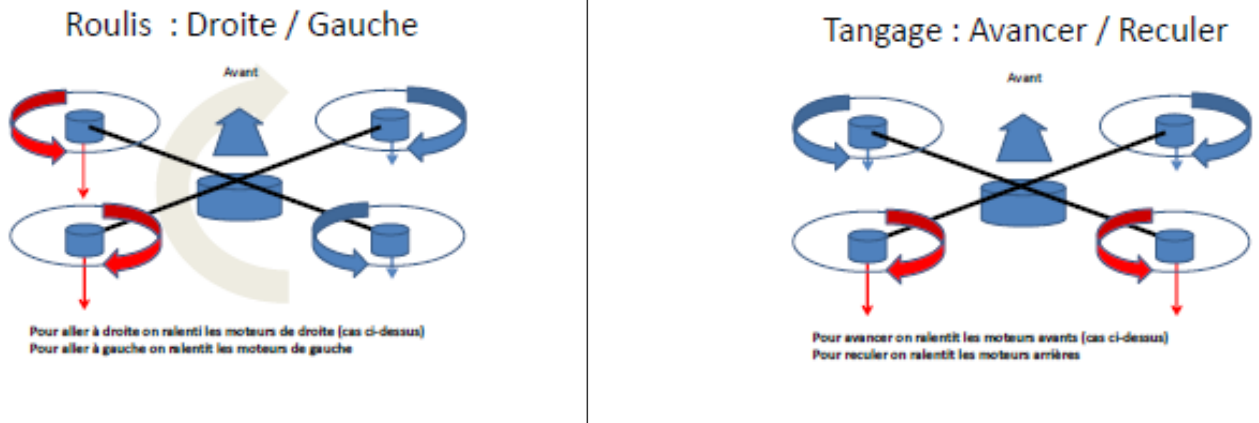


Figure II.4 : Mouvement Roulis et Tangage

II.4 Partie Mécanique & Electronique

Dans la présente partie, nous allons parler des différents composants qui entrent dans la réalisation d'un quadricoptère.

II.4.1 Composants

La fabrication d'un quadricoptère nécessite un nombre important de composants. Nous pouvons citer entre autres :

- ✓ Le châssis,
- ✓ 04 ESC (contrôleurs électroniques des moteurs brushless),
- ✓ 04 moteurs brushless,
- ✓ 04 hélices (02 pour le sens horaire et 02 autres pour le sens anti-horaire),
- ✓ Le contrôleur de vol,
- ✓ Des capteurs (accéléromètres, GPS ...etc),
- ✓ Batterie pour l'alimentation électrique,
- ✓ 01 récepteur selon la radiocommande utilisée,
- ✓ Eventuellement une caméra embarquée,
- ✓etc

II.4.1.1 Hélices

Un quadricopter est constitué de deux hélices standard (sens horaire) et deux hélices pusher (sens anti horaire) rotation contraire [3].



Figure II.5 : Exemples d'hélices pour drone.

La désignation des hélices est une double valeur du type 8*5. La première valeur indique la longueur de l'hélice en pouces (inches en anglais qui correspond à 2.54 cm). Le pas d'une hélice est défini comme étant la distance théorique d'avancement de l'hélice en un tour complet. Plus l'hélice est grande, plus elle va apporter de portance et de stabilité. Une grande hélice sera moins agile, vive et réactive. La seconde valeur indique le « pas de l'hélice » 4 – 4,5 – 5 – 5,5 -...etc. Plus le pas est important, plus l'hélice va brasser d'air en 1 tour, et plus elle va nécessiter d'énergie.

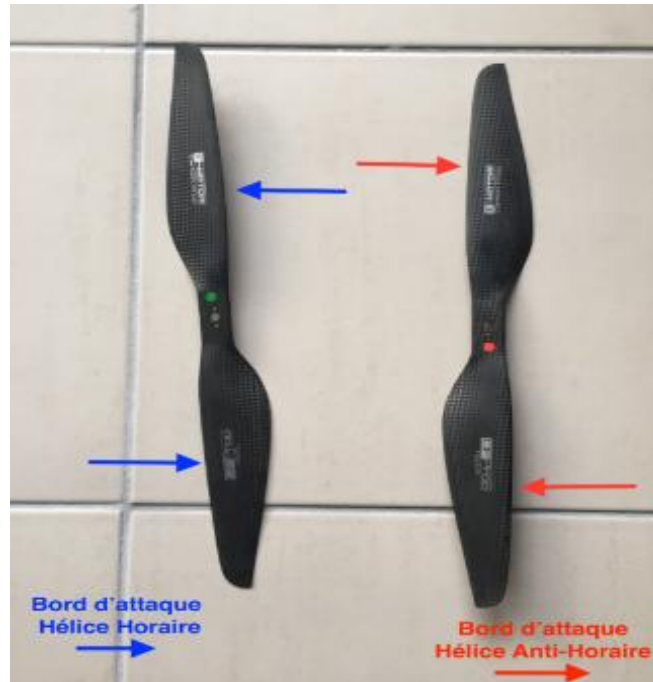


Figure II.6 : Les deux types d'hélices pour drone.

Sur la figure II.6 on arrive à différencier entre les deux types d'hélices présentes dans un quadrirotor à savoir celles qui tournent selon le sens horaire et celles qui tournent selon le sens anti-horaire. Dans les deux cas le bord d'attaque (indiqué par des flèches rouges ou bleues) est le bord qui va brasser l'air en premier. L'autre bord s'appelle bord d'écoulement et qui présente généralement un angle plus aigu. Sur la figure II.7 les moteurs M1 et M3 sont équipés d'hélices horaires alors que les moteurs M2 et M4 sont équipés d'hélices anti-horaires. L'emplacement de ces hélices doit respecter le sens avant du quadrirotor comme l'indique la même figure.

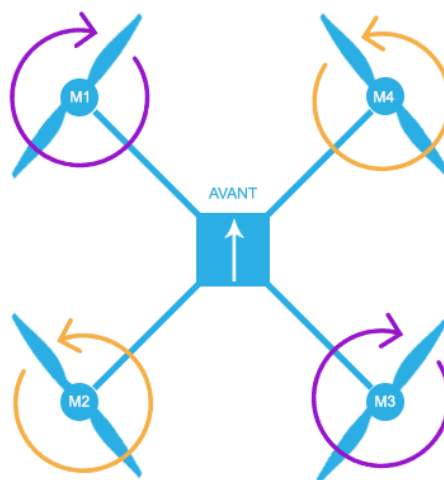


Figure II.7 : Montage des quatre hélices d'un quadrirotor

II.4.1.2 Moteurs électriques

Quatre moteurs sans balai (brushless) sont nécessaires pour le quadrirotor. 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 *tours/V* fonctionnera à 12000 *tours/min* s'il est alimenté en 12 V. Sur les moteurs sans balai utilisés en modélisme, les bobinages en cuivre sont montés sur le stator et les aimants sur le rotor, à l'inverse des moteurs électriques conventionnels [6].



Figure II.8 : Exemple d'un moteur Brushless

Le choix de la puissance des quatre moteurs est primordial. En effet, la puissance de ces quatre moteurs doit être suffisante pour qu'elle puisse soulever le drone avec tout son poids y compris les équipements embarqués en particulier la batterie qui doit peser le plus. La force totale F délivrée par les quatre moteurs ($F=F_1 + F_2 + F_3 + F_4$) doit être supérieure au poids total du drone (avec tous les équipements embarqués) pour qu'il puisse voler.

Pour identifier les caractéristiques des moteurs brushless utilisés dans les drones il suffit de lire les informations qui les concernent. Ces informations peuvent être facilement collectées à partir des noms des moteurs utilisés. En effet, Généralement les moteurs brushless sont nommés avec un numéro comme par exemple : Brushless Motor 3508 650 KV 4-6S.

Alors dans cet exemple nous aurons comme informations sur le moteur :

- 3508
 - 35 mm de diamètre
 - 08 mm de hauteur
- 650 KV ou 650 RPM
 - 650 Tours par minute par volt
- 4-6S
 - Nombre de cellule de la batterie

Mais le premier critère de choix est la poussée du moteur. Par exemple la poussée d'un moteur brushless 2280 KV est décrite sur le tableau suivant:

Type de Moteur	Tension (V)	Type d'hélice	Intensité (A)	Poussée (Gr)	Puissance (W)	Efficacité (Gr/W)	Vitesse (tour/mn)
MT1806-2280KV	7,4	5030 Carbon Fibre Prop	4,4	210	32,6	6,4	13 530
		APC 6*4	6,8	280	50,3	5,6	12 030
		5*4,5 Three- blade Prop	6,2	240	45,9	5,2	12 330
	11,1	5030 Carbon Fibre Prop	8	380	88,8	4,3	18 510
		APC 6*4	11,3	460	125,4	3,7	15 160
		5*4,5 Three- blade Prop	10,6	410	117,7	3,5	15 910

Tableau II.1 : Caractéristiques du moteur Brushless 2280 KV

Ce tableau permet d'estimer la poussée produite en fonction du type d'hélice utilisée (dans le tableau ci-dessus, le moteur dégagera une poussée suffisante (> à 300 gr) s'il est utilisé avec une batterie 3 S (3 cellules de 3.7 V chacune soit en total 11,1V), 7,5 ampères et des hélices en fibre de carbone 5×3.

Le KV permet d'indiquer le nombre de rotations du moteur par minute pour 1 volt. Par exemple un moteur de 500 kv alimenté par une batterie 3S (11,1v) tournera à $500 \times 11,1 = 5\,550$ tours par minute. La tension (« voltage ») de la batterie dépend du nombre de cellules que contient la batterie. Chaque cellule « S » d'une batterie LiPo donne 3,7V, ainsi une batterie 1S = 3,7V; 2S = 7,4V; 3S = 11,1V, 4S = 14,8v...

La poussée en grammes d'un moteur est importante mais seule elle est insuffisante. En effet, la performance d'un moteur est calculée comme étant le rapport entre la poussée en grammes et la puissance en Watts. Une bonne efficacité montre que le moteur est de bonne qualité, car il a une faible déperdition. Ceci, va garantir à une bonne qualité de vol.

Notons enfin, une bonne efficacité ne peut être atteinte que si on adapte d'une manière optimale le moteur, le contrôleur de vitesse ESC et l'hélice. En effet, ils travaillent d'une manière homogène et forment un ensemble.

II.4.1.3 Contrôleurs de vitesse (ESC)

Les ESCs (*Electronics Speed Controler*) convertissent les DC en AC pour alimenter les moteurs synchrones sans balai (brushless). Chaque moteur a besoin d'un ESC.



Figure II.9 : Electronic Speed Controller (ESC)

Les ESC sont en réalité des variateurs de vitesse pour des moteurs brushless synchrones triphasés généralement montés en étoile : figure II.10 (Rappelons qu'il existe aussi des moteurs à courant continu DC brushless). Le principe est basé sur la réception d'une valeur MLI ou Modulation en Largeur d'Impulsions (PWM) envoyée par la télécommande. Cette commande est alors traduite en une alimentation triphasée avec une fréquence particulière qui va faire tourner les moteurs (figure II.11). La vitesse des moteurs synchrones est proportionnelle à la fréquence d'alimentation. Les caractéristiques d'un ESC peuvent être directement connues à travers sa dénomination, par exemple : ESC 30A 3-4S

- 30A veut dire qu'il supporte un courant jusqu'à 30A
- 3-4S définit le nombre de cellules de la batterie qui l'alimentera et donc son voltage (Pour une batterie LiPo 3.7V / Cellule).

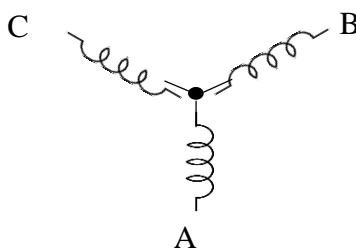


Figure II.10 : Montage en étoile du stator du Moteur Brushless

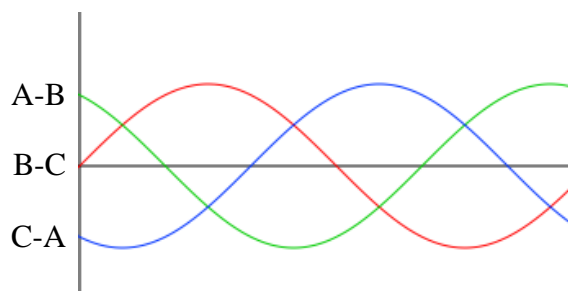


Figure II.11 : Alimentation triphasée délivrée par l'ESC

II.4.1.4 Contrôleur de vol

C'est une carte électronique ou plutôt un ordinateur embarqué, équipé de capteurs très précis (ses entrées), qui va traiter les consignes du pilote envoyées à l'émetteur ainsi que les informations envoyées par ses capteurs et va transmettre à travers ses sorties 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. 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 [6]. Il existe différents types de contrôleur de vol avec des spécificités et des options différentes. En effet, Certains contrôleurs de vol peuvent être équipés de diverses options comme par exemple

- gyroscope,
- accéléromètre,
- navigation,
- baromètre,
- GPS,
- sonar
- OSD pour On Screen Display (affichage sur l'écran)
- bluetooth
- etc.

D'autres peuvent avoir des logiciels (nécessaires à la configuration et à la programmation) en "open source" ou bien en "closed source" :

- **Exemples de contrôleur de vol open source**
 - APM
 - PX4
 - Rushduino FC V1.1 USB version
 - Flip32 Acro Controller
 - ...etc
- **Exemples de contrôleur de vol closed source**
 - NAZA MV2
 - NAZA light
 - NAZE 32
 - ...etc

II.4.1.5 Le châssis :

Sur les quadricoptères, le châssis comporte quatre bras qui forment une croix. Suivant les règles de la construction mécanique, il existe plusieurs configurations possibles : en « X », en « + » et en « H ».

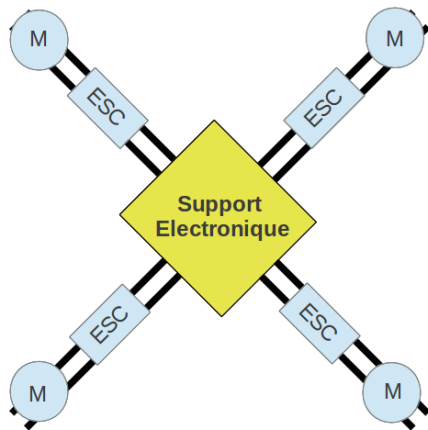


Figure II.12 : Types de châssis (Configuration en « X » et en configuration en « + ».

Le châssis va déterminer l'envergure totale du quadricoptère. Le type du châssis utilisé affectera les caractéristiques de l'ensemble des composants (type et taille, c'est-à-dire poids des hélices, des moteurs, de la batterie, des fixations...).

II.4.1.6 Les Batteries :

Les batteries utilisées sur un quadricoptère sont essentiellement des « Lithium Polymère » (Li-Po). Elles sont issues d'une technologie qui permet d'avoir un très bon rapport *poids/puissance*. Un élément Li-Po (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. Un chargeur spécifique est à prévoir ainsi que des règles de sécurité très strictes car ces batteries peuvent exploser en cas de mauvaise manipulation. A noter que ces batteries doivent être stockées, en cas de non utilisation, à des températures relativement basses de l'ordre de 5°C.

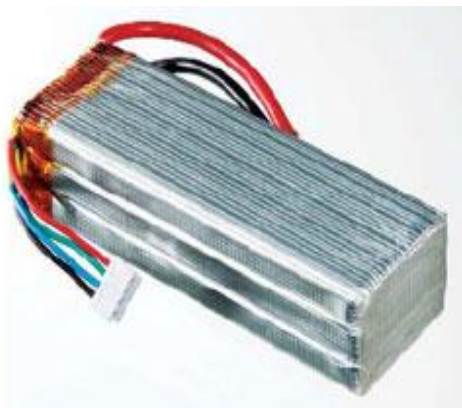


Figure II.13 : Batterie LiPo

1) Caractéristiques électriques des batteries LiPo :

La tension nominale d'un élément LiPo est de 3.7 V. (C'est la tension à vide d'un élément chargé à 50%).

- La capacité : elle s'exprime en Ah (Ampère x heure). Une batterie de 1500 mAh a la capacité de débiter 1.5 A pendant 1 h ou 15 A pendant 6 mn.
- Le facteur de décharge : une batterie 1500 mAh de 20 C a une intensité maximale de décharge de 20 fois sa capacité soit $20 \times 1.5 \text{ A} = 30 \text{ A}$.
- Tension minimale de décharge : les batteries Li-Po ne doivent jamais être déchargées en-dessous de 2,5 V par élément. La valeur recommandée si vous voulez faire durer vos batteries est de 3.3 V par élément et personnellement je m'arrête à 3.6V.
- Tension de charge maximale : les batteries Li-Po ne doivent jamais être chargées au-dessus de 4.2 V par élément. Il est obligatoire d'utiliser un "égaliseur" dans le circuit de charge (circuit de balance)..
- Tension de stockage recommandée : Pour prolonger la durée de vie des batteries Li-Po, il vaut mieux les stocker au froid et seulement à 3.7 V par cellule.

Pour évaluer le pourcentage de charge d'une batterie Li-Po en fonction du nombre de cellules (éléments) il suffit de mesurer sa tension à vide et de se référer au tableau suivant :

	1 él	2 él	3 él	4 él	5 él
0%	3,00V	6,00V	9,00V	12,00V	15,00V
5%	3,30V	6,60V	9,90V	13,20V	16,50V
10%	3,60V	7,20V	10,80V	14,40V	18,00V
20%	3,70V	7,40V	11,10V	14,80V	18,50V
30%	3,75V	7,50V	11,25V	15,00V	18,75V
40%	3,79V	7,58V	11,37V	15,16V	18,95V
50%	3,83V	7,66V	11,49V	15,32V	19,15V
60%	3,87V	7,74V	11,61V	15,48V	19,35V
70%	3,92V	7,84V	11,76V	15,68V	19,60V
80%	3,97V	7,94V	11,91V	15,88V	19,85V
90%	4,10V	8,20V	12,30V	16,40V	20,50V
100%	4,20V	8,40V	12,60V	16,80V	21,00V

Tableau II.2 : Pourcentage de charge d'une batterie Li-Po

1) Autonomie d'une Batterie Li-Po

Il s'agit de pouvoir estimer la durée de vol d'un drone en fonction de la batterie utilisée. En effet, cette autonomie de vol va dépendre de plusieurs facteurs notamment :

- Le poids total du drone.
- Le type des moteurs et des hélices utilisés. Ceci, va engendrer une poussée avec une certaine consommation électrique.
- La batterie Li-Po utilisée avec ses caractéristiques notamment sa capacité en Ah.

A partir de ces données il est possible d'estimer avec une certaine réussite la durée de vol de notre drone. Supposons que nous avons :

- Un quadrirotor qui pèse 700g
- Quatre moteurs qui fournissent ensemble $380 \times 4 = 1520$ g de poussée (avec une tension d'alimentation de 11.1V, un courant de 8A et des hélices Carbone/fibre : Tableau II.1)
- Une batterie Li-Po 3S 1500 mAh 65C

2.1) Rapport Poids/Poussée

Il s'agit du rapport entre le poids du drone et de la poussée assurée par ses moteurs. Il doit être toujours inférieur à 0,5 pour que le quadrirotor arrive à voler.

Dans notre cas le quadrirotor pèse 700 g et la poussée de moteurs est de 1520g donc :

$$\mathbf{WTL = 700/1520 = 0,460} \quad \mathbf{(II.1)}$$

Remarque : ce rapport est inférieur à 0.5 ce qui doit permettre au drone de voler mais nous pourrions faire mieux en réduisant le poids du drone ou bien augmenter la poussée des moteurs

2.2) Consommation en vol stationnaire

Selon les caractéristiques des moteurs et de l'hélice utilisés (Tableau II.1), il consomme 8 A à pleine charge. Si on suppose que la consommation est linéaire par rapport à la charge nous aurons pour un seul moteur :

$$\mathbf{Consommation = WTL \times 8 \text{ A} = 0.460 \times 8 = 3.68 \text{ A}} \quad \mathbf{(II.2)}$$

En vol stationnaire et pour les quatre moteurs nous aurons donc :

$$\mathbf{Consommation_{totale} = 3.68 \times 4 = 14.72 \text{ A}} \quad \mathbf{(II.3)}$$

2.3) Durée de vol

Notre batterie est de 1500 mAh (1.5 Ah). Une batterie LiPo ne doit pas se décharger en dessous de 25%.

$$\mathbf{Temps \ de \ vol = (1.5 \text{ Ah} \times 75\%) / 14.72 \text{ A} = 0,076 \text{ heures} = 4 \text{ minutes } 58 \text{ s}} \quad \mathbf{(II.4)}$$

Bien sûr nous pourrions nettement améliorer cette durée de vol en choisissant d'autres équipements en particulier les moteurs, les hélices et la batterie. Sans oublier d'économiser sur le poids total du drone

II.4.1.7 La Caméra embarquée :

Généralement ce sont des caméras à faible résolution ou haute résolution et qui envoient des images à des stations terrestres via des ondes radio.



Figure II.14 : Exemple de caméra à embarquer sur quadricoptère.

De nos jours, pour les petits drones il existe des microcaméras permettant de filmer en Haute définition et même en Full HD, comme par exemple 1080p, 720p. En plus, elles sont connectées en Wifi pour une transmission en de la vidéo en continu ou encore en snapshot (image par image). Ces caméras peuvent être utilisées dans plusieurs applications notamment en vol en immersion ou FPV (First-person view). Il s'agit tout simplement de donner l'impression qu'on se trouve dans l'engin volant que nous pilotons à distance en temps réel.

II.4.1.8 La Radio-commande (RC) :

Pour piloter le quadricoptère, il faut un émetteur radio pour le pilote et un récepteur dans le drone. Il existe plusieurs technologies pour les radio-commandes : les radios *FM* en 41MHz de moins en moins utilisées et les radios en 2,4 GHz, souvent programmables pour s'adapter à chaque appareil radio-commandé. Une radio-commande doit idéalement comporter 6 voies pour piloter un quadricoptère. Ces 6 voies se répartissent comme suit : 4 voies sur les manettes et 2 voies sur des interrupteurs pour actionner certaines fonctions. Il existe deux modes de configuration des manettes, le premier mode dans lequel les gaz sont à droite et le deuxième mode 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. Sur la plus part des récepteurs il est possible de choisir la répartition des commandes (lacet, roulis et tangage) sur les sticks de droite et de gauche. Il existe en tout 4 modes, les plus utilisés sont le 1 et le 2. Pour le pilotage de quadricoptère, le mode 2 est le plus adapté car toute l'assiette est contrôlée par une même manche (ce qui se rapproche le plus d'un vrai hélico).

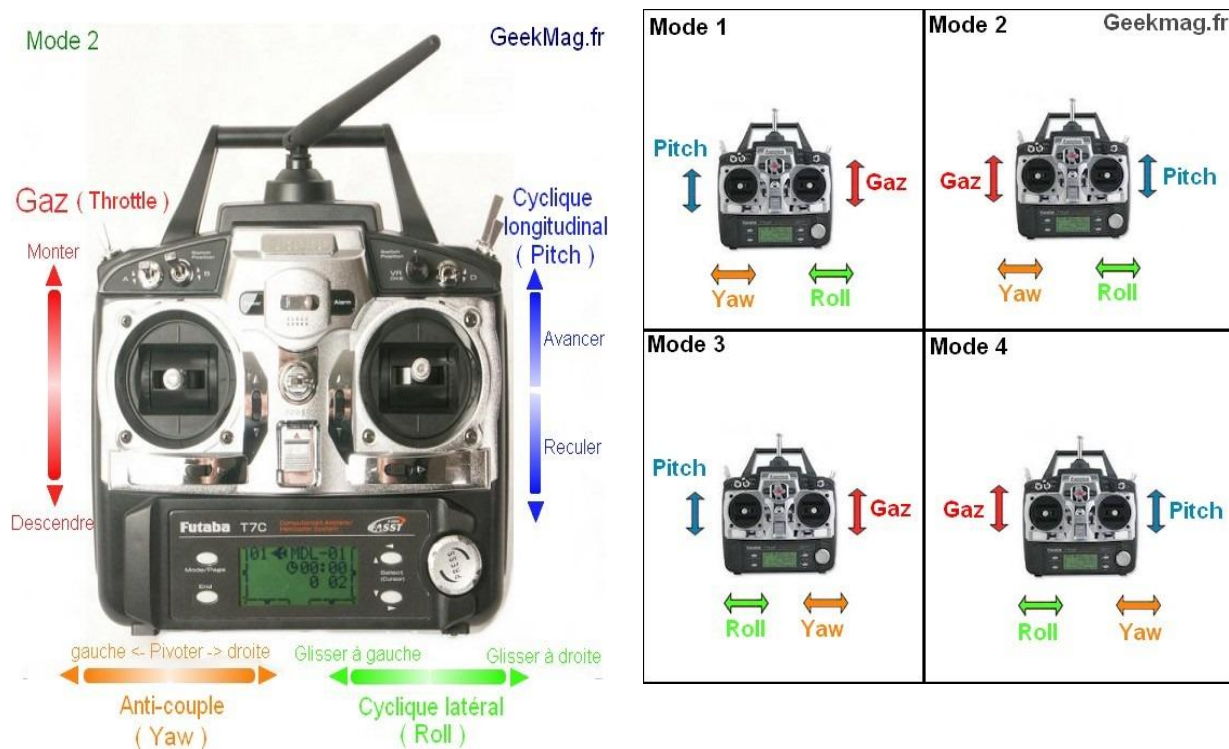


Figure II.15 : Principe de fonctionnement d'une radiocommande

I.4.1.9 Les Capteurs :

Les capteurs sont fondamentaux pour identifier et calculer l'altitude et la hauteur d'un corps. Grâce à ces capteurs il est possible d'accomplir l'évitement des obstacles et la planification de la trajectoire lors d'un contrôle du haut niveau. Les principaux capteurs généralement utilisés sont : l'accéléromètre, le magnétomètre, le gyromètre, l'altimètre, le GPS, la boussole, etc.

- Accéléromètre : Le principe de fonctionnement est basé sur la loi fondamentale de la dynamique à savoir qu'une Force F mesurée en Newton est égale à la Masse en kg multipliée par l'accélération γ . il mesure les accélérations linéaires selon 3 axes orthogonaux. Par contre si on cherche à détecter une rotation ou vitesse angulaire on parle alors de gyromètre. Si nous avons besoin à la fois des 03 accélérations et des 03 vitesses angulaires nous avons besoin d'une centrale à inertie
- GPS : Pour Global Positioning System, il s'agit d'un géopositionnement par satellite. Le principe de fonctionnement est basé sur une constellation de satellites (au moins 24) orbitant faible altitude de la terre (20200 km) qu'ils parcourent en 11 h 58 min 2 s, soit un demi-jour sidéral. Ces satellites évoluent sur six plans orbitaux ayant une inclinaison d'environ 55° sur l'équateur. Ils émettant en permanence sur deux fréquences modulées en BPSK. Le récepteur GPS (qui est notre capteur) capte les signaux d'au moins quatre satellites arrive à connaître sa distance par rapport à ceux-ci (principe du trilatération).
- Altimètre : Il permet de déterminer l'altitude (mesure est effectuée par rapport au niveau de la mer), la hauteur (mesure effectuée par rapport au niveau du sol local) et le niveau

de vol si c'est par rapport à une surface isobare (une surface où la pression atmosphérique est égale en tout point).

- ...etc

II.5 Modes de vol :

En se basant sur les mouvements possibles, le drone peut effectuer trois modes de vol :

- ✓ vol vertical.
- ✓ vol stationnaire.
- ✓ vol de translation.

II.5.1 Vol vertical :

Soient deux forces ayant la même direction mais de sens opposé [16]. Le quadricoptère peut monter ou descendre, suivant l'effet aérodynamique soit supérieur ou inférieur au poids de l'appareil. (Voir la Figure II.16).

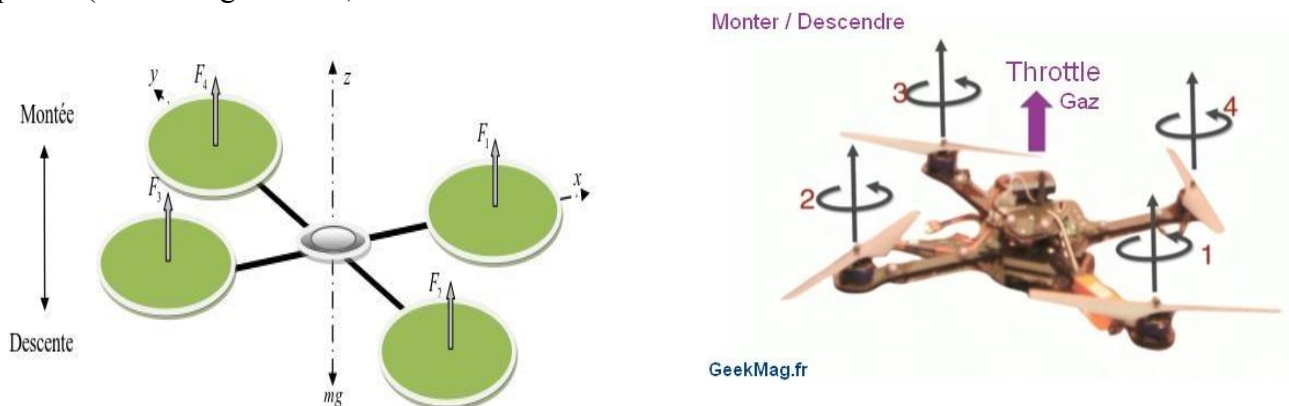


Figure II.16 : Illustration du mouvement vertical

II.5.2 Vol stationnaire :

Quand la force de Portance, et celle de pesanteur sont égales et opposées, tous les moteurs tournent à la même vitesse : le quadricoptère reste immobile. On parle de vol stationnaire.

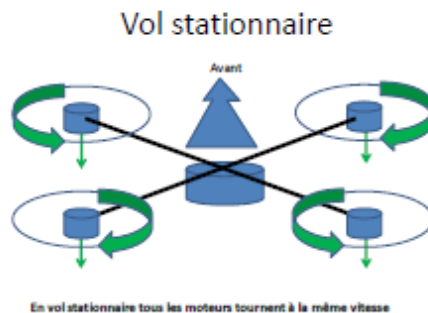


Figure II.17 : Illustration du vol stationnaire

II.5.3. Vol de translation :

Le vol de translation correspond à la navigation de l'hélicoptère sur un plan horizontal. Il est assuré en se basant sur les mouvements d'inclinaison tangage, et roulis (voir la Figure II.18).

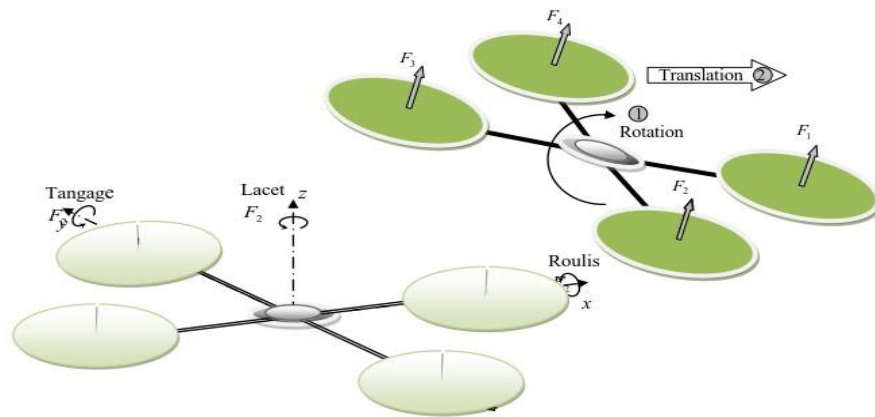


Figure II.18 : Illustration du vol de translation

II.6. Conclusion :

Les points abordés dans ce chapitre ont essentiellement porté sur des généralités sur le monde des drones et leurs domaines d'applications, ainsi que la description du principe de fonctionnement du drone quadrirotor, faite avec des détails sur ses mouvements possibles ainsi que les modes de vol, en collaboration avec le jargon (tangage, roulis, lacet) de vol correcte.

En se basant sur les lois de la cinématique (Euler / Lagrange), ce chapitre présente une Modélisation dynamique du drone quadrirotor. Sa modélisation a été établie par l'usage du formalisme Newton-Euler, ce formalisme nous a permis d'établir le modèle dynamique du quadrirotor. Nous concluons que le quadrirotor est un système sous actionné.

Chapitre III : Modélisation et contrôle du quadricopter

III.1 Introduction :

Le pilotage d'un quadricoptère requiert, plusieurs algorithmes de contrôle pouvant être appliqués pour construire des lois de commande. Cependant, ces approches ont des lacunes de dégradation des performances lorsque l'aéronef s'éloigne de ses points d'équilibres. En outre, la présence de perturbation peut déstabiliser ces véhicules. Pour cela, on peut employer des techniques adaptatives pour avoir un système stable.

Ce chapitre est scindé en deux parties. La première partie consiste à présenter les modèles mathématiques représentant le fonctionnement d'un quadrirotor. En effet, pour pouvoir contrôler et commander le drone, qui n'est autre qu'un système avec des entrées et des sorties, nous devons faire appel à un algorithme de régulateur performant et robuste qui ne peut fonctionner qu'à partir de représentations mathématiques du fonctionnement du système en l'occurrence le drone. Dans la seconde partie de ce chapitre nous allons présenter certains régulateurs de base, afin de choisir un régulateur convenable au système qu'on envisage.

III.2 Le Contrôle du drone sur les trois axes du lacet, tangage et roulis

Un drone quadrirotor est caractérisé par quatre mouvements essentiels, à savoir :

- Les gaz ou puissance permettant de contrôler l'altitude (hauteur). Autrement dit, commander la montée/descente du quadrirotor. Ceci est obtenu grâce à l'augmentation/diminution de la vitesse des quatre moteurs simultanément.
- Le roulis qui est un mouvement de rotation du drone autour de son axe longitudinal (axe de roulis). La vitesse angulaire de cette rotation est aussi appelée **taux de roulis**
- Le tangage qui est mouvement de rotation autour de l'axe transversal du drone. Le roulis et le tangage sont des mouvements assez similaires visant à pencher le quadrirotor sur un axe ou sur un autre. Ce mouvement est obtenu en augmentant la vitesse d'une hélice et en abaissant proportionnellement la vitesse de l'hélice opposée (hélice du même couple). Le tangage est obtenu en contrôlant seulement les deux moteurs 1 et 3. Quant au roulis il est obtenu en contrôlant les deux autres moteurs à savoir 2 et 4.
- Le lacet est le mouvement de rotation horizontal du drone autour d'un axe vertical. Il va permettre donc de faire tourner le quadrirotor sur lui-même. Il est obtenu en augmentant la vitesse des hélices à pas normal et en diminuant proportionnellement la vitesse des hélices à pas inversé.

A cet effet ces quatre mouvements sont appelés aussi bien pour des mouvements souhaités du drone ou encore pour stabiliser le drone quand il est sujet à des imprévus tel que de rafales de vent, d'éviter les obstacles, d'assurer un vol stationnaire ou tout simplement de décoller, d'atterrir, d'avancer, de reculer et voler en autonomie automatiquement. La stabilisation est souvent assurée grâce à des régulateurs PID numériques implantés dans le système de commande embarqué dans le drone.

Le quadrirotor est un système multidimensionnel de type MIMO (Multiple Input, Multiple Output). Autrement dit, c'est un système avec plusieurs entrées et plusieurs sorties. Ses sorties sont les actionneurs et elles sont composées habituellement de quatre moteurs brushless. Chacun des moteurs est contrôlé par un ESC et il muni d'une hélice. Quant aux entrées il s'agit principalement des données récupérées à partir des capteurs à savoir les rotations angulaires concernant les variables à contrôler à savoir les gaz, le roulis, le tangage et le lacet. Leur stabilisation est nécessaire pour un vol stable, ce qui nous amène à utiliser quatre régulateurs PID pour chacune de ces variables

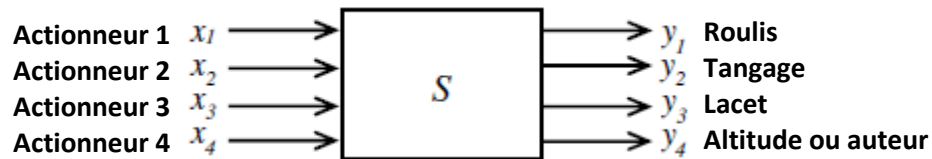


Figure III.1 : Drone en tant qu'un système MIMO

Les relations entre le contrôleur et les variables à contrôler peuvent être représentées par :

$$Y(p) = S(p) \times X(p) \tag{III.1}$$

Où p est l'opérateur de Laplace.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(p) &= |X_1(p) \quad X_2(p) \quad X_3(p) \quad X_4(p)|^T \\ \mathbf{Y}(p) &= |Y_1(p) \quad Y_2(p) \quad Y_3(p) \quad Y_4(p)|^T \\ \mathbf{S}(p) &= \begin{pmatrix} S_{11}(p) & S_{12}(p) & S_{13}(p) & S_{14}(p) \\ S_{21}(p) & S_{22}(p) & S_{23}(p) & S_{24}(p) \\ S_{31}(p) & S_{32}(p) & S_{33}(p) & S_{34}(p) \\ S_{41}(p) & S_{42}(p) & S_{43}(p) & S_{44}(p) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

III.3 Dynamiques du drone en vol

Le fonctionnement du drone, à savoir assurer les différents mouvements, est basé sur les vitesses à affecter simultanément à ses quatre moteurs comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre précédent. En agissant sur les quatre moteurs de différentes manières nous arrivons donc à assurer les différents vols possibles. En effet, comme tout aérodyne, le quadrirotor subit et crée des forces. Ces forces sont :

- force de gravité : due à l'attraction terrestre qui le retient au sol
- force de propulsion : c'est l'action de pousser en avant un corps pour qu'il se déplace dans l'espace environnant
- forces aérodynamiques :
 - ✓ la portance : c'est la force qui permet à l'aéronef de s'élever et de se maintenir en altitude.
 - ✓ la traînée : c'est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un environnement et agit comme un frottement.

Le produit d'une force par la distance donne un moment, comme on peut le voir sur la figure suivante.

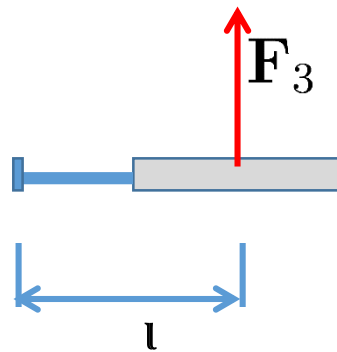


Figure III.2 : Force et Moment

Où le moment résultant sera donné par l'expression suivante :

$$\tau = l \times F_3 \quad (\text{III.2})$$

Dans le cas où nous aurons deux forces qui agissent simultanément sur le même point nous aurons un moment résultant comme le montre la figure suivante :

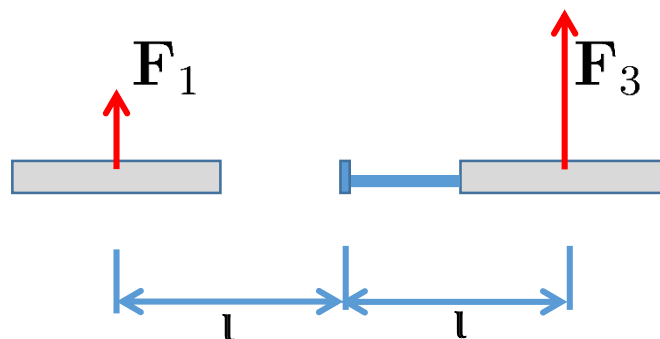


Figure III.3 : Moment résultant de deux forces

Dans ce cas le moment résultant sera donné par :

$$\tau = l \times (F_1 - F_3) \quad (\text{III.3})$$

Ainsi, selon les trois axes d'étude des mouvements : roulis (x), tangage (y), lacet (z), on aura trois moments :

- moment de roulis, avec son coefficient
- moment de tangage, avec son coefficient
- moment de lacet, avec son coefficient

Pour arriver donc à modéliser le fonctionnement de notre drone quadrirotor en tenant compte de ses dynamiques, nous pouvons commencer par le schéma de principe de ses mouvements représenté sur la figure suivante :

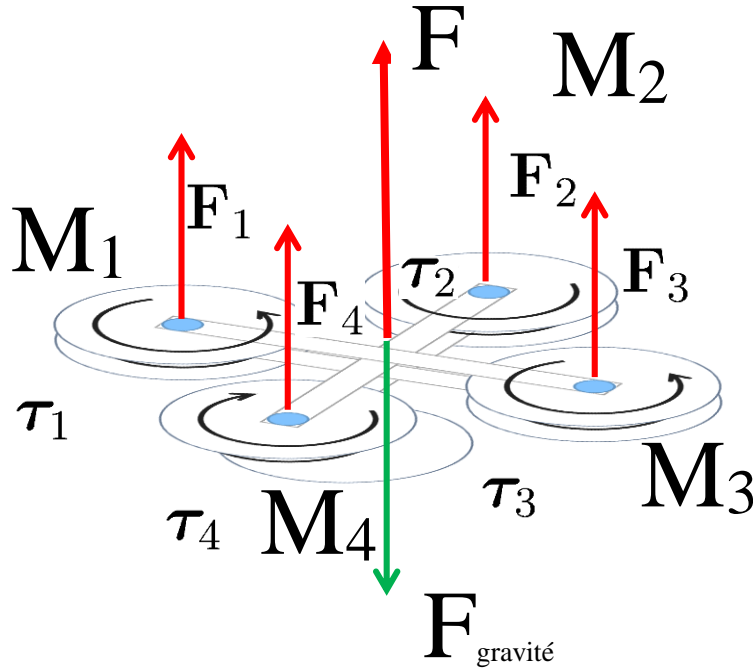


Figure III.4 : Schéma du modèle du quadrirotor (les principaux couples et forces)

Où F_1, F_2, F_3 et F_4 sont les quatre forces créées respectivement par la vitesse de rotation des quatre moteurs M_1, M_2, M_3 et M_4 . Quant à $F_{\text{gravité}}$ c'est le poids complet du drone.

Dans ce schéma nous pouvons observer les différentes forces et moments, créés par les vitesses de rotation des quatre moteurs, agissant sur le quadrirotor. Fondamentalement, ils sont les suivants : force totale F , moment de roulis τ_ϕ , moment de tangage τ_θ , et moment de lacet τ_ψ . Par conséquent, la force totale et les couples désirés doivent être atteints en exerçant une combinaison de F_i (avec $i=1, 2, 3$ ou 4) comme suit :

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (\text{III.4})$$

$$\tau_\phi = l \times (F_3 - F_1) \quad (\text{III.5})$$

$$\tau_\theta = l \times (F_2 - F_4) \quad (\text{III.6})$$

$$\tau_\psi = \frac{k_j}{b} \times (F_3 + F_2 - F_1 - F_4) \quad (\text{III.7})$$

où l est la distance entre le centre de rotation et les rotors, k_t est le coefficient de traînée des moteurs et b est le coefficient de poussée des rotors.

Le tableau suivant nous permet de comprendre aisément comment obtenir les différents mouvements du quadrirotor en agissant sur les vitesses des quatre moteurs. Notons que chaque force générée par un moteur augmente avec la vitesse qu'on lui applique.

N°	Vitesses des moteurs (forces générées)	Type de vol
01	$F_i = F_1 = F_2 = F_3 = F_4$ $F = 4F_i = \text{Poids du drone}$	stationnaire
02	$F_i = F_1 = F_2 = F_3 = F_4$ $F = 4F_i > \text{Poids du drone}$	Monter
03	$F_i = F_1 = F_2 = F_3 = F_4$ $F = 4F_i < \text{Poids du drone}$	Descente
04	$(F_1 = F_3) < (F_2 = F_4)$	Avancer
05	$(F_1 = F_3) > (F_2 = F_4)$	Recul
06	$(F_1 = F_4) < (F_2 = F_3)$	Droite
07	$(F_1 = F_4) > (F_2 = F_3)$	Gauche
08	$(F_1 = F_2) > (F_3 = F_4)$ Ou bien $(F_1 = F_2) > (F_3 = F_4)$	Rotation

Tableau III.1 : Les Mouvements du drone vs forces générées par les moteurs

III.4. Modélisation dynamique du Quadrirotor :

La modélisation dynamique des engins volants connaît ces dernières décennies un essor particulier avec l'introduction des composants flexibles. Plusieurs approches sont utilisées dans l'analyse dynamique de ces systèmes permettant d'obtenir des modèles qui prennent en compte l'ensemble du système mécanique en vue de la construction des codes de calculs numériques.

Ainsi, de nombreux chercheurs ont axé leurs travaux dans ce sens. Il y'a par exemple des travaux de Meirovitch et Ilan qui ont mené une étude sur la modélisation d'un avion flexible. A partir de l'approche Lagrangienne du mouvement, ils ont établi le modèle dynamique d'un UAV en s'appuyant sur une technique de sous-structuration qui utilise les coordonnées relatives du mouvement de l'engin.

Pour ce mémoire de fin d'études, notre approche de modélisation est basée sur le formalisme des angles d'Euler. Nous adaptons cette méthode pour le cas d'un rotor flexible à quatre rotors, conformément à l'esprit de notre projet à réaliser. Cependant la modélisation des quadrirotors 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 quadrirotor 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 liés à la structure coïncident.
- ✓ Les forces de portance et de trainée sont proportionnelles aux carrés de la vitesse de rotation des rotors, ce qui est une approximation très proche du comportement aérodynamiques du système.

Pour évaluer le modèle mathématique du quadrirotor on utilise deux repères, un repère fixe lié à la terre R^b et un autre mobile R^m lié au centre de gravité du quadrirotor. Le passage entre le repère mobile et le repère fixe est donné par une matrice dite matrice de transformation T qui contient l'orientation et la position de repère mobile par rapport au repère fixe. On choisit le placement des axes comme suit :

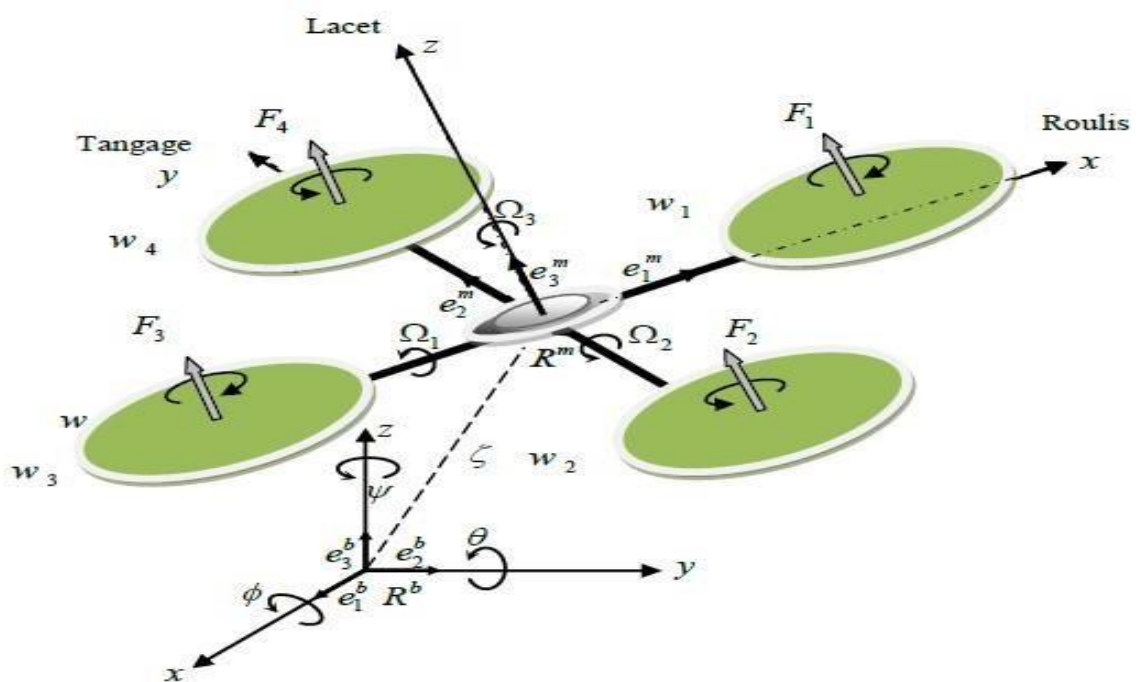


Figure III.5 : Géométrie du Quadrirotor.

$$T = \begin{bmatrix} R & \xi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Avec R la matrice de rotation (décrit l'orientation de l'objet mobile), $\zeta = [x \ y \ z]^T$ est le vecteur de position. Pour déterminer les éléments de la matrice de R , on utilise les angles d'Euler.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

La représentation mathématique à partir des angles d'Euler est très utilisée dans la navigation aérienne connue sous le nom de 'Roll-pitch-yaw convention' (Norme DIN 9300). Le principe est illustré par le schéma suivant

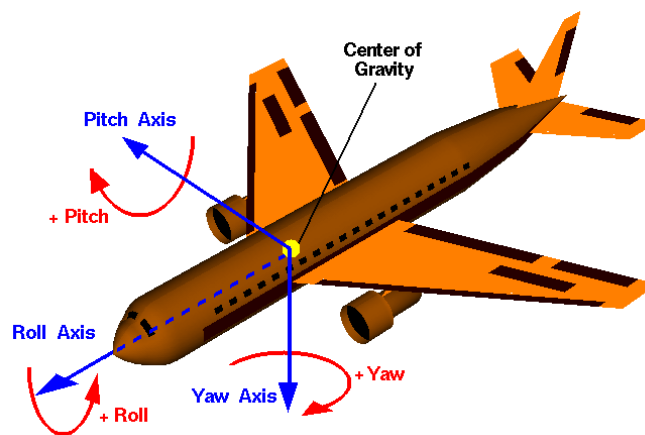


Figure III.6 : Principe de 'Roll-pitch-yaw convention' [wikipédia]

Cette convention est basée bien entendu sur la matrice de Rotation R et nous permet d'en déduire les angles du roulis (Roll), Tangage (Pitch) et Lacet (Yaw) respectivement notés: ϕ , θ et ψ .

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{R}_Z(\psi)\mathbf{R}_Y(\theta)\mathbf{R}_X(\phi) \\ &= \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

$$\phi = \text{Atan2} \left(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \right)$$

$$\psi = -\text{Atan2} \left(\frac{r_{21}}{\cos(\phi)}, \frac{r_{11}}{\cos(\phi)} \right)$$

$$\theta = \text{Atan2} \left(\frac{r_{32}}{\cos(\phi)}, \frac{r_{33}}{\cos(\phi)} \right)$$

(III.11)

Ces informations seront alors nécessaires et indispensables pour pouvoir contrôler le drone en agissant sur ces moteurs

III.5 Rôles du contrôleur de vol

C'est le cœur du drone, il permet entre autres de prélever les mesures nécessaires à partir des différents capteurs (exemples : accéléromètre, GPS, ...etc), d'estimer les différents paramètres nécessaire au contrôle du drone et bien évidemment de contrôler les actionneurs du drone à savoir l'ensemble moteurs/hélices. Ce contrôleur est généralement sous forme d'un calculateur embarqué que nous pouvons configurer et programmer. Il assure plusieurs types de régulation principalement pour le contrôle de la position, de l'attitude et des vitesses des quatre moteurs

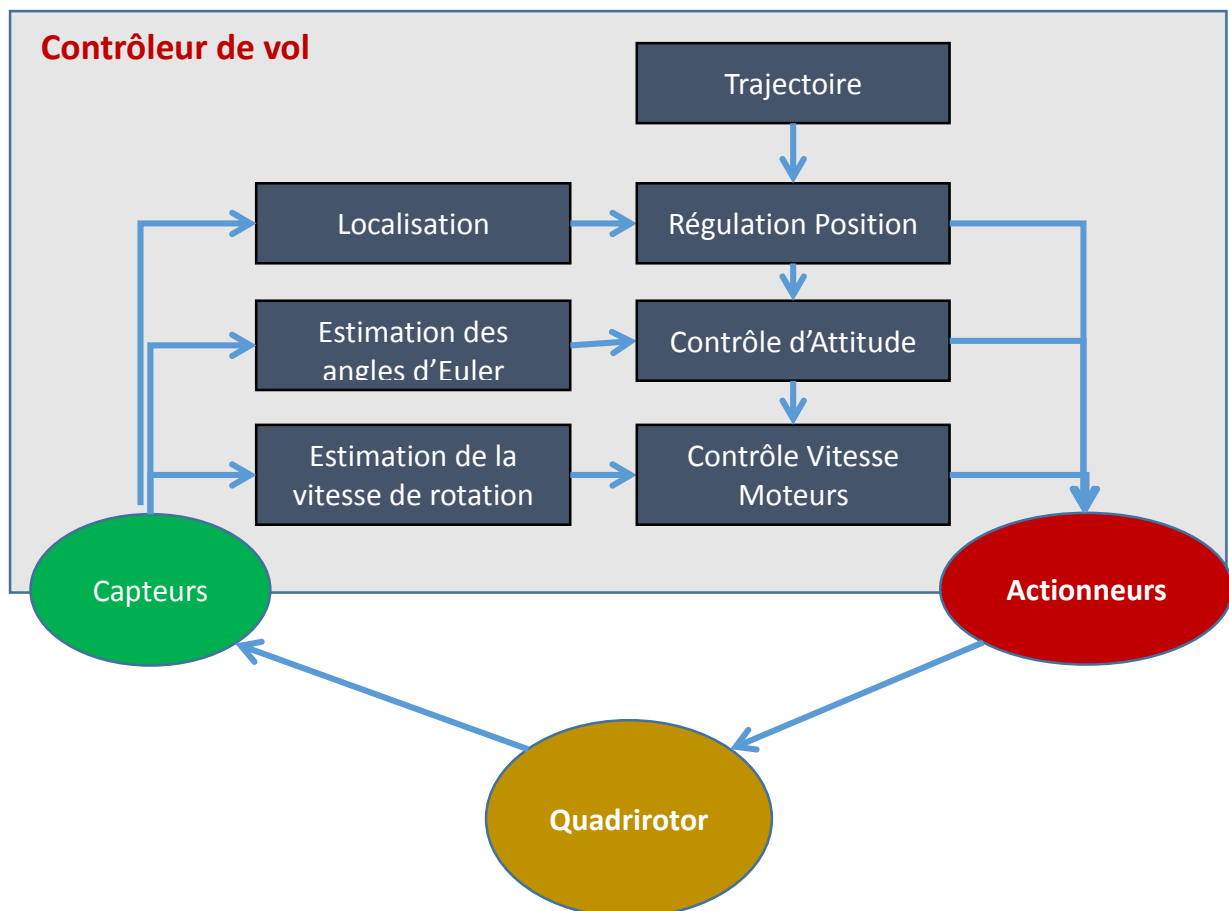


Figure III.7 : Schéma de principe du rôle d'un contrôleur de vol

Le principe général d'un régulateur est de comparer la consigne SP (Set Point : ce qu'on souhaite obtenir) et l'état du système ou mesure PV (Process Value) de manière à le corriger efficacement. La régulation (ou asservissement à consigne constante) consiste à agir de façon à ce qu'une mesure soit égale à une consigne (dans la réalité il suffit qu'elle soit la plus proche possible). Si l'on cherche à atteindre une consigne pouvant évoluer dans le temps selon une loi mathématique appropriée, on parlera de poursuite ou asservissement; si l'on cherche à éliminer des perturbations pour qu'une valeur reste constante, on parlera de régulation [15]. Il existe plusieurs types de régulateurs :

III.5.1. Régulateur proportionnel P

Dans le cas d'un contrôle proportionnel, l'erreur est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système.

$$u(t) = K_p \times \varepsilon(t) = K_p \times (SP - PV(t)) \quad (\text{III.12})$$

Où K_p est le gain et $u(t)$ est la commande.

L'idée étant d'augmenter l'effet de l'erreur sur le système afin que celui-ci 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. L'action proportionnelle applique une correction instantanée pour tout écart entre la mesure et la consigne, plus la perturbation est grande, plus la correction apportée est grande. Cette composante seule ne permet pas une grande précision surtout dans les systèmes à faible inertie [16].

III.5.2. Régulateur proportionnel-intégrale PI

Au contrôle proportionnel, nous pouvons ajouter l'intégration de l'erreur. Dans ce cas nous obtenons une régulation PI (proportionnelle et intégrée). L'erreur entre la consigne et la mesure est ici intégrée par rapport au temps et multipliée par une constante qu'il faudra aussi déterminer en fonction du système.

$$u(t) = K_p \times \varepsilon(t) + K_i \int \varepsilon(t) dt = K_p \times (SP - PV(t)) + K_i \int (SP - PV(t)) dt \quad (\text{III.13})$$

Où K_i est la constante d'intégration. L'intégrale s'effectue sur une durée bien déterminée.

Pourquoi a-t-on besoin de rajouter cette fonctionnalité à notre organe de contrôle?

Parce que lors d'un simple contrôle proportionnel, il subsiste une erreur statique. Lorsque le système s'approche de sa consigne, l'erreur n'est plus assez grande pour faire avancer le moteur. Le terme intégral permet ainsi de compenser l'erreur statique et fournit, par conséquent, un système plus stable en régime permanent. Plus K_i est élevé l'erreur statique est élevée. Cette composante apporte une notion de temps d'intégration à la correction, cette notion de temps s'exprime généralement en seconde. Cette action est complémentaire à l'action proportionnelle, elle permet de stabiliser dans le temps l'action proportionnelle, plus l'erreur mesurée est constante plus la correction est constante [16].

III.5.3. Régulateur proportionnel-intégrale-dérivée PID

Pour obtenir un contrôle en PID, il nous faut encore rajouter un terme. Celui-ci consiste à dériver l'erreur entre la consigne et la mesure par rapport au temps et à le multiplier lui aussi par une constante [16].

Dans le domaine de l'industrie, la plupart des régulateurs utilisés sont des régulateurs PID, Les raisons de ce succès sont [7] :

- ✓ Structure simple.
- ✓ Hautes performances dans plusieurs processus.

Dans la robotique, les techniques PID représentent les bases du contrôle. La structure traditionnelle PID est composé de trois facteurs, présentés dans la figure III.7.

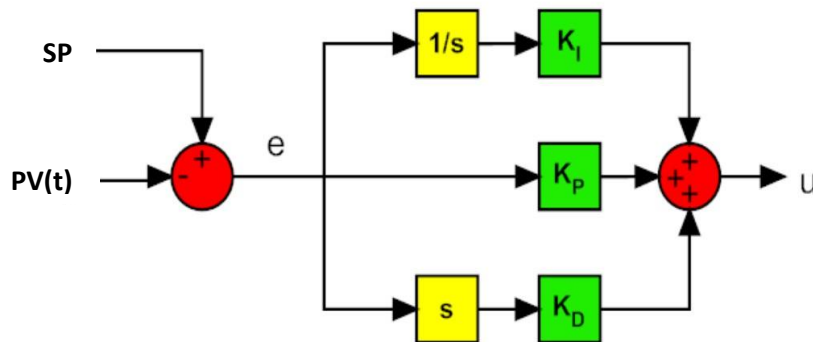


Figure III.8 – Structure du PID traditionnelle [7]

Les blocs “1/s” et “s” représentent respectivement les opérations d'intégration et de dérivation dans le domaine de Laplace [7].

$$u(t) = K_p \times \varepsilon(t) + K_i \int \varepsilon(t) dt + K_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{III.14})$$

Où K_D est la constante de dérivation

Le premier facteur (P) est proportionnel à l'erreur il définit la bande passante proportionnelle. À l'intérieur de cet intervalle, la sortie doit être proportionnelle à l'erreur, tandis qu'à l'extérieur la sortie doit être au minimum ou au maximum. Le deuxième facteur (*Intégrateur*) varie selon l'intégral de l'erreur. Bien que ce composant augmente le dépassement et le temps de réglage, il a une propriété unique c'est qu'il élimine l'erreur de l'état de stabilité. Le troisième facteur (D) varie selon la dérivée de l'erreur, ce composant aide à réduire les dépassements et le temps de réglage [7].

III.6 Régulateurs PID d'un contrôleur de vol

Dans un contrôleur de vol d'un quadrirotor nous aurons besoin de plusieurs régulateurs PID travaillant simultanément. En effet, nous aurons à réguler et corriger entre autres :

- Régulation de roulis

- Régulation de lacet
- Régulation tangage
- Régulation de hauteur
-etc

Ces régulations sont assurées grâce à des correcteurs souvent de type PID (les plus simples) implantés dans le contrôleur de vol. Ainsi, à partir :

- des angles du roulis, du lacet et du tangage mesurés par l'accéléromètre,
- de la hauteur mesurée par exemple par un altimètre
- des consignes (envoyées par la radiocommande)

des corrections sont effectuées grâce aux vitesses affectées aux quatre moteurs.

A cet effet, chacune de ces caractéristiques du drone est corrigée grâce à un régulateur qui est souvent de type PID (le plus simple).

Dans le contrôleur de vol que nous avons utilisé, à savoir Ardupilot ARM 2.6 des régulateurs PID sont implantés et doivent être configurés d'une manière optimale afin de permettre un vol stable et efficace même en présence d'imprévus. Grâce au software "Mission Planner" nous avons configuré ces PID à partir de la fenêtre suivante :

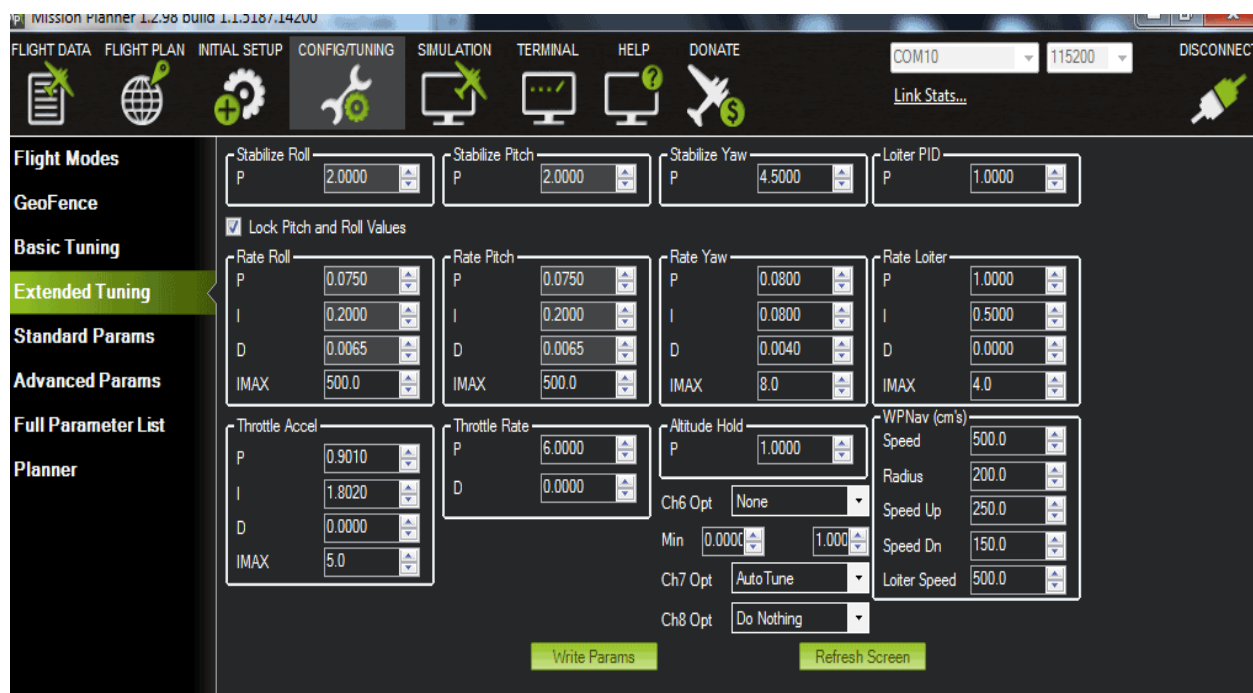


Figure III.9 – Configurations des PID de l'ardupilot

Les valeurs P, I et D de chacun de ces régulateurs peuvent être déterminés empiriquement ou bien nous pouvons utiliser des programmes de calcul sur Matlab ou autre afin de nous permettre de trouver les meilleurs coefficients possible.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les différents régulateurs qui existent, afin de choisir un régulateur convenable au système qu'on envisage. Ensuite nous avons évalué les possibilités de contrôler les différents mouvements en utilisant la technique PID tout en effectuant des tests via un modèle de simulation réalisé sous MATLAB, où il sera facile d'évaluer les performances du système avec une approche mathématique.

CHAPITRE IV : Réalisations Pratiques de l'UAV et du système de commande embarqué.

V.I. Introduction :

Dans le présent chapitre, il s'agit d'expliquer les caractéristiques de l'UAV conçu pour ce projet, ainsi que le système de commande embarqué qui lui est dédié pour son contrôle.

IV.2 L'UAV Réalisé :

L'aéronef que nous avons réalisé a pour caractéristiques :

- ✓ Un châssis avec une conception en alucobond en modèle « X ». Les extrémités en série sont distantes de 30 cm
- ✓ 04 moteurs brushless synchrones (CW) de 2300 KV chacune.
- ✓ 04 ESC de 20 Ampères chacun.
- ✓ 04 hélices de dimensions :

IV.3 Le système de commande embarqué réalisé :

Ce système que nous avons réalisé pour notre UAV est constitué :

- ✓ D'une carte ardupilot Mega (APM) 2.6 dont 04 entrées (inputs) permettent de connecter à l'APM :
- ✓ Un récepteur FS-IA6B de 2.4 GHZ, 6 canaux.
- ✓ Une radiocommande (RC) de type : FlySKy FS - i6, qui émet des signaux, qui sont ensuite reçues par le récepteur FS-IA6B, et communiqués ensuite à l'APM.
- ✓ Un raspberry PI3 avec sa caméra HD

IV.3.1 La carte ardupilot mega (APM 2.6) :

L'APM ou Ardu Pilot Mega en version 2.X est une carte contrôleur de vol Open-Source qui propose toute une pléiade de fonctionnalités et d'options...Il peut contrôler différents objets radiocommandés comme les avions, les voitures, les planeurs, ailes volantes, et surtout toute sorte de multicoptères, quadri, hexa, tri, etc...

L'APM 2.6 est ainsi un système de pilotage automatique complet et Open-Source qui permet de transformer n'importe quelle machine Radio Commandée en véhicule totalement autonome et donc capable d'effectuer des missions (GPS) programmées avec des points de passage.



Figure IV.1 : Ardupilot APM 2.6

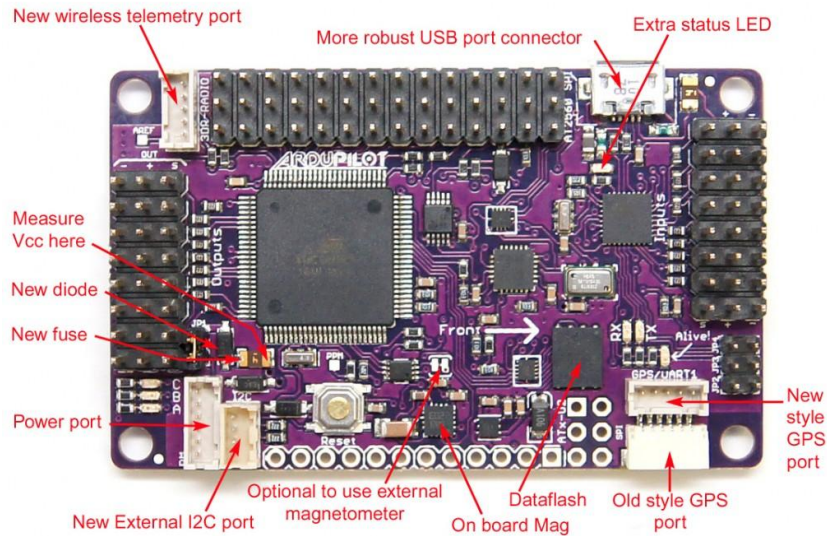


Figure IV.2 : Constitution de l'Ardupilot APM 2.6

IV.3.1.1 Caractéristiques techniques de l'APM 2.6 :

L'ardupilot APM 2.6 possède des caractéristiques que nous pouvons résumer dans le tableau suivant :

- ✓ Compatible Arduino
- ✓ Broches d'entrée latérales
- ✓ Puce Dataflash de 4 Mo intégrée pour l'enregistrement automatique de données
- ✓ Accéléromètre/gyroscope MPU-6000 à 6 degrés de liberté
- ✓ Capteur de pression barométrique mis à niveau vers le MS5611-01BA03
- ✓ Puces ATMEGA2560 et ATMEGA32U-2 d'Atmel pour le traitement et les fonctions USB
- ✓ Dimensions : 2,5 cm x 2,1 cm x 0,9 cm
- ✓ Poids : 147 g

Tableau IV.1 Caractéristiques de APM 2.6

IV.3.1.2 Câblage de l'APM 2.6 :

L'ardupilot APM 2.6 offre la possibilité de lui connecter plusieurs types de capteurs et il peut contrôler à travers ses sorties les ESC des moteurs brushless.

- 1 Alimentation
- 2 Moteurs/ESC
- 3 Radio
- 4 GPS
- 5 Télémétrie USB / Bluetooth
- 6 OSD
- 7 Options

IV.3.1.3 Paramétrage de l'APM 2.6 :

D'abord télécharger et installer la dernière version du logiciel Mission Planner, sous Windows ou Linux. C'est un software à accès libre permettant de configurer l'APM 2.6 selon l'objectif visé et l'application préconisée. En effet, APM 2.6 peut être utilisé aussi bien pour des drones et UAV de différents types et également pour des véhicules terrestres. A cet effet,

le choix de l'application est primordiale et la configuration du fonctionnement de l'APM 2.6 consistera à la mise en œuvre des différents équipements software et hardware inclus dans cette carte. Il s'agit principalement des entrées sorties et aussi des régulateurs. Le figure suivante nous donne un aperçu sur l'environnement de ce logiciel après son installation et son lancement.

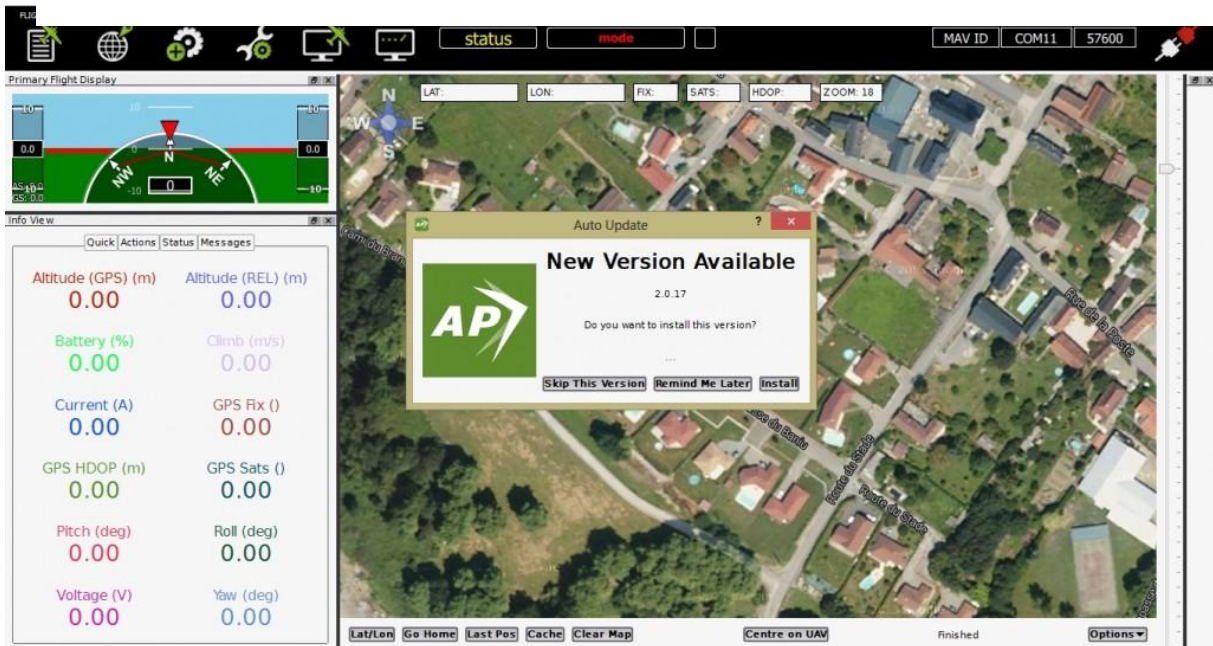


Figure IV.3 : Fenêtre principale du software de l'Ardupilot APM 2.6

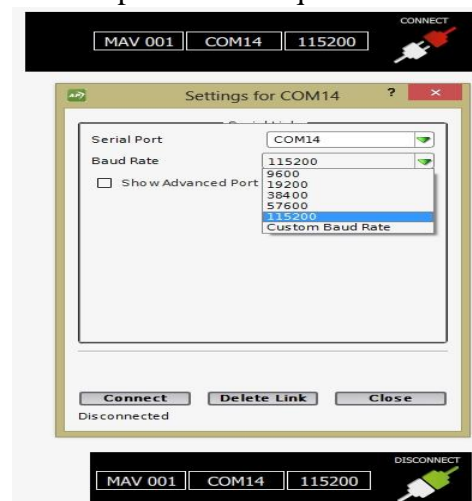
Il nous reste ensuite à lancer l'assistant et connectez l'APM en USB sur notre PC pour commencer son paramétrage.



Figure IV.4 : Connexion de l'Ardupilot APM 2.6 avec un PC

Ensuite, en haut à droite de l'écran, il faut choisir le Port Com de votre connexion USB et sa vitesse de communication en 115200. Cliquez sur « Connect » pour vérifier que la carte communique bien avec le port USB.

Figure IV.5 : Configuration du débit



On effectue ensuite mettre à jour votre carte APM en la déconnectant puis en lançant la procédure « Install Firmware ».

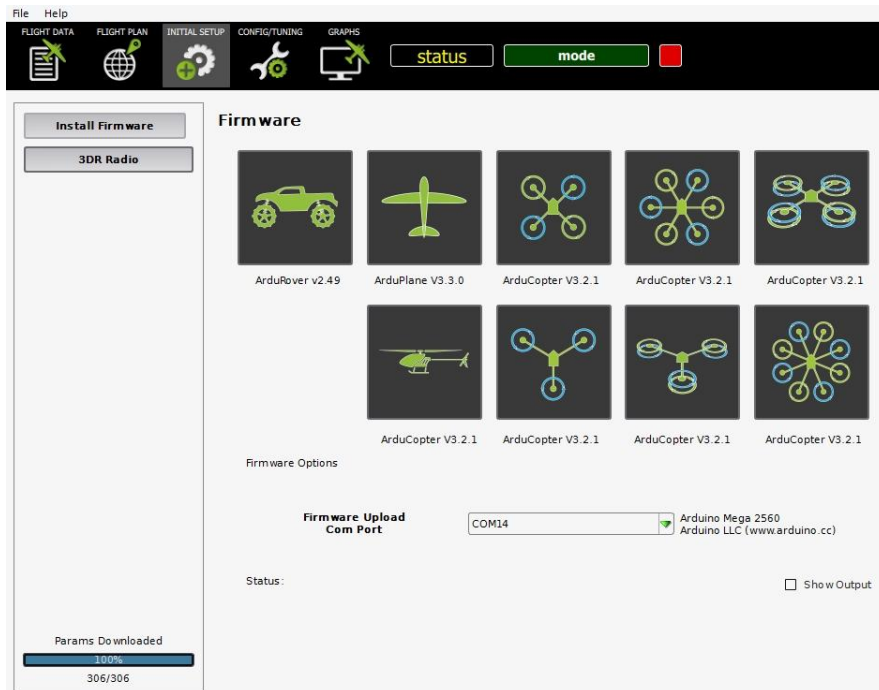


Figure IV.6 : Configuration de la carte APM 2.6, installation de la Firmware dans la carte.

Une fois cette procédure terminée nous pouvons passer au paramétrage et à la configuration de la machine. La mienne sera un quadricoptère en X de type F450 comme celle-ci :

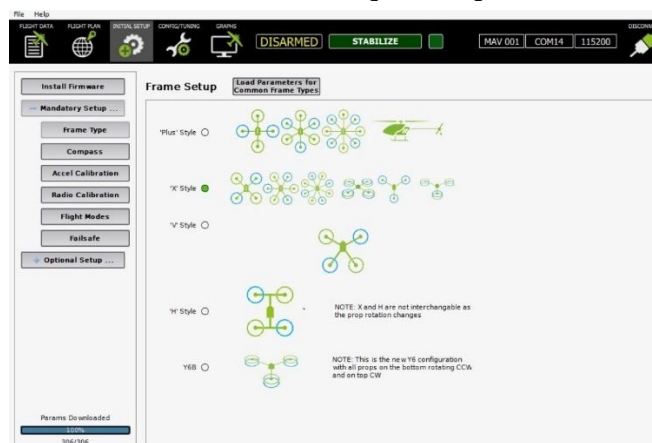


Figure IV.7 : Configuration de la carte APM 2.6 , choix du type de quadricoptère.

L'étape suivante, c'est dans l'onglet « Compass » pour sélectionner votre type de compas. Soit vous possédez une AMP 2.5 avec le compas intégré ou une APM 2.6 et un GPS + Compas externe.

Puis on lance la calibration en cliquant sur le bouton « Live Calibration », puis on effectue différents mouvements de positionnement des différentes parties de l'UAV jusqu'à ce que la calibration soit complète. C'est ensuite l'étape « Accel Calibration » beaucoup plus à réaliser en suivant les étapes suivantes (voir image) :



Figure IV.8 : Calibration des accéléromètres de l'APM dans le logiciel Mission Planner.

Et enfin l'étape de Calibration Radio où il faudra avant tout paramétrer votre Radio pour attribuer différents modes de vol à votre APM. En général il suffit de mixer les inters entre eux ou au moins le 3 positions disponible sur la plupart des Radios...

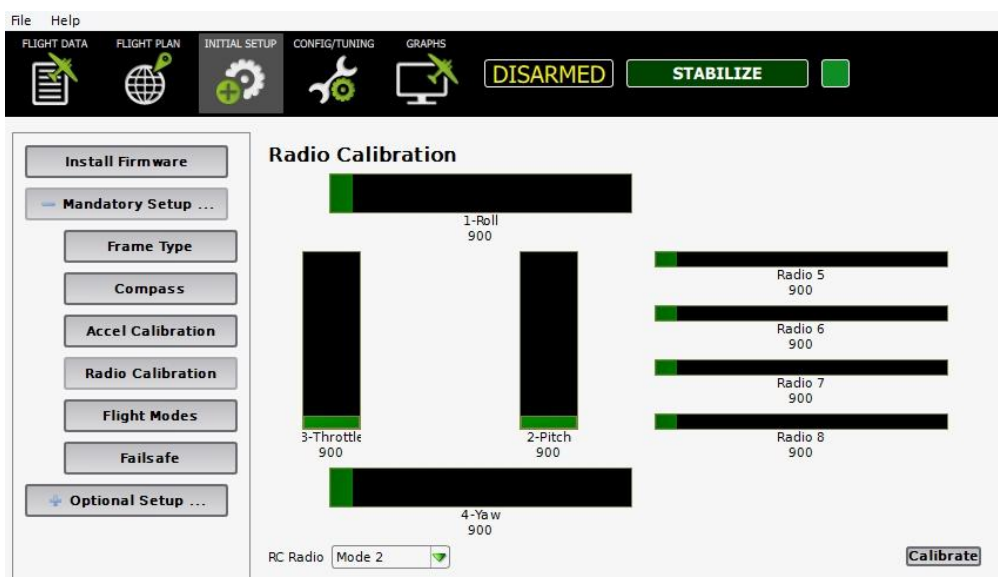


Figure IV.9 : Configuration de la radio calibration (RC FS-i6) dans le logiciel Mission Planner.

C'est ensuite au tour des différents modes de vol en fonction du mixage disponible sur votre Radio, et même si rien ne vous oblige à avoir plusieurs modes, je ne peux que vous conseiller de pouvoir avoir au minimum 2 ou 3 modes différents comme ci-dessous :

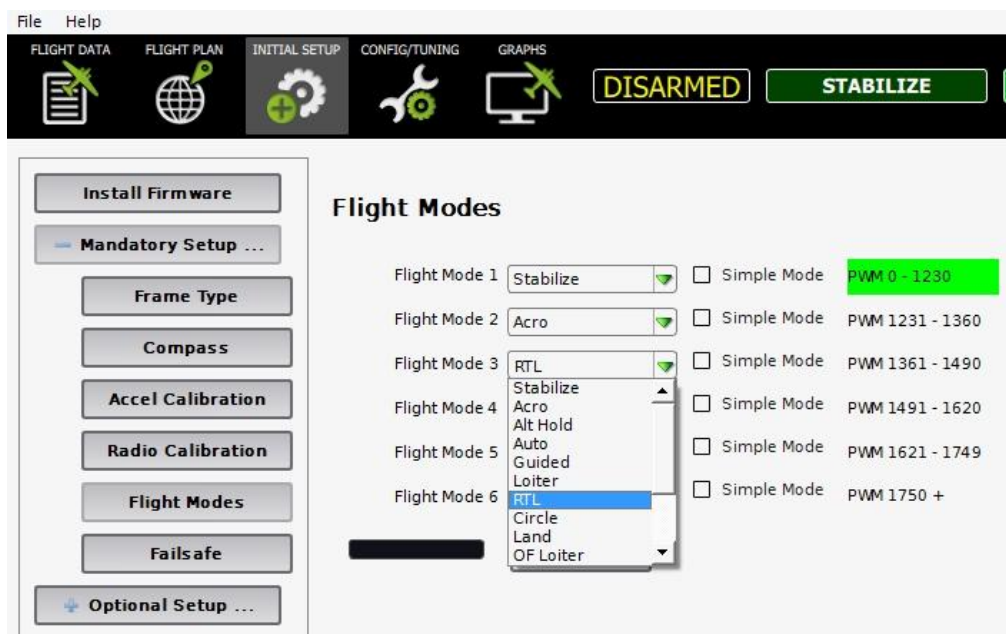


Figure IV.10 : Configuration des modes de vol dans l'APM 2.6 à travers le logiciel Mission Planner.

IV.4 La radiocommande FlySKy FS - i6 :

La **FlySKy FS-i6** est une radio 2.4Ghz 6 voies (ce qui est tout à fait suffisant pour la plupart des utilisations). Elle est équipée de 3 interrupteurs 2 positions, 1 interrupteur, 3 positions et de 2 potentiomètres rotatifs.



Figure IV.11 : Radiocommande FlySKy FS i6

L'écran de la FS -i6 offre une résolution de 128*64 pixels. 4 piles LR-6 suffisent à alimenter l'alimenter. Cette radio utilise l'AFHDS (Automatic Frequency Hopping Digital System) 2A, un nouveau protocole utilisant 2 antennes qui devrait offrir une liaison encore plus fiable que les précédentes versions. Sa configuration se fait d'abord via le menu qui s'affiche sur son écran, une fois allumé, ensuite le reste dans Mission Planner, notamment pour la radio-calibration. [17].

- Radio "fs-i6" 6 voies, 2.40-2.48 ghz
- Bande passante: 500kHz
- Puissance RF: moins de 20dBm
- Système 2.4ghz: afhds 2a et afhds
- Type de code: GFSK
- Sensibilité: 1024
- Avertissement de basse tension : moins de 4.2 V
- Port dsc: ps2 - sortie: ppm
- Port du chargeur: aucune
- Longueur: 26mm * 2 (double antenne)
- poids de l'émetteur : 392g
- Poids du paquet : 676g
- Émetteur taille : 174 x 89 x 190 mm
- Taille de la boîte : 23.5 x 21.2 x 10.6 cm
- Puissance: 6v 1.5aa * 4
- Mode d'affichage : STN type positif translectif, 128 * 64 dot matrix va73 * 39mm, rétro-éclairage blanc.
- Mises à jour : oui
- Couleur : noir
- Certificat: ce0678 . FCC
- Plage de contrôle : 500m

Tableau IV.2 : Caractéristiques de la radiocommande RC FlySKy FS i6

IV.5. Le récepteur FS-IA6B :



Figure IV.12 : Récepteur FS-IA6B

Ce récepteur FlySky FS-iA6B dispose de six (6) voies et fonctionnera parfaitement avec les radiocommandes FlySky comme les FS-i4, FS-i6, FS-i10, etc ...Il a une portée de plus de 500 mètres grâce à ses deux antennes, il reste très compact et ses connecteurs permettent une installation propre. Le FS-iA6B fonctionne en PWM, PPM et iBus.

- Fréquence: 2.4055--2.475ghz
- Numéro de la bande largeur: 140
- Transmission de puissance: $\leq 20\text{dBm}$
- RF sensibilité du récepteur: -105dBm
- 2.Mode 4G: la deuxième génération d'une version améliorée du système numérique fm automatique
- Encodage: GFSK
- Longueur de l'antenne: 26mm * 2 (double antennes)
- Puissance d'entrée: DC 4.0-6.5v
- Dimension: 47 x 26.2 x 15mm
- Poids: 14.9 g
- Couleur: noir
- i-interface de bus: oui
- Interface d'acquisition de données: oui
- Type de modèle: avion / planeur / hélicoptère
- Émetteur compatible avec fs-i4. fs-i6. fs-i10. fs-gt2e, fs-gt2g

Tableau IV.3 : Caractéristiques du récepteur FS-IA6B

IV.6. Moteurs et hélices utilisés

Les moteurs que nous avons utilisés font partie d'une gamme développée par **EMAX** spécialement pour l'utilisation sur les multicoptères. Il permet une poussée de 440 grammes (voir tableau des caractéristiques ci-dessous). Théoriquement, avec quatre moteurs nous avons une portance de 4 x 440 grammes soit 1760 g ou 1.76 kg. En ce qui nous concerne, nous avons opté pour un drone avec un poids maximum qui ne dépasse pas 1 kg. A noter que sur les quatre moteurs utilisés nous avons de deux moteurs qui vont tourner dans le sens horaire (CW threads : Counter-Clockwise spinning motor) and les deux autres dans le sens contraire aux aiguilles d'une montre (CCW threads : Clockwise spinning motor).



Figure IV.13 : EMAX, MT2204-2300KV

Item :	EMAX MT2204	KV :	2300KV
Pole :	14	Max Thrust (g) :	440g w/ 6030 prop
Dimension :	27.9mm x 32.2mm		12V 11.5A / 16300rpm
Suitable :	500g~700g Drone	Max Power :	138W
Propeller :	5~6 inch	Weight :	25g
Cable length :	5cm	Li-Po :	2~3S
Mounting hole :	16mm x 19mm	Threads :	CCW threads

Tableau IV.4 : Caractéristiques du moteur MT2204-2300KV

En ce qui concerne le choix des hélices (longueur, constitution ...etc) il est également primordial pour le bon fonctionnement du drone. Elles doivent permettre aux moteurs de

conserver à la fois une bonne vitesse de rotation et un couple suffisant. Pour un quadrirotor nous devons également choisir deux hélices pour tourner dans le sens horaire et deux autres pour tourner dans le sens inverse. Nous avons opté pour des hélices de 7 inchs.

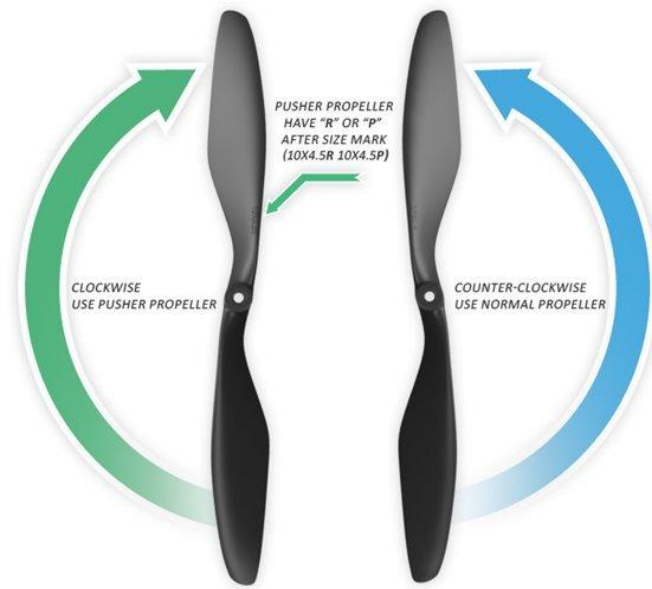


Figure IV.14 : Hélices utilisées

IV.7 Le châssis :

Pour réaliser le châssis de notre drone nous avons plusieurs contraintes à vérifier comme par exemple :

- Disponibilité
- Faible Coût
- Léger de point de vue masse
- Rigide en flexion
-etc

Nous avons donc opté pour une structure à base d'alucobond. Il s'agit d'un panneau composite constitué de deux tôles de parement aluminium et d'un noyau en plastique. L'assemblage nous donne un modèle « X » de 30 cm d'envergure (voir figure IV.15). Au milieu nous l'avons aménagé comme espace qui doit contenir la batterie Li-Po et toutes la circuiterie électronique embarquée à savoir les quatre (04) ESC, le récepteur, l'ardupilot et le raspberry avec sa caméra HD. Sur ses quatre angles droits on doit installer les 04 moteurs. Le câblage est assuré grâce à du fil souple de diamètre 1 mm. Tout l'ensemble pèse approximativement 700 grammes.

Le châssis de notre quadrirotor pèse seul 214 grammes comme nous pouvons le remarquer sur la figure ci-dessous. En effet, le poids du drone est un facteur prépondérant pour le bon fonctionnement du drone.



Figure IV.15 : Photo du châssis utilisé

IV.8 Mécanisme de fonctionnement de l'ensemble :

Pour pouvoir commander notre UAV, en – voici le schéma descriptif du système (figure IV.16). Les différents éléments de ce schéma sont :

1. Hélices
2. Moteurs Brushless
3. Connecteurs (dans notre cas des dominos)
4. Les ESCs
5. Batterie Li-Po
6. Distributeur de puissance (dans notre de simples Dominos de puissance)
7. Connecteurs (petits dominos)
8. Fil pour la commande des ESCs
9. Ardupilot
10. Non utilisé dans notre montage
11. Non utilisé dans notre montage
12. Non utilisé dans notre montage
13. Non utilisé dans notre montage
14. Non utilisé dans notre montage
15. Récepteur
16. Antennes
17. Radiocommande

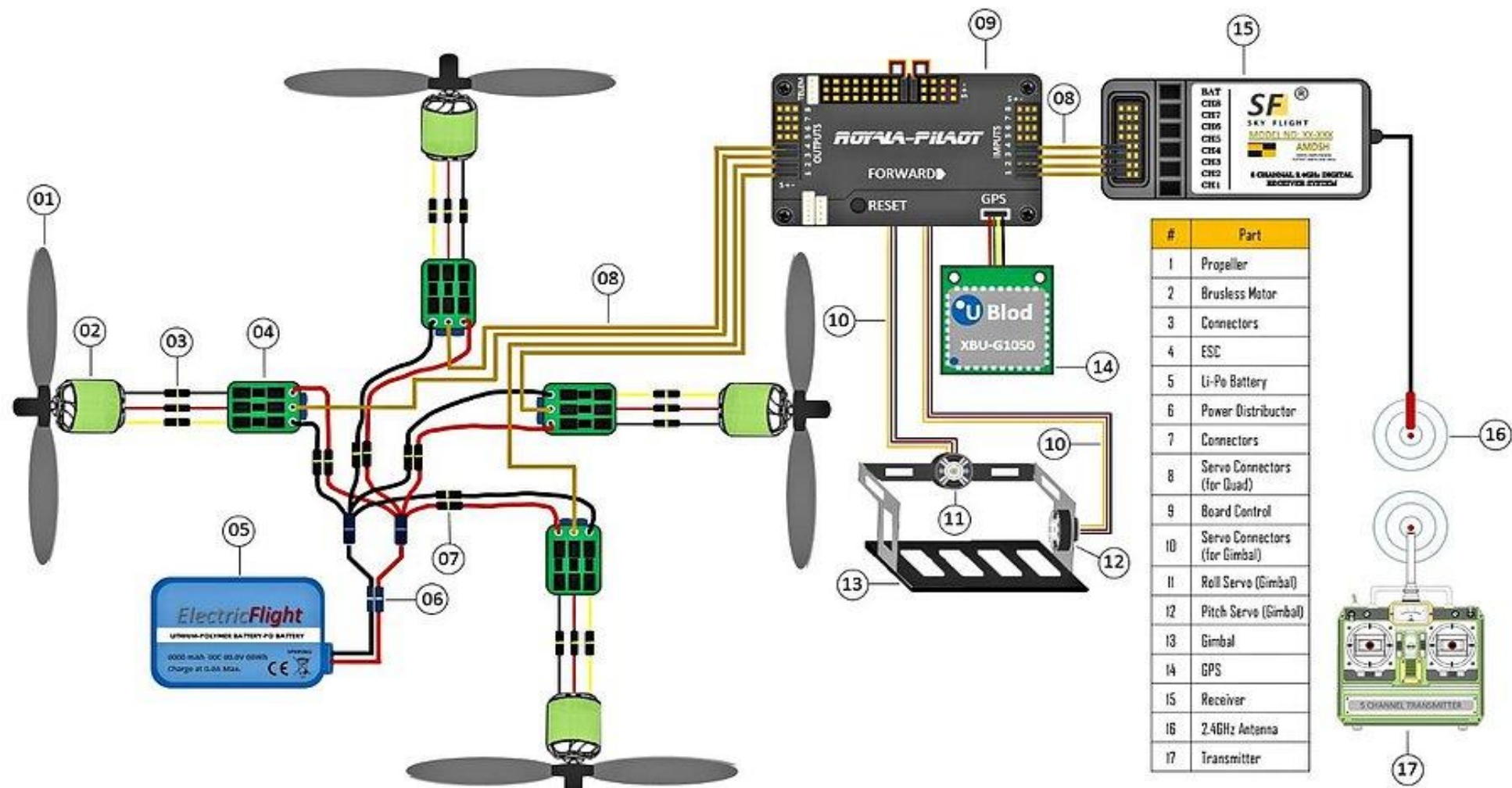


Figure IV.16 : Mécanisme de fonctionnement de l'ensemble [19]

Nous avons 04 ESC et 04 moteurs, soit un ESC pour un moteur. Les ESC sont ensuite connectés chacun à une broche output de la carte APM 2.6.

04 Canaux du récepteur FS – IA6B sont connectés à 04 broches inputs de l'APM 2.6. Une batterie alimente les 04 ESC, qui à leur tour, alimentent les 04 moteurs et la carte ardupilot méga 2.6. Chaque moteur, porte en son extrémité une hélice. Deux hélices tournent dans le sens horaire et les deux autres dans le sens anti-horaire.

La Radiocommande FS – i6, à partir de 3 positions mixées, envoie des signaux (commande) au récepteur, qui les communique ensuite à l'APM 2.6, qui à son tour, actionne à travers les ESC qui contrôlent les vitesses des moteurs, et donc les rotations des hélices.

Notons que l'ardupilot et le récepteur FS – IA6B embarqués tous les deux dans le drone sont alimentés par 5VDC fournies à partir de l'un des ESC. En effet, certains ESC peuvent délivrer en plus une tension de 5 VDC convertie à partir de la tension de la batterie LiPo dont la tension est supérieure à 5VDC. La tension de la batterie Li-Po dépend du nombre de cellules dont elle est formée. Dans notre cas, nous avons utilisé une batterie de 11.1 V DC.

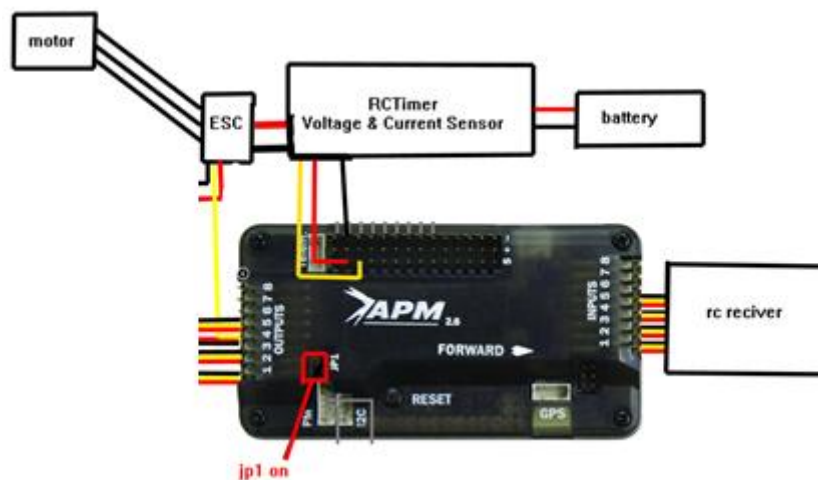


Figure IV.17 : Alimentation de l'APM 2.6 et du Récepteur

Le schéma suivant nous donne un aperçu sur le drone réalisé avec tous les circuits électroniques embarqués.

Figure IV.18 : photo du drone complet réalisé

IV.9. Calibrage des ESC avec la télécommande

IV.9.1. Appairage de la télécommande au récepteur

La toute première opération à effectuer (une seule fois) c'est l'appairage de la télécommande RC au récepteur. Le terme utilisé habituellement est "blinding". Cette opération est nécessaire la première pour qu'un récepteur puisse recevoir les signaux émis d'une radiocommande.



Figure IV.19 : Appairage de la télécommande RC au récepteur

L'appairage consiste donc à effectuer les opérations élémentaires suivantes :

- Mettre un shunt sur la dernière voie du récepteur entre la masse et la sortie signal.
- Alimenter le récepteur avec 5 VDC connectée entre le +Vcc et la masse sur les des voies.
- La led du récepteur doit clignoter.
- Mise sous tension de l'émetteur tout en maintenant son bouton d'appairage.
- L'opération d'appairage est alors effectuée si le voyant (Led) du récepteur reste allumer sans clignotement.

IV.9.2. Calibrage des ESC

La télécommande RC émet en principe des signaux selon plusieurs canaux au récepteur qui est censé être embarqué dans le drone. Ce dernier les décode et les retransmet sur ses sorties qui sont connectées avec le module de commande embarqué ou bien vers les ESC dans la phase de calibrage.

Lors du calibrage chaque sortie, correspondant à un canal, du récepteur radio possède 3 fils représentant respectivement l'alimentation +5VDC, la masse et le signal de commande. Le 5 VDC et la masse vont permettre entre autres d'alimenter le récepteur. Quant au troisième fil (signal) avec la masse de nouveau vont servir à commander l'ESC à travers lequel on pourra faire tourner le moteur brushless.

La première opération consiste à vérifier que la télécommande RC est bien configurée. Ces opérations de configuration doivent être effectuées sans les hélices sur les moteurs. C'est juste pour pouvoir vérifier la radiocommande RC arrive bien à contrôler les moteurs via les ESC. Ceci, doit donc être effectué comme suit

- Mise sous tension de la radiocommande et positionnant le manche des Gaz (Throttle) à fond vers le haut

-
- Les ESC doivent être directement connectés sur la voie des Gaz du récepteur radio
 - On alimente les ESC à partir de la batterie.
 - Une série de deux bips va alors confirmer l'initialisation du mode programme
 - On Baisse le manche des Gaz (Throttle) vers le bas
 - Une série de deux ou trios Bips va confirmer l'opération et le moteur va alors démarrer
 - Il faut Tester la poussée une ou deux fois pour vérifier que la voie n'est pas inversée

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une présentation de chacun des éléments qui entre dans la conception de notre quadrirotor. Nous avons aussi donné des détails sur les configurations indispensables à faire au préalable, afin que l'ensemble puisse communiquer. Enfin, nous avons expliqué le fonctionnement global du système de commande embarqué, en précisant le rôle ou l'action opérée par chaque élément.

Chapitre V : système de transmission vidéo embarqué

V.1 Introduction

Nous souhaitons embarquer une caméra HD dans notre drone. Compte tenu des contraintes qui nous sont imposées spécialement de point de vue disponibilité du matériel et du poids additionnel à notre drone nous avons opté pour un module Raspberry Pi avec une caméra HD. A l'aide de cet équipement nous serons en mesure de capturer une vidéo et de la transmettre à travers le WiFi en temps réel. Comme perspective cette vidéo capturée pourra être aussi utilisée pour une navigation autonome du drone ou encore une vidéo tracking.

Le matériel nécessaire pour atteindre cet objectif comprend 5 composants électroniques à savoir :

- ✓ un Raspberry Pi. Il existe plusieurs versions et toutes peuvent répondre à notre attente
- ✓ un module caméra HD pour le Raspberry,
- ✓ un dongle USB Wifi compatible, pour garantir la connexion WiFi entre le module raspberry embarqué sur le drone et le client terrestre
- ✓ une carte SD d'au minimum 4 Go. Elle doit pouvoir contenir le système d'exploitation (Raspbian par exemple que nous pouvons télécharger à partir du site officiel) et les logiciels à utiliser dans raspberry
- ✓ un câble d'alimentation pour assurer les 5V nécessaire au fonctionnement du Raspberry



Figure V.1 : Equipements nécessaires à la transmission vidéo

V.2 Raspberry Pi

Il s'agit d'un nano-ordinateur dont la taille ne dépasse pas les 2000 mm² (65 mm × 30 mm). Il permet l'exécution de plusieurs variantes du système d'exploitation libre GNU/Linux-Debian et des logiciels compatibles. Mais également avec systèmes d'exploitation windows et Android.



Figure V.2 : Raspberry Pi 3, B

Parmi ses caractéristiques technologiques nous pouvons citer :

Alimentation	Micro-USB 5 V
Processeur	Broadcom BCM2835 - ARM1176JZF-S 700 MHz (modèle 1) ou 1 GHz (Modèle Zero) ¹ Broadcom BCM2836 - Cortex-A7 900 MHz (modèle 2) Broadcom BCM2837 - ARM Cortex-A53 1.2GHz (modèle 3B) Broadcom BCM2837B0 - ARM Cortex-A53 1.4GHz (modèle 3B+)
Stockage	Carte SD (A, B), Carte microSD (A+, B+, 2B, 3B et 3B+)
Mémoire	256 Mo (modèle A et A+) 256 Mo (modèle B rev 1) 512 Mo (modèle B rev 2 et B+) 1 Go (modèle 2, 3B et 3B+)
Carte graphique	Broadcom VideoCore IV @250MHz (modèles 1, 2 et Zero); @400MHz (modèle 3B et 3B+)
Connectivité	USB, Ethernet (modèle B, B+, 2B, 3B, 3B+) (RJ45), HDMI, RCA, Jack 3,5 mm, Micro USB Bluetooth (3B = 4.1, 3B+ = 4.2), Wifi (modèle 3B, 3B+ et Zero W), PoE (modèle 3B+)
Dimensions	85,60 mm × 53,98 mm × 17 mm (A, B, B+, 2B, 3B et 3B+), 65 mm × 53,98 mm × 17 mm (A+), 65 mm × 30 mm × 5 mm (PCB v1.2, PCB ,1.3 et W)
Masse	44,885 g (A, B, B+, 2B, 3B), 23 g (A+)

Tableau V.1 : Caractéristiques du Raspberry [Wikipédia]

V.3 Camera HD Raspberry Pi

Cette caméra est d'une toute petite taille (2,5cm x 2,5cm) possédant un capteur d'images d'une résolution de 2592 x 1944 pixels capable d'enregistrer en 1080p à 30 images par secondes (ou bien 60 trames par seconde en 720p). Le nombre 1080 représente la définition verticale de l'image soit 1080 lignes. Quant à la lettre p elle signifie qu'il s'agit d'un balayage progressif contrairement au balayage entrelacé, utilisé entre autres en télévision, qui consiste à diviser une image en deux trames l'une contenant les lignes paires et l'autres les lignes impaires. Cette caméra se branche directement sur le port CSI du Pi prévu à cet effet.

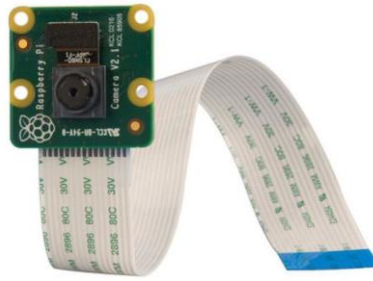


Figure V.3 : Caméra HD du Raspberry Pi



Figure V.4 : Caméra HD connectée au Raspberry Pi par le port CSI

Après avoir connecté la caméra HD au module Raspberry à travers le connecteur CSI, une première configuration s'impose afin d'activer le fonctionnement de la caméra.

V.4 Configuration du Raspberry Pi et de la caméra

Pour installer le système d'exploitation Raspbian sur la carte Raspberry on doit commencer tout d'abord par préparer la carte mémoire SD. Dans une seconde étape le module Raspberry doit être connecté temporairement au réseau grâce à un câble Ethernet, à un écran grâce au connecteur HDMI et à un clavier USB pour la configuration de base. La carte SD préparée avec Raspbian doit être insérée dans son connecteur avant d'alimenter le module Raspberry. Ensuite, on doit suivre les instructions pour que l'OS Raspbian devient opérationnel. Généralement, l'installation du système sur la carte raspberry se fait grâce à la commande suivante qui doit être tapée dans un terminal Linux :

```
dd bs=4M if=2016-02-09-raspbian-jessie.img of=/dev/sdb
```

V.4.1 Activation du SSH dans Raspbian

Secure Shell (SSH) est un protocole de communication sécurisé. Il doit être activé dans Raspbian pour être en mesure de contrôler le système même s'il n'y a ni moniteur ni clavier connecté. Nous devons par la même occasion activer également le module caméra dans le menu de configuration de Raspbian pour qu'elle puisse être utilisée.

On commence par mettre à jour le firmware de notre Raspberry Pi:

```
sudo apt-get install rpi-update  
sudo rpi-update  
ensuite les fichiers doivent être aussi mis à jour :  
sudo apt-get update  
sudo apt-get upgrade
```

Ceci étant nous avons maintenant la possibilité de nous connecter à la console Linux du Raspberry depuis n'importe quel ordinateur du réseau. Pour cela nous aurons besoin du logiciel PuTTY à accès libre qui doit être installé dans le poste client. Ainsi, nous aurons la possibilité de contrôler le module Raspberry à partir de cet ordinateur. Ceci va nous permettre, entre autres, de configurer la connexion wifi et la caméra HD qui doit être déjà connectée au module Raspberry à travers le connecteur CSI.

V.4.2 Configuration de la connexion WiFi du Raspberry

Comme nous souhaitons transmettre de la vidéo du Raspberry embarqué dans le drone à l'aide d'une connexion WiFi, nous devons préalablement installer et configurer le dongle USB WiFi. A cet effet, à partir de la console de notre ordinateur (fenêtre PuTTY), on doit modifier les propriétés réseau du Raspberry Pi : `sudo nano /etc/network/interfaces`

On ajoute ensuite les lignes suivantes à la fin de ce fichier (ou modifiez les lignes si elles existent, pour qu'elles correspondent à celles-ci) :

```
allow-hotplug wlan0  
iface wlan0  
inet dhcp  
wpa-ssid "LE_SSID_DU_RESEAU"  
wpa-psk "LE_MOT_DE_PASSE_DU_RESEAU"
```

Après un redémarrage du Raspberry en utilisant l'instruction `sudo reboot`, la connexion WiFi doit devenir opérationnelle.

V.4.3 Activation de la Caméra HD

A l'aide de la commande `sudo raspi-config`. Une fenêtre va s'ouvrir et nous offre la possibilité d'activer ou désactiver la caméra.

Nous pouvons également déclarer le module permettant d'ajouter la fonctionnalité de gestion de la caméra au noyau Linux pour qu'il soit chargé automatiquement au démarrage en exécutant la commande suivante : `sudo nano /etc/modules`

On ajoute alors la ligne : `bcm2835_v4l2` puis on redémarre notre raspberry.

V.5 Méthodes de transmission vidéo

Il existe plusieurs méthodes permettant au raspberry connecté à sa caméra de lire et de diffuser la vidéo. Certaines méthodes transmettent du streaming vidéo et d'autres, une succession d'images avec une cadence dument choisie. A noter que dans le cas d'un streaming vidéo la consommation électrique du raspberry devient prohibitive surtout quand il est embarquée dans un drone. Peut-être il serait donc judicieux d'opter pour la seconde approche à savoir envoyer des images avec une cadence relativement lente. Dans ce qui suit nous allons nous contenter de décrire deux méthodes de diffusion uniquement l'une en streaming vidéo et la seconde en succession d'images. Néanmoins, dans notre travail et compte tenu de la contrainte d'économie énergétique dans un drone, nous opterons pour la seconde méthode.

V.5.1 streaming VLC

Cette méthode est basique et consiste simplement à installer sur la raspberry le lecteur multimédia VLC (pour VideoLAN Client). Pour l'installer il suffit d'exécuter la commande :

```
apt-get install vlc
```

Ensuite nous devons rediriger le streaming vers VLC vers la sortie à l'aide de la commande **raspivid** à l'aide de la commande suivante :

```
raspivid -t 0 -n --width 1280 --height 720 -o - | cvlc stream:///dev/stdin --sout '#standard{access=http,mux=ts,dst=:8090}' :demux=h264
```

Dans les postes clients notamment les PC, censés capter la vidéo transmise, il suffit de lire le flux vidéo avec le lecteur VLC installé sur ces PC en utilisant la commande :

```
http://adresse_ip_du_pi:8090
```

Cette méthode pose plusieurs problèmes notamment la consommation énergétique et la latence (retard entre l'émission et la réception). Mais elle présente l'avantage de pouvoir réceptionner.

V.5.2 MJPG-streamer

A l'aide de cette technique, il ne s'agit plus d'un streaming vidéo mais une transmission et un affichage d'une succession d'images captées et transmises avec une certaine cadence. Le MJPEG (Motion Joint Expert Group) est une méthode de compression de la vidéo mais en agissant sur les images individuellement sans prendre en considération la notion de la redondance temporelle. Autrement dit, la vidéo est compressée comme étant des images fixes séparées. On arrive avec cette technique à diffuser et afficher que 5 à 10 images par seconde maximum. Ceci s'explique par le taux de compression assuré par MJPEG qui n'est pas très élevé. On commence par installer les dépendances de **mjpg-streamer** ainsi que subversion :

```
apt-get install subversion libv4l-dev libjpeg8-dev imagemagick
```

mjpg-streamer aura besoin d'un fichier videodev.sh pour fonctionner correctement :

```
ln -s /usr/include/linux/videodev2.h /usr/include/linux/videodev.h
```

On doit ensuite télécharger la dernière version de **mjpg-streamer** grâce à subversion, puis l'installer en utilisant les commandes suivantes :

```
svn co https://svn.code.sf.net/p/mjpg-streamer/code/  
cd code/mjpg-streamer  
make USE_LIBV4L2=true clean all  
make DESTDIR=/usr install
```

Une fois installé, un répertoire temporaire doit être créé. On lance alors **raspistill** en mode **timelapse** pour capturer 2 images par secondes :

```
mkdir /tmp/stream  
raspistill --nopreview -w 640 -h 480 -q 5 -o /tmp/stream/pic.jpg -t1 500 -t  
9999999
```

Enfin, on lance **mjpg-streamer** grâce à cette commande :

```
LD_LIBRARY_PATH=/usr/local/lib mjpg_streamer -i "input_file.so -f /tmp/stream -n pic.jpg" -o  
"output_http.so -w ./www"
```

Par défaut, **mjpg-streamer** lancera un serveur web sur le port 8080/TCP auquel on pourra accéder avec un navigateur en utilisant l'adresse : http://adresse_du_pi:8080

```
<div id="webcam"></div>
```

```
<script type="text/javascript">  
var imageNr = 0;  
var finished = new Array();  
var paused = false;  
function createImageLayer() {  
    var img = new Image();  
    img.style.position = "absolute";  
    img.style.zIndex = -1;  
    img.onload = imageOnload;  
    img.onclick = imageOnClick;  
    img.src = "http://adresse_ip_du_pi:8080/?action=snapshot&n=" + (++imageNr);  
    var webcam = document.getElementById("webcam");  
    webcam.insertBefore(img, webcam.firstChild);  
}  
  
function imageOnload() {  
    this.style.zIndex = imageNr; // Image finished, bring to front!  
    while (1 < finished.length) {  
        var del = finished.shift(); // Delete old image(s) from document  
        del.parentNode.removeChild(del);  
    }  
    finished.push(this);  
    if (!paused) createImageLayer();  
}  
</script>
```

V.6 Raspberry et caméra HD embarquée

Notre objectif est bien sûr d'embarquer le Raspberry et sa caméra HD dans notre drone. Il faut donc lui assurer une alimentation continue DC de l'ordre de 5 VDC. Néanmoins, la seule source d'alimentation électrique qui se trouve dans le drone est une batterie Li-Po 3S 2200 mAh. Autrement dit, c'est une alimentation avec 3 cellules, chacune de 3.7 VDC. Autrement dit, c'est une batterie qui délivre quand elle est chargée une tension continue de 11.1 Volts DC. Pour alimenter le Raspberry il faut donc convertir cette tension en 05 VDC. Certains ESC peuvent nous garantir cette conversion. C'est ce que nous avons utilisé. Au lieu donc d'alimenter le Raspberry à travers son connecteur USB comme il est d'usage, nous allons l'alimenter à travers son port GPIO (General Purpose Input/Output). Il suffit donc de connecter le 5VDC et la masse de l'ESC respectivement aux pins 02 et 06 du GPIO. GPIO représente donc les ports d'entrées sorties du raspberry. Il existe différentes bibliothèques pour le gérer et le programmer ce qui va permettre au raspberry de se connecter à d'autres circuits électroniques et pourra ainsi jouer le rôle de contrôleur. Cependant, le GPIO ne possède pas des entrées sorties analogiques car il est conçu que pour traiter des signaux numériques. Ceci dit, nous pouvons toujours lui rajouter des CAN et des CNA.

Pin#	NAME		NAME	Pin#
01	3.3v DC Power	Red	DC Power 5v	02
03	GPIO02 (SDA1 , I ² C)	Blue	DC Power 5v	04
05	GPIO03 (SCL1 , I ² C)	Blue	Ground	06
07	GPIO04 (GPIO_GCLK)	Green	(TXD0) GPIO14	08
09	Ground	Black	(RXD0) GPIO15	10
11	GPIO17 (GPIO_GEN0)	Green	(GPIO_GEN1) GPIO18	12
13	GPIO27 (GPIO_GEN2)	Green	Ground	14
15	GPIO22 (GPIO_GEN3)	Green	(GPIO_GEN4) GPIO23	16
17	3.3v DC Power	Red	(GPIO_GEN5) GPIO24	18
19	GPIO10 (SPI_MOSI)	Purple	Ground	20
21	GPIO09 (SPI_MISO)	Purple	(GPIO_GEN6) GPIO25	22
23	GPIO11 (SPI_CLK)	Purple	(SPI_CE0_N) GPIO08	24
25	Ground	Black	(SPI_CE1_N) GPIO07	26
27	ID_SD (I ² C ID EEPROM)	Yellow	(PC ID EEPROM) ID_SC	28
29	GPIO05	Green	Ground	30
31	GPIO06	Green	GPIO12	32
33	GPIO13	Green	Ground	34
35	GPIO19	Green	GPIO16	36
37	GPIO26	Green	GPIO20	38
39	Ground	Black	GPIO21	40

Figure V.5 : Port GPIO du Raspberry

V.7 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à l'utilisation d'une caméra embarquée HD connectée à un module Raspberry. En réalité le raspberry a été sous utilisé dans ce cas. Comme il s'agit d'un véritable petit ordinateur avec son propre système d'exploitation et la possibilité d'utiliser des logiciels de programmation tel que Python. Donc ses possibilités de traitement sont très importantes. Il est alors très intéressant de pouvoir bénéficier plus de ses atouts technologiques

CONCLUSION GENERALE

Dans notre projet de fin d'études Master intitulé "systèmes électroniques embarqués", nous nous sommes intéressés à l'étude et la réalisation d'un quadrirotor. Ce choix n'a pas été fortuit, mais bien au contraire il est basé sur une mure réflexion et des objectifs bien tracés. Nous avons souhaité que ce travail soit d'abord un complément à notre formation. Ensuite, il doit être orienté vers l'électronique embarquée en premier lieu mais aussi qu'il soit un projet multidisciplinaire afin de nous permettre de comprendre et de maîtriser les jonctions possibles entre notre spécialité avec d'autres spécialités techniques différentes. A cet effet, les systèmes quadrirotors ont besoin de beaucoup de connaissances dans des domaines très variés tels que la mécanique, l'aéronautique, l'informatique, l'automatique, l'électronique et aussi les télécommunications. Pour cette raison notre mémoire est relativement gros avec un nombre de pages assez élevé et surtout avec cinq chapitres. Le premier chapitre, que nous avons voulu le plus succinct possible, présente les définitions et les fondements de base sur les drones. Le second chapitre est dédié aux principes de fonctionnement des drones et la présentation des différents mouvements possibles. Le troisième chapitre est consacré à la modélisation dynamique du quadrirotor et à son contrôle. Le quatrième chapitre est le cœur de notre projet, il décrit toute la réalisation pas à pas et justifie le choix des composants. Quant au dernier chapitre il est consacré à la transmission vidéo à l'aide d'un raspberry et une caméra HD embarqués.

PERSPECTIVES

Le perspectives de notre travail sont nombreuses et touchent tous les éléments de notre réalisation au bien le software et le hardware. Tout d'abord nous proposons de travailler sur un autre châssis avec des moteurs et hélices adéquates pour nous permettre de soulever des poids plus importants et assurer une stabilité nettement meilleure. Pour le contrôleur du vol nous proposons d'utiliser un autre système embarqué, comme par exemple raspberry, et pouvoir programmer des régulateurs plus performants que les classiques PIDs. Le raspberry sera donc utilisé comme contrôleur de vol mais aussi et surtout mieux gérer la caméra embarquée. En effet, la caméra peut être utilisée aussi comme moyen de mesure et de correction de la position et de la vitesse du drone, d'éviter les obstacles et de détection et de suivi d'objets ...etc.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Michel Asensio. "les drones et les opérations en réseau". Segmentation mission, fondation pour la recherche stratégique ,2008
- [2] Rodrigo Martinez-Val, Carlos Hernandez. "Preliminary design of a low speed, long endurance remote piloted vehicles (RPV) for civil applications". Aircraft Design 2 (1999) ,167-182
- [3] G, Romeo, G, Frulla, and E, Cestino. "Design of a high-altitude long-endurance solar-powered unmanned air vehicle for multi-payload and operations". Proc. IMechE Vol. 221 Part G: J. Aerospace Engineering 2007
- [4] Air and Space Europe, Current and Future UAV Military Users and Applications, VOL .1, NO 5/6, 1999
- [5] Michel Asensio. "Les drones tactiques à voilure tournante dans les engagements contemporains". Recherches & Documents, N° 08, 2010
- [6] John K. Borchardt. "Unmanned aerial vehicles spur composites use". 2004 Elsevier.
- [7]. RCtoys, <http://www.rc toys.com/>.
- [8]. S. Bouabdallah. "Design and control of quadrotors with application to autonomous". Thèse Lausanne, EPFL 2007.
- [9] William Premerlani and Paul Bizard. Direction Cosine Matrix IMU: Theory. Mai 2009 flying
- [10] S. Bouabdallah, and R. Siegwart. "Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor". IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA, Barcelona, Spain, 2005.
- [11] S. Bouabdallah _Design and control of quadrotors with application to autonomous flyin _ Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL 2007.
- [12] H. Bouadi, M. Bouchoucha, Laws Design Based on Sliding Mode for an UAV Type-Quadrotor Engineering Letters, London, England, Vol. 15, No. 2, pp. 15-24, 2007.
- [13] H. Bouadi, and M. Tadjine Nonlinear observer design and sliding mode control for four rotors helicopter Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Venise, Italy, Vol. 25, pp. 225-230, 2007.
- [14] N. Guenard, T. Hamel, and V. Moreau modélisation et élaboration de commande de stabilisation de vitesse et de correction d'assiette pour un drone CIFA, 2004
- [15] Vincent Cocquempot _Contribution à la surveillance des systèmes industriels complexes, thèse doctorat, Université de Lille, 2004
- [16] N. RACHEDI _ Commande hybrid avec observation d'un UAV de type Quadrotor, mémoire de magistère, EMP Bordj EL-Bahri, Algérie, Janvier 2011
- [17] <http://jsturm.de/wp/>
- [18] <http://tpe-drone-tlm.eclablog.com/recent/2>
- [19] <http://quadsforfun.wixsite.com/quadsforfun/typical-quad-circuit>
- [20] <http://ardupilot.org/copter/docs/advanced-multicopter-design.html>

[21] P. Gabrlik, J. Vomocil, L. Zalud. ‘‘The Design and Implementation of 4 DOF Control of the Quadrotor’’. 12th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems. The International Federation of Automatic Control September 25-27, 2013. Velke Karlovice, Czech Republic.

[22] Axel Reizenstein. Position and Trajectory Control of a Quadcopter Using PID and LQ Controllers. Master of Science Thesis in Electrical Engineering. Department of Electrical Engineering, Linköping University (Sweden), 2017

[23] Courage Agho. Dynamic model and control of quadrotor in the presence of uncertainties. Bachelor of Science University of South Carolina, 2015 USA.

[24] Stig Espen Krisitiansen. Quadrotor Modeling and Control. Master Thesis, Satellite Engineering Department of Electrical Engineering, University of Tromsø campus Narvik, Narvik, Norway June 24, 2016.

[25] M Idres, O Mustapha and M Okasha. Quadrotor trajectory tracking using PID cascade control. AEROS Conference 2017 12 December 2017, Putrajaya, Malaysia.

[26] Malyuta, Danylo. Guidance, Navigation, Control and Mission Logic for Quadrotor Full-cycle Autonomy. Master Thesis 2018 Institute of Robotics and Intelligent Systems (IRIS) Germany

ANNEXE

Moteurs MT2204, 2300KV



MT2204 SPECIFICATIONS

KV:2300

MAX Thrust:440G

NO.OF CELL:2-3S

Frammework:12N14P

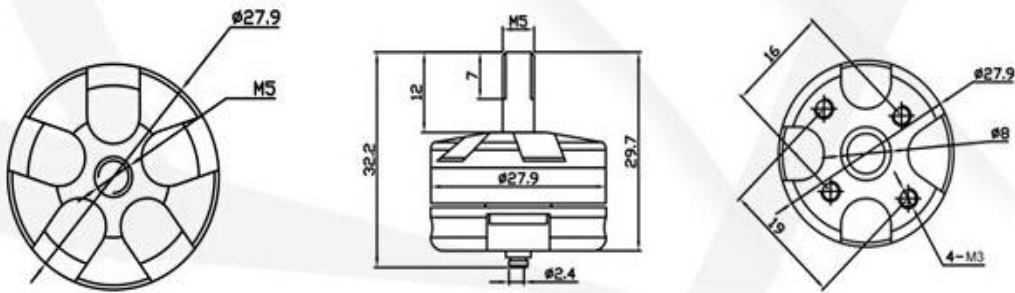
Propeller:5"-6"

Length:32.2MM

Weight:25G

Shaft:3MM

Diameter:27.9MM



The voltage (V)	Paddle size	current (A)	thrust (G)	power (W)	efficiency (G/W)	speed (RPM)
8	Carbon Fibre Prop 6x3	6.4	240	51.2	4.7	11910
12	Carbon Fibre Prop 5x3	7.5	310	90.0	3.4	20100
	Carbon Fibre Prop 6x3	11.5	440	138.0	3.2	16300