



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de la Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de diplôme

**Master**

En

« Génie électrique »

Option :

« Automatique des systèmes de production »

Titre :

**Réalisé par :**

**Encadré par :**

**Etude et réalisation d'un drone de  
type quadrotor**

KHLEDJ Abdennour

Mr.IKNI Samir

BOUGAR Oussama

Année universitaire

**2016 - 2017**

## Remerciement

الحمد لله الذي أحانني وأنار لي طريق العلم ووفقني لإتمام عملي المتواضع

والصلاة والسلام على

محمد سيد المرسلين وعلى آله وصحبه أجمعين إلى يوم الدين

*Je remercie Dieu « **ALLAH** » tous puissants qui m'a donné le courage de confronter ce nouveau domaine, et la force de réaliser ce travail.*

*Je tiens à remercier les personnes qui grâce à eux, je ne pourrai jamais être là, ma mère et mon père. Ainsi que toute ma famille.*

*Je tiens à remercier, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur **Mr. Samir IKNI**, qui m'a aidé beaucoup dans la réalisation de mon drone et ses précieux conseils*

*Enfin je tiens à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés dans notre projet.*

"**اللهم** علمنا ما ينفعنا وانفعنا بما علمتنا وزدنا علما"



## Dédicaces

الحمد لله الذي أماننا بالعلم وزيننا بالعلم وكرمنا بالتقوى وجعلنا بالعافية

**J**e dédie ce mémoire

**A**mes chers parents. Ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant et

Qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études, et

Mon très cher père est la plus belle perle du monde

**P**our leur patience, leur amour, leur soutien et leurs

Encouragements.

**A** tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé

**A**mes frères.

Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur

**A**mes amis et mes camarades.

Pour une sincérité si merveilleuse ...jamais oubliable, en leur souhaitant

Tout le succès ...tout le bonheur.

**S**ans oublier tous les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

**A** tout personne

Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie

# Table des matières

Remerciement	<i>i</i>
Dédicaces	<i>ii</i>
Table des matières	<i>iii</i>
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Symboles et abréviations	ix
Symboles	ix
Abréviations	xi
Introduction générale	1

## Chapitre I : Généralité et Etat de l'art sur les UAVs

I.1.Introduction	2
I.2.Etat de l'art	2
I.2.1.l'hélicoptère Classiques	3
I.2.2.L'hélicoptère mono rotor	3
I.2.3 L'hélicoptère birotor coaxiale	4
I.2.4 L'hélicoptère birotor (un rotor pour chaque extrémité)	5
I.2.5 L'hélicoptère Multi rotor (hélicoptère à plusieurs voilures tournantes)	5
I.3 Généralités sur les UAV	6
I.3.1.Définition d'UAV	6
I.3.2.Bref Historique	6
I.3.3 Classification des drones	9
A. Selon la taille	9
B. Selon le mode de propulsion	9
I.3.4.Utilisation des drones	10
I.3.5 Les applications des drones	11
I.4.Drone civil : définition, avantages, législation et Les contraintes	11
I.4.1.Les principaux avantages du drone	11
I.4.2.Les principaux intérêts du drone	12
I.4.3.Les contraintes	13
I.5.Drone civil: la réglementation	13
I.6.Conclusion	13

## Chapitre.II: principe de fonctionnement et Modélisation D'un drone quadrotor

II.1. Introduction	14
II.2.Description générale du quadrotor	15

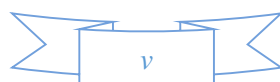
<b>II.3.Modélisation dynamique du Quadrotor</b>	<b>16</b>
<b>II.3.1.Modèle dynamique du quadrotor</b>	<b>16</b>
<b>II.3.2 Matrice de rotation</b>	<b>18</b>
<b>II.3.3 Effets physiques agissants sur le Quadrotor</b>	<b>19</b>
<b>II.3.3.1 Les forces</b>	<b>19</b>
<b>II.3.3.2 les Moment</b>	<b>20</b>
<b>II.3.3.3 Effet gyroscopique</b>	<b>20</b>
<b>I.3.4. Développement du modèle mathématique selon Newton-Euler</b>	<b>21</b>
<b>I.3.4.1. Equations de mouvement de translation</b>	<b>23</b>
<b>I.3.4.2. Equations de mouvement de rotation</b>	<b>23</b>
<b>II.3.5. La représentation d'état du système</b>	<b>25</b>
<b>II.4. Sens de rotation des voilures tournantes</b>	<b>27</b>
<b>II.5. Mouvements possibles</b>	<b>27</b>
<b>II.5.1. Le Lacet</b>	<b>28</b>
<b>II.5.2. Le Tangage et le Roulis</b>	<b>29</b>
<b>II.6.Mode de vol</b>	<b>31</b>
<b>II.6.1 Vol vertical</b>	<b>31</b>
<b>II.6.2 Vol stationnaire</b>	<b>32</b>
<b>II.6.3.Vol de translation</b>	<b>32</b>
<b>II.7. Définition des repères :</b>	<b>33</b>
<b>II.8.Conclusion</b>	<b>33</b>

## **Chapitre : III. la commande d'un drone**

<b>III.1. Introduction</b>	<b>34</b>
<b>III.2.Definition Arduino</b>	<b>34</b>
<b>III.3.L'interface</b>	<b>34</b>
<b>III.4.Les fenetres de commande ARDUINO</b>	<b>36</b>
<b>III.4.1.La première étape</b>	<b>36</b>
<b>III.4.2.deuxième étape</b>	<b>36</b>
<b>III.4.3.troisième étape</b>	<b>37</b>
<b>III.5.intérêt d'investir dans une carte Arduino</b>	<b>38</b>
<b>III.6.Fonctionnement/utilisation</b>	<b>38</b>
<b>III.7.Un joystick</b>	<b>38</b>
<b>III.8.Télécommande</b>	<b>38</b>
<b>III.9.Déterminer la position des axes</b>	<b>40</b>
<b>III.10.Sérialisation des signaux reçus</b>	<b>40</b>
<b>III.11.Emission</b>	<b>41</b>
<b>III.12.L'ensemble Batterie-Variateur-Moteur</b>	<b>41</b>
<b>III.13.Le contrôle du moteur grâce à l'Arduino</b>	<b>41</b>
<b>III.14.les mouvements principaux du quadrotor</b>	<b>42</b>
<b>III.14.1.Monter/descendre</b>	<b>43</b>
<b>III.14.2.Avancer/reculer Le tangage</b>	<b>43</b>
<b>III.14.3.Gauche/Droite Le roulis</b>	<b>44</b>
<b>III.14.4.Le lacet</b>	<b>45</b>
<b>III.15.Conclusion</b>	<b>45</b>

## **Chapitre. IV : Réalisation du drone quadrotor**

<b>IV.1.Introduction</b>	<b>46</b>
<b>IV.2.Cahier de charge</b>	<b>46</b>
<b>IV.3. Architecture du projet</b>	<b>47</b>
<b>IV.4.Les capteurs</b>	<b>47</b>
<b>IV.5.Branchement des capteurs avec la carte ARDUINO</b>	<b>49</b>
<b>IV.6.Matériel utilisé pour la structure mécanique et les étapes de la construction</b>	<b>49</b>
<b>IV.6.1.Le châssis</b>	<b>49</b>
<b>IV.6.2.Les hélices</b>	<b>51</b>
<b>IV.6.3. Les moteurs</b>	<b>51</b>
<b>IV.6.4.La batterie</b>	<b>52</b>
<b>IV.7.La structure générale (complet) d'un drone quadrotor</b>	<b>53</b>
<b>IV.8.Conclusion</b>	<b>55</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>56</b>
<b>respectives</b>	<b>57</b>
<b>Difficultés rencontrées</b>	<b>58</b>
<b>Résumé</b>	
<b>Bibliographie</b>	



# Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Hélicoptère Classiques (un rotor principal et un rotor de queue).	03
<b>Figure I.2</b> : Hélicoptère mono rotor	04
<b>Figure I.3</b> : Hélicoptère birotor coaxial.	04
<b>Figure I.4</b> : Helicopter birotor (Sea Knight CH-46 aircraft)	05
<b>Figure I.5</b> : Quadrotor	06
<b>Figure II.1</b> : Vue globale de notre drone	16
<b>Figure II.2</b> : Structure générale d'un quadrotor	17
<b>Figure II.3</b> : Géométrie du Quadrotor	18
<b>Figure II.4</b> : Sens de rotation des rotors du quadrotor	27
<b>Figure II.5</b> : Illustration du mouvement de lacet	28
<b>Figure II.6</b> : mouvement de lacet	28
<b>Figure II.7</b> : forces aérodynamiques	29
<b>Figure II.8</b> : tangage et roulis	30
<b>Figure II.9</b> : illustration du mouvement de tangage	30
<b>Figure II.10</b> : Illustration du mouvement de roulis	31
<b>Figure II.11</b> : Illustration du mouvement vertical	32
<b>Figure II.12</b> : Illustration du mouvement de translation	32
<b>Figure III.1</b> : L'interface du logiciel Arduino	35
<b>Figure III.2</b> : Les boutons.	35
<b>Figure III.3</b> : la fenêtre pour écrire le programme	36
<b>Figure III.4</b> : boutons pour la vérification le programme	37
<b>Figure III.5</b> : bouton pour téléverser le programme	37
<b>Figure III.6</b> : photographie de télécommande (joystick)	39
<b>Figure III.7</b> : L'ensemble Batterie-Variateur-Moteur	41
<b>Figure III.8</b> : Le contrôle du moteur grâce à l'Arduino	42
<b>Figure III.9</b> : Monter/descendre	43
<b>Figure III.10</b> : Avancer/reculer Le tangage	44

<b>Figure III.11</b> : Gauche/Droite Le roulis	44
<b>Figure III.12</b> : Le lacet	45
<b>Figure IV.1</b> : Architecture du projet	45
<b>Figure IV.2</b> : Le magnétomètre 3axes HMC5843	48
<b>Figure IV.3</b> : L'accéléromètre, et les gyroscopes.	48
<b>Figure IV.4</b> : La carte ARDUINO	48
<b>Figure.IV.5</b> : branchement des capteurs sur l'ARDUINO	49
<b>Figure IV.6</b> : photographie de conception de la structure.	50
<b>Figure IV.7</b> : photographie de conception de la structure.	50
<b>Figure.IV.8</b> : Les hélices	51
<b>Figure IV.9</b> : photographie d'un moteur avec hélice.	52
<b>Figure IV.10</b> : photographie d'un moteur sans hélice.	52
<b>Figure IV.11</b> : la batterie	53
<b>Figure IV.12</b> : La structure générale (complet) d'un drone quadrotor.	54



## Liste des tableaux

TABLE.I.1 : quelques projets de quadrotors

08

# Symboles et abréviations

## Symboles

$R_q(x_q, y_q, z_q)$  : est le repère lié au drone selon la convention nord-ouest-haut.

$R_t(x_t, y_t, z_t)$  : est le repère lié à la terre selon la convention nord-ouest-haut.

$\omega_p$  : est la vitesse angulaire de l'hélice.

$P, Q, R$  : sont les angles de rotation autour des axes  $x_q, y_q$  et  $z_q$  respectivement.

$\dot{P}, \dot{Q}, \dot{R}$  : Sont les vitesses de rotation autour des axes  $x_q, y_q$  et  $z_q$  respectivement.

$\varphi, \theta, \psi$  : sont des angles de cardon utilisés dans les matrices de rotation pour passer du repère  $R_t$  au repère  $R_q$ .

$\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$  : Sont les vitesses angulaires de cardan.

$R(\psi, \theta, \varphi)$  : est la matrice de rotation (passage du repère  $R_t$  au repère  $R_q$ ).

$R(z_t, \psi)$  : est la matrice de rotation élémentaire autour de  $z_t$  d'un angle.

$R(y', \theta)$  : est la matrice de rotation élémentaire autour de  $y'$  d'un angle  $\theta$ .

$R(x'', \varphi)$  : est la matrice élémentaire autour de  $x''$  d'un angle  $\varphi$ .

$R^T(\psi, \theta, \varphi)$  : est la matrice transposée de  $R(\psi, \theta, \varphi)$  égale en meme temps a la matrice inverse.

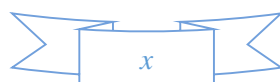
$R^T(\theta, \varphi)$  : est la matrice transposée de  $R(\theta, \varphi)$  égale en meme temps ala matrice inverse.

$R^T(\varphi)$  : est la matrice transposée de  $R(\varphi)$  en meme temps a la matrice inverse.

$I_{3,3}$  : Est la matrice identité.

$F$  Force de poussée

<b><i>W</i></b>	Vitesse de rotation dans le repère fixe
<b><i>V</i></b>	Vitesse linéaire dans le repère fixe
<b><i>R</i></b>	Matrice de rotation
<b><i>T</i></b>	Matrice de transformation
<b><i>X</i></b>	Vecteur de position
<b><i>F</i></b>	Angle de roulis
<b><i>Q</i></b>	Angle de tangage
<b><i>Y</i></b>	Angle de lacet
<b><i>W</i></b>	Vitesse de rotation de moteur



## Abréviations

<b>M1</b>	moteur1
<b>M2</b>	moteur2
<b>M3</b>	moteur3
<b>M4</b>	moteur4
<b>RC</b>	radio commande
<b>RF</b>	radio fréquence
<b>3D</b>	trois démentions
<b>DDL</b>	degré de liberté
<b>PPM</b>	Pulse-Position Modulation
<b>LALE</b>	Löw Altitude Long Endurance
<b>MALE</b>	Medium Altitude Long Endurance
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicule
<b>BF</b>	Boucle Fermée.
<b>E/S</b>	Entrées/Sorties.
<b>LTI</b>	Linéaires Invariants dans le Temps.

## Introduction générale :

Récemment, le contrôle des engins volants a attiré l'attention des chercheurs automaticiens. Différentes approches ont été proposées pour contrôler les avions, hélicoptères, fusées, satellites, mini hélicoptères, drones, etc. [1, 2, 3, 4]. Chacun de ces appareils ne dispose pas de modèle précis décrivant son comportement.

L'intérêt pour les drones aériens télécommandés semble grandir de plus en plus notamment pour des applications militaires (démontage par exemple) et l'intervention dans des milieux hostiles (milieux radioactifs). On peut imaginer un drone afin d'explorer un immeuble ou un tunnel contaminé et de réaliser une première observation avant toute intervention humaine.

La recherche dans le domaine des véhicules aériens autonomes est essentiellement pluridisciplinaire. En effet elle fait intervenir des domaines très variés tels que l'aérodynamique, le traitement du signal et de l'image, la commande automatique, la mécanique, les matériaux composites, l'informatique temps réel

Dans ce mémoire, nous nous intéressons en particulier aux véhicules aériens miniatures et plus particulièrement à un quadrotor (micro hélicoptère à quatre hélices). Les drones quadrotors sont parmi les plus complexes des objets volants, parce que leur dynamique de vol est intrinsèquement non linéaire, et les variables sont fortement couplées. Le quadrotor a la capacité d'effectuer un vol stationnaire, ce qui est requis dans certaines applications.

L'objectif de ce projet est de construire un drone quadrotor, piloté via une radiofréquence (**RF**), ainsi une réalisation d'une centrale inertielle, qui pourra être utilisé par la suite dans le mode de vol autonome. Ensuite développer un modèle dynamique de ce quadrotor qui servira de base à deux approches de régulation autour de la position d'équilibre (vol stationnaire). Tout d'abord une approche classique par proportionnelle intégrale dérivée, puis une approche dite plus moderne la commande linéaire quadratique

## Chapitre I : Généralité et Etat de l'art sur les UAVs

### I.1.Introduction :

Un drone est un engin volant qui capable de voler et d'effectuer une mission sans présence humain à bord, il peut voler d'une façon autonome ou à l'assistance d'un pilote à une station. Les drones sont capables de transporter des caméras, des capteurs, des équipements de communication ou d'autres dispositifs. Ils sont utilisés pour réaliser des missions de reconnaissance, de recherche d'informations ou des opérations de combat, etc.

### I.2.Etat de l'art :

Au début du nouveau millénaire, les progrès dans de nombreuses technologies tel que la propulsion, les matériaux, l'électronique, les ordinateurs, les capteurs, les instruments de navigation, etc. ont contribué au développement des drones hélicoptères et d'autres configurations de véhicules aériens. [1].

Les drones hélicoptères peuvent être utiles dans de nombreux domaines, du civile aux militaires. Les utilités civiles sont la surveillance, le sauvetage (en mer et en montagne), ambulance aérienne, lutte contre l'incendie, etc. les rôles militaires comprennent le déminage, la surveillance du champ de bataille, etc. [2].

Aujourd'hui les drones hélicoptères jouent un rôle très important dans l'aviation moderne. Les nouvelles générations des drones qui sont capables de faire un vol stationnaire, sont conçues pour être petits, plus légers et avec certaines fonctions d'autonomies. [2-5].

On peut citer à titre d'exemple les drones à voilure tournante ou les Hélicoptères qui peuvent être classés comme suit :

1. l'hélicoptère Classiques (un rotor principal et un rotor de queue).
2. l'hélicoptère mono rotor.
3. l'hélicoptère birotor coaxial.
4. l'hélicoptère birotor (un rotor pour chaque extrémité).
5. Multi rotor par exemple : le quadrotor (hélicoptère à quatre voilure tournante).

### I.2.1. l'hélicoptère Classiques :

La configuration la plus courante est la configuration conventionnelle. C'est une combinaison d'un rotor principal et un rotor de queue (voir la Figure I.1).

La configuration classique a une bonne contrôlabilité et manœuvrabilité. Sauf que, la structure mécanique est complexe, elle nécessite un grand rotor et une longue poutre de queue. [1].



**Figure I.1** : Hélicoptère Classiques (un rotor principal et un rotor de queue).

### I.2.2. l'hélicoptère mono rotor :

Ce type de configuration aérodynamique a un rotor unique et un aileron qui compense la rotation autour de l'axe Z produite par le couple du rotor (commande de lacet). De plus le rotor n'a pas de plateau cyclique pour les rotations autour des deux axes X (roulis) et Y (tangage), mais il a des ailerons supplémentaires pour produire le tangage et le roulis (voir la figure I, 2)



**Figure I.2 :** Hélicoptère mono rotor

### **I.2.3 L'hélicoptère birotor coaxiale :**

Dans cette configuration, un rotor est situé au-dessus de l'autre (voir la Figure I.3). Les deux rotors tournent dans des directions opposées. En fonction de la différence de vitesse angulaire entre les deux rotors, l'hélicoptère va tourner à gauche ou à droite



**Figure I.3 :** Hélicoptère birotor coaxial.



### I.2.4 L'hélicoptère birotor (un rotor pour chaque extrémité) :

La configuration, Tandem rotor (ou Birotor, côte à côte) est principalement utilisée dans les hélicoptères de grande taille (voir la figure I.4). La construction du système de contrôle est beaucoup plus compliquée par rapport à un hélicoptère avec un rotor de queue. La disposition des deux rotors côte à côte n'a jamais été très populaire [34].



**Figure I.4 :** Helicopter birotor (Sea Knight CH-46 aircraft)

### I.2.5 L'hélicoptère Multi rotor (hélicoptère à plusieurs voilures tournantes) :

L'hélicoptère à quatre hélices ou quadrotor est le plus populaire parmi les hélicoptères multi rotor (voir la Figure I.5). L'un des avantages de l'utilisation d'un hélicoptère multi rotors, est la capacité d'emporter des poids élevés car il a plus de portance. [3].

Les quadrotors sont très maniables, ils permettent le décollage vertical et à l'atterrissage, ainsi que le vol en zones difficiles à atteindre. Les inconvénients sont la masse de l'hélicoptère et la consommation accrue d'énergie due à des moteurs. Comme il est contrôlé par des changements de vitesse du rotor, il est plus adapté aux moteurs électriques, les moteurs d'hélicoptères qui ont de grandes réponses lentes ne peuvent pas être satisfaisants sans un bon système de boîte de vitesse [4].



Figure I.5 : Quadrotor.

### I.3 Généralités sur les UAV :

#### I.3.1. Définition d'UAV :

Un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) ou drone est : un véhicule aérien motorisé, qui ne transporte pas d'opérateur humain, utilise la force aérodynamique pour assurer sa portance, peut voler de façon autonome ou être piloté à distance, être réutilisable ou récupérable et qui emporte une charge utile létale ou non létale [1].

#### I.3.2. Bref Historique :

Malgré que la configuration "Quadrotor" n'a pas obtenue beaucoup d'attention jusqu'au début des années 80. Depuis, plusieurs chercheurs ont commencé à s'intéresser à cette configuration pour des raisons de simplicité, de capacité à supporter une charge utile et son cout réduit.

Depuis 2001, plusieurs centres de recherche et de groupes de spécialistes en aéronautique ont commencé à publier les premiers résultats à propos de la modélisation et de la commande de cet hélicoptère à quatre rotors tels que : les travaux de l'université de Compiègne

et le projet 'Robovolint' en France, ceux de l'université de Lakehead au Canada et beaucoup d'autres

Actuellement, de nombreux projet de recherche sont basés sur des jouets comme le draganflyer [7], ensuite les chercheurs les ont modifiés en embarquant plus de capteurs et des systèmes de communication. Peut de groupes s'intéressent à la conception et la réalisation des quadrotors, et la minorité de ces groupes le fait de manière optimale (considération de la conception et le contrôle) [8].

Voici une table [I.1] proposée par l'auteur de [8], qui regroupe probablement les projets les plus intéressants de ces 10 dernières années











Projet	Université	photo
Mesicopter	Stamford	
E. Altug's Thèse	Pennsylvanie	
P. Castillo's Thèse	Compiègne	
A. Clifton's Thèse	Vanderbilt	
P. Pounds's Thèse	ANU	
N. Guenard's Thèse	CEA	
Starmac	Stamford	
M. Kemper's Thèse	Oldenburg	
P. Tournier's Thèse	MIT	
MD4-200	microDrones GmbH	

TABLE.I.1 : quelques projets de quadrotors.

### I.3.3 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** : 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** : 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 s'emportent de faibles charges.

#### B. Selon le mode de propulsion :

On peut aussi classer les drones selon le fonctionnement aérodynamiques dont on trouve :

- 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 vertical.
  - 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 on trouve entre autres : Mono-rotor, birotor, tris-rotor, Quadro rotor.

#### **I.3.4.Utilisation des drones :**

Pour les applications, militaires, généralement secrètes et sensibles. Les drones sont utilisés pour :

- La préservation maximale de la vie des soldats en tenant l'information disponible en temps réel [1].
- 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 [1].
- Les missions principales telles que la reconnaissance, l'espionnage et l'écoute.

Dans le domaine civil, ils sont utilisés dans une grande variété d'applications :

- Recherche et sauvetage dans les endroits inaccessibles et dangereux, comme les montagnes, la mer et les centrales chimiques [2]
- 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 [1].
- 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 [3].

### I.3.5 Les applications des drones :

Les drones peuvent être faire des centaines d'applications, parmi ceux-ci [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.
- Industrie :
  - 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 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 :

Les drones présentent plusieurs avantages :

- 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].
- - Mise en œuvre rapide par une unité proche d'une zone d'opération ou au contact et dont les données sont exploitée 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.
- Evolue dans des zones difficiles d'accès
- Inspection de zones dangereuses ou polluées
- Mise en action rapide
- Le plus économique des moyens aériens
- Vol stationnaire
- Vision 360°

#### **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 :

Et éventuellement des inconvénients techniques et pratiques tels que :

- En tant qu'engins non habités et présentant des risques de défaillances techniques irrécupérables, ils nécessitent des certifications rigoureuses pour être autorisé à voler.
- Il y a très peu d'éléments disponibles en matière d'étude de fiabilité, de concept de maintenance sur les drones en général et de coûts 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:

En Algérie, la loi applicable aux drones inclue des dispositions relatives à la fois au droit civil et au 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.**

De part leur connaissance de ces textes, les pilotes de BC Drone Réalisation respectent et appliquent ces lois, ce qui est pour vous gage de sécurité [6].

### I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous proposons un état de l'art des drones. Une description des différentes configurations des drones hélicoptères est donnée. Nous proposons aussi des configurations plus modernes réalisées très récemment soit par des chercheurs universitaires, soit par le secteur militaires

## **Chapitre.II.principe de fonctionnement et Modélisation D'un drone quadrotor :**

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation dynamique en vue de la commande du système quadrotor. Après avoir donné la description de ce système, la structure générale et le

Principe de vol, nous mettons en évidence le modèle d'état adopté à ce système

### **II.1. Introduction :**

Afin de concevoir un contrôleur de vol, on doit d'abord comprendre profondément les mouvements de l'avion, sa dynamique et par conséquent ses équations dynamiques. Cette compréhension est nécessaire non simplement pour la conception du contrôleur, mais aussi pour s'assurer que les simulations du comportement de véhicule sont plus proche que possible de la réalité lorsque la commande est appliquée.

Le quadrotor 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 l'expression de ces effets diffèrent pour chaque mode de vol. En effet les modèles dynamiques du quadrotor proposés dans [13-14] changent en fonction des taches planifiées et en fonction des milieux de navigation définis à priori par l'opérateur.

Un quadrotor est un hélicoptère composé de quatre rotors à voilure tournante. La figure ci-dessous représente une photo de notre drone quadrotor. C'est un engin omnidirectionnel à décollage vertical et à atterrissage vertical (VTOL) capable de faire des vols stationnaires. Il est constitué de quatre pales à pas fixe accouplées à des moteurs à courant continu.[15]



Figure II.1 : Vue globale de notre drone quadrotor

## II.2.Description générale du quadrotor :

Un quadrotor 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'une croix, et l'électronique de contrôle est habituellement placée au centre de la croix. 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 de la croix.

Le fonctionnement d'un quadrotor 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 quadrotor 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 inférieure au nombre des sorties)

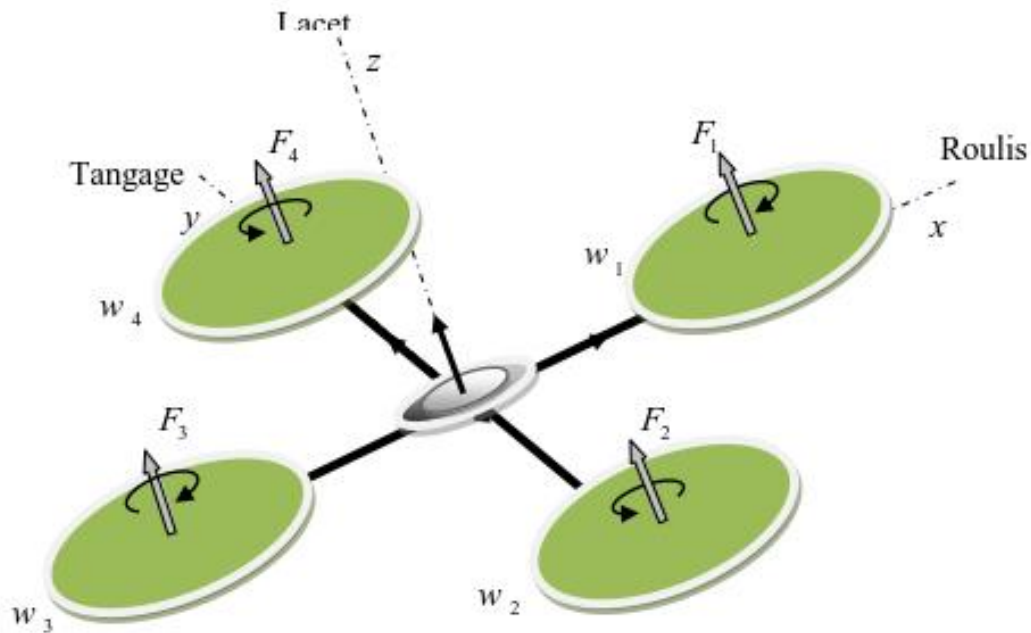


Figure II.2 : Structure générale d'un quadrotor

### II.3.Modélisation dynamique du Quadrotor :

Beaucoup de tentatives de modélisation du drone sont enregistrées dans la littérature, telle que celle établie par Lozano [3] en utilisant la méthode Euler-Lagrange [4], ou encore, le modèle présenté par Hamel [5] basé sur le formalisme de Newton a été obtenu à partir de la dynamique d'un corps rigide associé au fuselage auquel sont ajoutées les forces aérodynamiques générées par les rotors, ce modèle en plus intègre la dynamique des actionneurs. Notre approche de modélisation est basée sur le formalisme de Newton.

#### II.3.1.Modèle dynamique du quadrotor :

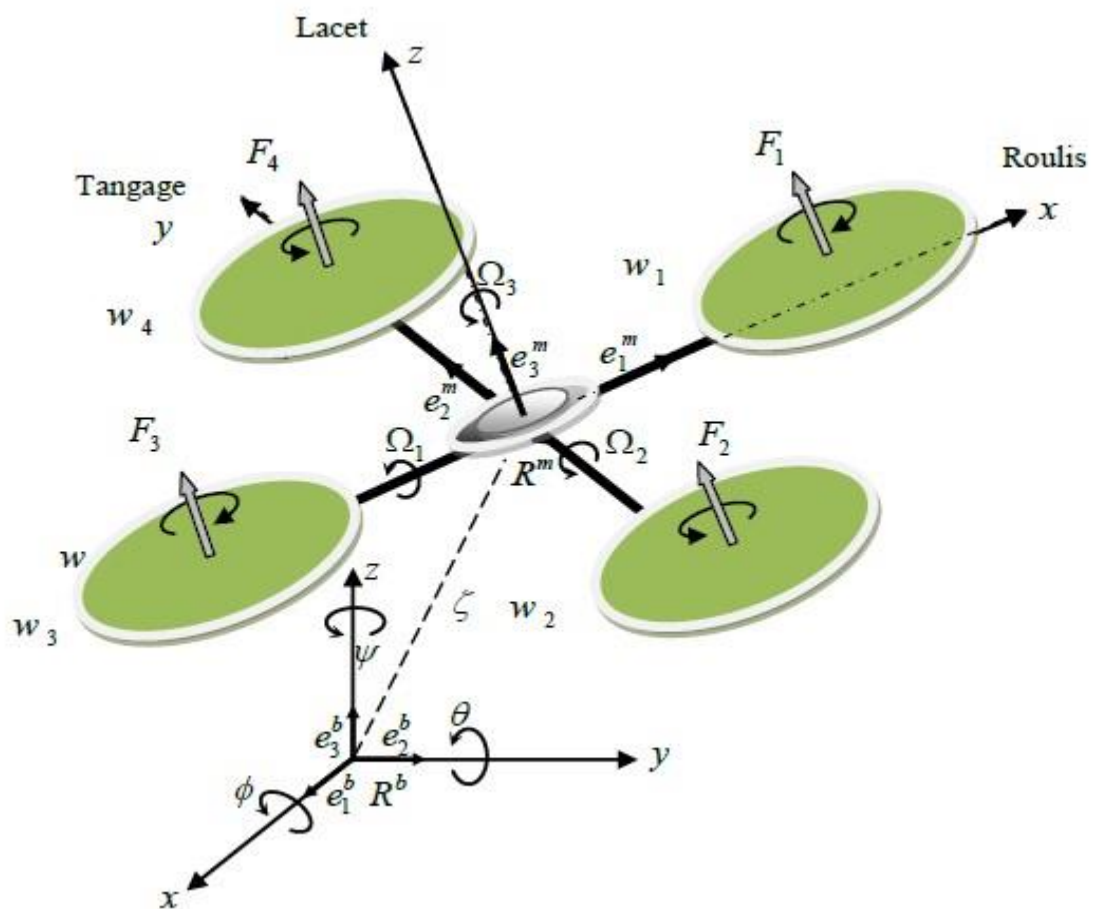
La modélisation des quadrotor est très difficile puisque la dynamique du système est fortement non linéaire et couplée. Afin de pouvoir comprendre au mieux le modèle dynamique développé ci-dessous, nous considérons les hypothèses suivantes :

- La structure du quadrotor est supposée rigide et symétrique, ce qui induit que la matrice d'inertie sera supposée diagonale,
- Les hélices sont supposées rigides pour pouvoir négliger l'effet de leur déformation lors de la rotation.
- Le centre de masse et l'origine du repère lié à la structure coïncident.

- Les forces de portance et de 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 quadrotor on utilise deux repères, un repère fixe lié à la terre  $R^b$  et un autre mobile  $R^m$  lié au centre de gravité de quadrotor. Le passage entre le repère mobile et le repère fixe est donné par une matrice dite matrice de transformation  $T$  qui contient l'orientation et la position de repère mobile par rapport au repère fixe

On choisit le placement des axes comme suit :



**Figure II.3 :** Géométrie du Quadrotor.

$$T = \begin{bmatrix} R & \zeta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (I.1)$$

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

### II.3.2 Matrice de rotation

En utilisant les angles d'Euler les matrices des rotations sont :

- La rotation autour de  $x$  par l'angle  $\phi$  traduite par la matrice :

$$R(x, \phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{pmatrix} \quad (\text{I.2})$$

- La rotation autour de  $y$  par l'angle  $\theta$  traduite par la matrice :

$$R(y, \theta) = \begin{pmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{pmatrix} \quad (\text{I.3})$$

- La rotation autour de  $z$  par l'angle  $\psi$  traduite par la matrice :

$$R(z, \psi) = \begin{pmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{I.4})$$

La matrice globale de rotation entre le repère  $R^b$  et  $R^m$  est

$R = R(\phi, \theta, \psi) = R(x, \phi) * R(y, \theta) * R(z, \psi)$  . En effectuant le produit de ces trois matrices en obtient :

$$R(\phi, \theta, \psi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{I.5})$$

$$R(\phi, \theta, \psi) = \begin{pmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta s\phi + s\psi s\phi \\ c\theta s\psi & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{pmatrix} \quad (\text{I.6})$$

Avec  $c = \cos$ , et  $s = \sin$  ;

### II.3.3 Effets physiques agissants sur le Quadrotor :

#### II.3.3.1 Les forces :

**Le poids :** il donnée par  $P = mg$ , ou  $m$ : est la masse et  $g$  la gravité.

**Les forces de poussée :** qui sont des forces provoquées par la rotation des moteurs, elles sont perpendiculaires sur le plan des hélices.

$$F_i = b\omega_i^2 \quad (I.7)$$

Avec

$i = 1 : 4$ , et  $b$  le coefficient de portance.

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

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

$$T_h = d\omega^2 \quad (I.8)$$

Avec  $d$  est le coefficient de drag.

- La trainée selon les axes ( $x$   $y$   $z$ ): elle est due au mouvement du corps du quadrotor

$$F_t = K_{ft}v \quad (I.9)$$

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

### II.3.3.2 les Moment :

#### Moment dus aux forces de poussée :

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

$$M_x = (F_4 - F_2) = (\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (\text{I.10})$$

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

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

$$M_y = l(F_3 - F_1) = lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \quad (\text{I.11})$$

#### Moments dus aux forces de trainée :

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

$$M_z = (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (\text{I.12})$$

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

$$M_a = K_{fa}\Omega^2 \quad (\text{I.13})$$

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

### II.3.3.3 Effet gyroscopique :

L'effet gyroscopique se définit comme la difficulté de modifier la position ou l'orientation du plan de rotation d'une masse tournante. Dans notre cas il y a deux moments gyroscopiques, le premier est le moment gyroscopique des hélices, l'autre est le moment gyroscopique dû aux mouvements de quadrotor.

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



$$M_{gh} = \sum_1^4 \Omega \wedge J_r [0 \ 0 \ (-1)^{+1} \ \omega_i]^T \quad (\text{I.14})$$

Avec :

$J$  Est l'inertie des rotors.

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

$$M_{gh} = \Omega \wedge J\Omega \quad (\text{I.15})$$

Avec :

$J$  Est l'inertie du système.

### II.3.4. Développement du modèle mathématique selon Newton-Euler [6]

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta = v \\ m\zeta = F_f + F_t + F_g \\ R = RS(\Omega) \\ J\Omega = -\Omega \wedge J\Omega + M_f - M_a - M_{gh} \end{array} \right. \quad (\text{I.16})$$

Avec  $\zeta$  : est le vecteur de position du quadrotor,

$m$  : La masse totale du quadrotor,

$\Omega$  : La vitesse angulaire exprimée dans le repère fixe,

$R$  : La matrice de rotation,

$\wedge$  : Le produit vectoriel,

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

$$J = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (\text{I.17})$$

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

$$S(\Omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I.18})$$

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

$$F_f = R * [0 \ 0 \ \sum_{i=1}^4 F_i]^T \quad (\text{I.19})$$

$$F_i = b\omega_i^2$$

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

$$F_t = \zeta \begin{bmatrix} -K_{ftx} & 0 & 0 \\ 0 & -K_{fity} & 0 \\ 0 & 0 & -K_{ftz} \end{bmatrix} \quad (\text{I.20})$$

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

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

$$F_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (\text{I.21})$$

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

$$M_f = \begin{bmatrix} l(F_4 - F_2) \\ l(F_3 - F_1) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (\text{I.22})$$

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

$$M_a = \begin{bmatrix} K_{fax} \dot{\phi}^2 \\ K_{fay} \dot{\theta}^2 \\ K_{faz} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} \quad (I.23)$$

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

### II.3.4.1. Equations de mouvement de translation :

On a :

$$m\zeta = F_f + F_t + F_g \quad (I.24)$$

On remplace chaque force par sa formule (19.I, 20.I et 21.I), on trouve :

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi s\theta c\phi - s\psi c\phi \\ c\theta c\phi \end{bmatrix} \sum_{i=1}^4 F_i - \begin{bmatrix} K_{ftx} \dot{x} \\ K_{fity} \dot{y} \\ K_{ftz} \dot{z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} \quad (I.25)$$

On obtient alors les équations différentielles qui définissent la dynamique du translation :

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} (\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi) (\sum_{i=1}^4 F_i) - \frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} (s\psi s\theta c\phi - s\psi c\phi) (\sum_{i=1}^4 F_i) - \frac{K_{fity}}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} (c\theta c\phi) (\sum_{i=1}^4 F_i) - \frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g \end{cases} \quad (I.26)$$

### II.3.4.2. Equations de mouvement de rotation :

On a :

$$J\Omega = -M_{gm} - M_{gh} + M_f - M_a \quad (I.27)$$

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

$$\begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \wedge \left( \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} \\ -J_r \bar{\Omega}_r \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{fax} \dot{\phi}^2 \\ K_{fay} \dot{\theta}^2 \\ K_{faz} \dot{\psi}^2 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} l(F_4 - F_2) \\ l(F_3 - F_1) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (I.28)$$

On obtient alors les équations différentielles définissant la dynamique de la rotation :

$$\begin{cases} I_x \dot{\phi} = -\theta \dot{\psi} (I_z - I_y) - J_r \bar{\Omega}_r \dot{\theta} - K_{fax} \dot{\phi}^2 + lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ I_y \dot{\theta} = \phi \dot{\psi} (I_z - I_x) + J_r \bar{\Omega}_r \dot{\phi} - K_{fay} \dot{\theta}^2 + lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ I_z \ddot{\psi} = -\dot{\phi} \dot{\theta} (I_y - I_x) - K_{faz} \dot{\psi}^2 + d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \quad (I.29)$$

Avec :

$$\bar{\Omega}_r = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 \quad (I.30)$$

En conséquence, le modèle dynamique complet régit la dynamique du quadrotor est :

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \dot{\theta} \dot{\psi} \frac{(I_y - I_z)}{I_x} - \frac{J_r}{I_x} \bar{\Omega}_r \dot{\theta} - \frac{K_{fax}}{I_x} \dot{\phi}^2 + \frac{l}{I_x} u_2 \\ \ddot{\theta} = \dot{\phi} \dot{\psi} \frac{(I_z - I_x)}{I_y} + \frac{J_r}{I_y} \bar{\Omega}_r \dot{\phi} - \frac{K_{fay}}{I_y} \dot{\theta}^2 + \frac{l}{I_y} u_3 \\ \ddot{\psi} = -\dot{\phi} \dot{\theta} \frac{(I_x - I_y)}{I_z} - \frac{K_{faz}}{I_z} \dot{\psi}^2 + \frac{1}{I_z} u_4 \\ \ddot{x} = -\frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} + \frac{1}{m} u_x u_1 \\ \ddot{y} = -\frac{K_{fity}}{m} \dot{y} + \frac{1}{m} u_y u_1 \\ \ddot{z} = -\frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g + \frac{\cos(\phi) \cos(\theta)}{m} u_1 \end{cases} \quad (I.31)$$

Avec :

$$\begin{cases} u_x = (c\phi c\psi s\theta + s\phi s\psi) \\ u_y = (c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi) \end{cases} \quad (I.32)$$

Et :

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -lb & 0 & lb \\ -lb & 0 & lb & 0 \\ d & -d & d & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (\text{I.33})$$

À partir de (I.32), on trouve :

$$\begin{cases} \phi_d = \arcsin( u_x \sin(\psi_d) - u_y \cos(\psi_d) ) \\ \theta_d = \arcsin \left( \frac{u_x \cos(\psi_d) + u_y \sin(\psi_d)}{\cos(\phi_d)} \right) \end{cases} \quad (\text{I.34})$$

### II.3.5. La représentation d'état du système :

On choisit le vecteur d'état suivant [6]

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

On obtient la représentation d'état suivante :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3 \bar{\Omega} r x_4 + b_1 u_2 \\
 \dot{x}_3 &= x_4 \\
 \dot{x}_4 &= a_4 x_2 x_6 + a_5 x_4^2 + a_6 \bar{\Omega} r x_2 + b_2 u_3 \\
 \dot{x}_5 &= x_6 \\
 \dot{x}_6 &= a_7 x_2 x_4 + a_8 x_6^2 + b_3 u_4 \\
 \dot{x}_7 &= x_8 \\
 \dot{x}_8 &= a_9 x_8 + \frac{1}{m} u_x u_1 \\
 \dot{x}_9 &= x_{10} \\
 \dot{x}_{10} &= a_{10} x_{10} + \frac{1}{m} u_y u_1 \\
 \dot{x}_{11} &= x_{12} \\
 \dot{x}_{12} &= a_{11} x_{12} + \frac{\cos(\phi) \cos(\theta)}{m} u_1 - g
 \end{aligned} \tag{I.35}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{(I_y - I_z)}{I_x}, a_2 = -\frac{K_{f_{ax}}}{I_x}, a_3 = -\frac{J_r}{I_x}, a_4 = \frac{(I_z - I_x)}{I_y}, a_5 = -\frac{K_{f_{ay}}}{I_y}, a_6 = \frac{J_r}{I_y} \\ a_7 = \frac{(I_x - I_y)}{I_z}, a_8 = -\frac{K_{f_{az}}}{I_z}, a_9 = -\frac{K_{f_{tx}}}{m}, a_{10} = -\frac{K_{f_{ty}}}{m}, a_{11} = -\frac{K_{f_{tz}}}{m}, b_1 = \frac{l}{I_x} \\ b_2 = \frac{l}{I_y}, b_3 = \frac{1}{I_z} \end{array} \right. \quad (I.36)$$

#### II.4. 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.4). De plus, pour faciliter la gestion des commandes et les calculs, le rotor numéro 1 est choisi comme l'avant du micro hélicoptère

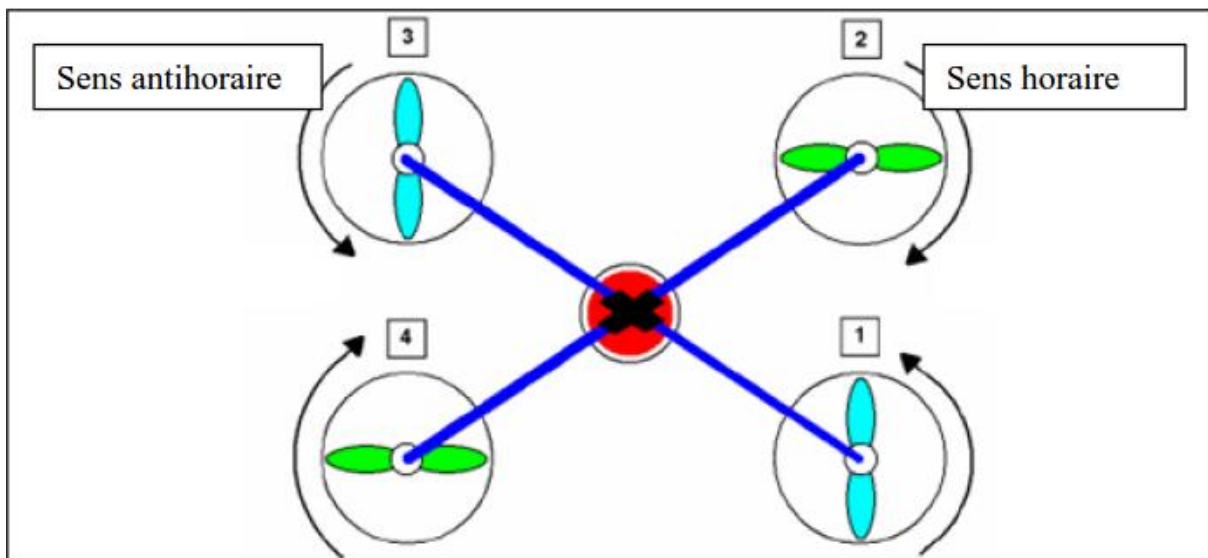


Figure II.4 : Sens de rotation des rotors du quadrotor.

#### II.5. Mouvements possibles :

Il existe quatre mouvements possibles pour un quadrotor : la poussée, le lacet, le tangage et le roulis. Le mouvement de correspond à la montée ou à la descente de l'appareil. Pour faire s'élever le quadrotor, il suffit d'augmenter la vitesse des quatre moteurs et pour le

faire redescendre, il faut réduire cette dernière.

### II.5.1. Le Lacet :

La rotation autour de l'axe z est appelée lacet en aéronautique. Lorsque les moteurs tournent à vitesse égale le couple d'anti-rotation est nul et l'hélicoptère ne tourne pas. Pour modifier l'angle de lacet, il faut faire varier la vitesse de rotation sur le couple d'hélices un et trois ou deux et quatre en fonction de l'angle désiré sur le lacet (voir la Figure II.5 et II.6).

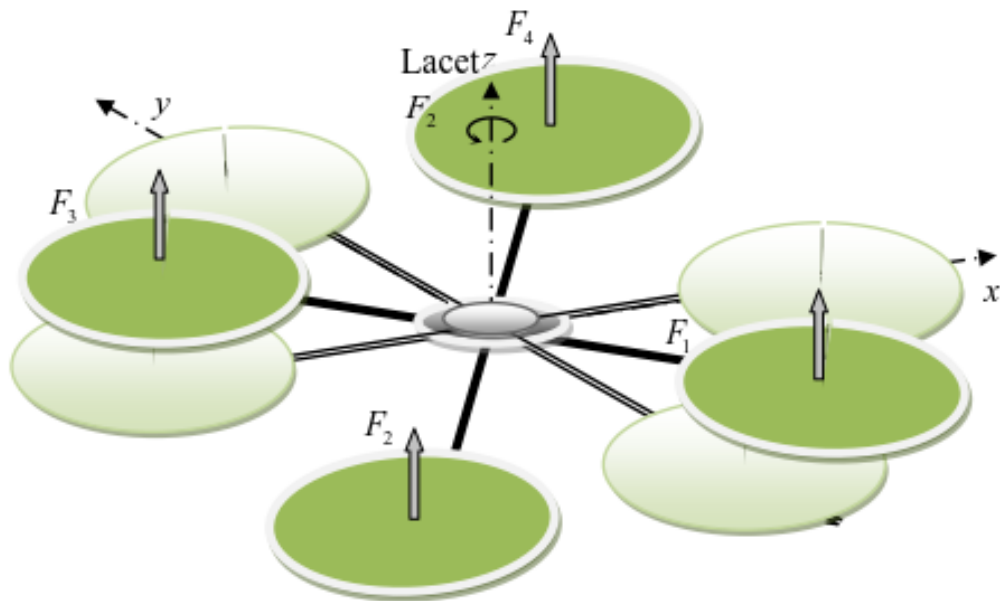


Figure II.5 : Illustration du mouvement de lacet

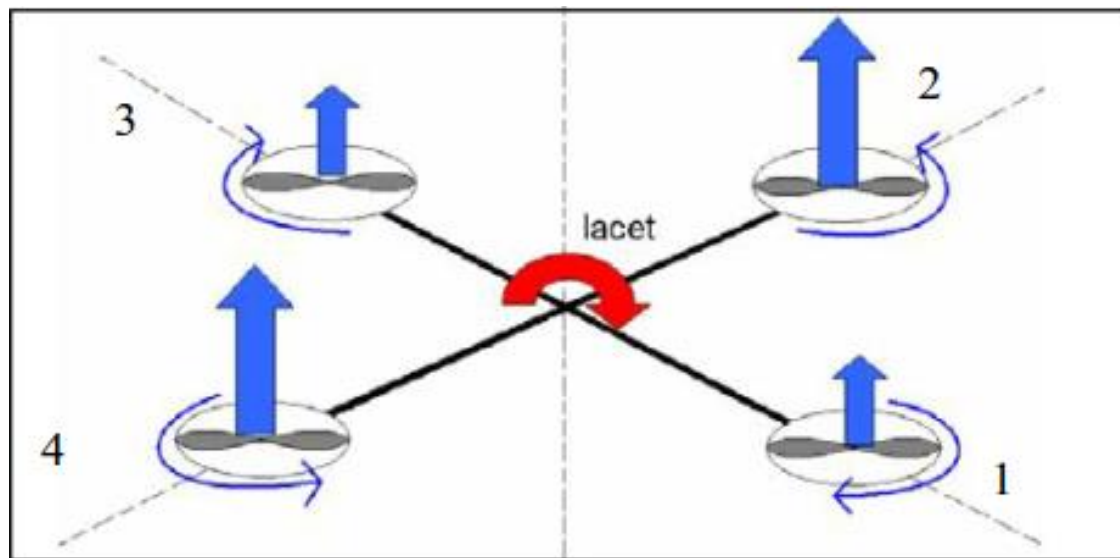
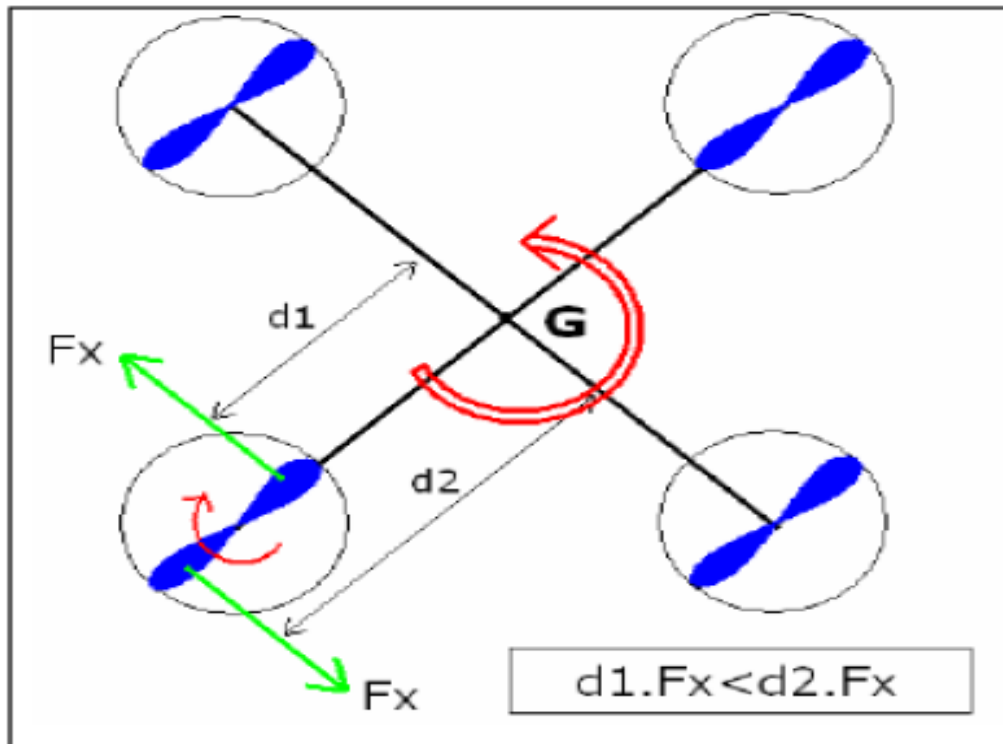


Figure II.6 : mouvement de lacet

En effet, lorsque l'on projette les forces aérodynamiques exercées par l'air sur la pale, on s'aperçoit



Qu'un rotor a toujours tendance à faire tourner le micro hélicoptère dans le sens inverse de sa rotation (voir la Figure II.7)



**Figure II.7 :** forces aérodynamiques

### **II.5.2. Le Tangage et le Roulis :**

Le roulis et le tangage sont des mouvements qui provoquent l'inclinaison du quadrotor selon les axes horizontaux (Figure II.8). Ces mouvements peuvent être assurés par le drone, en agissant sur la vitesse de l'un des quatre moteurs, est par conséquent sur la force des rotors.

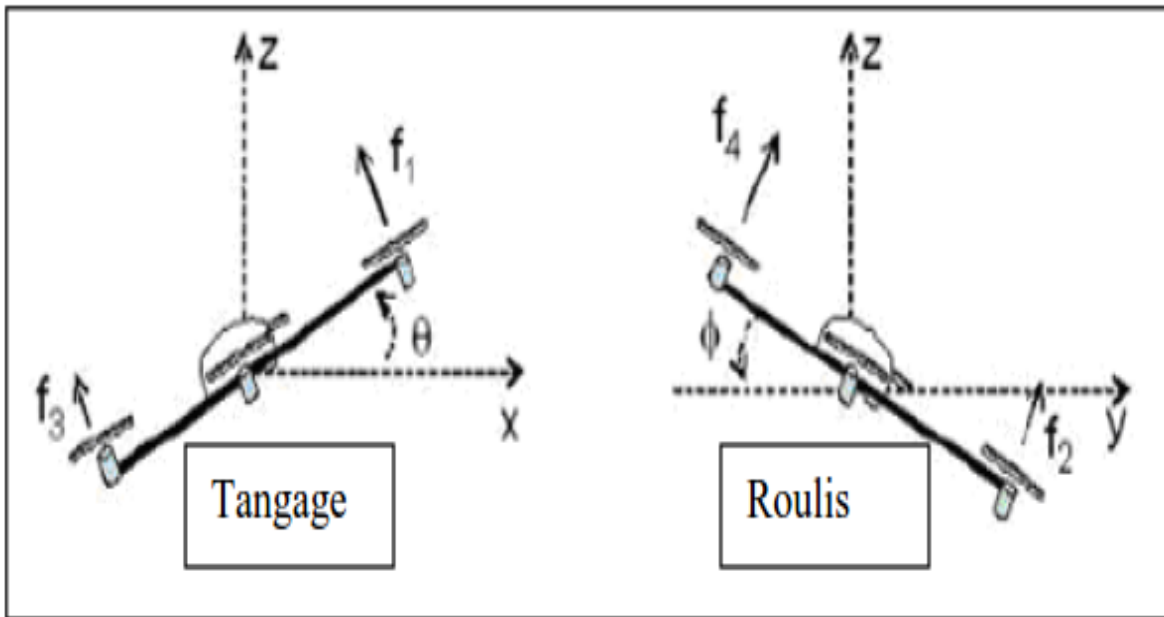


Figure II.8 : tangage et roulis

La rotation autour de l'axe y est appelée tangage en aéronautique. Une variation de l'angle de tangage est obtenue grâce à une différence de vitesse entre le moteur un, et trois (voir la Figure II.9).

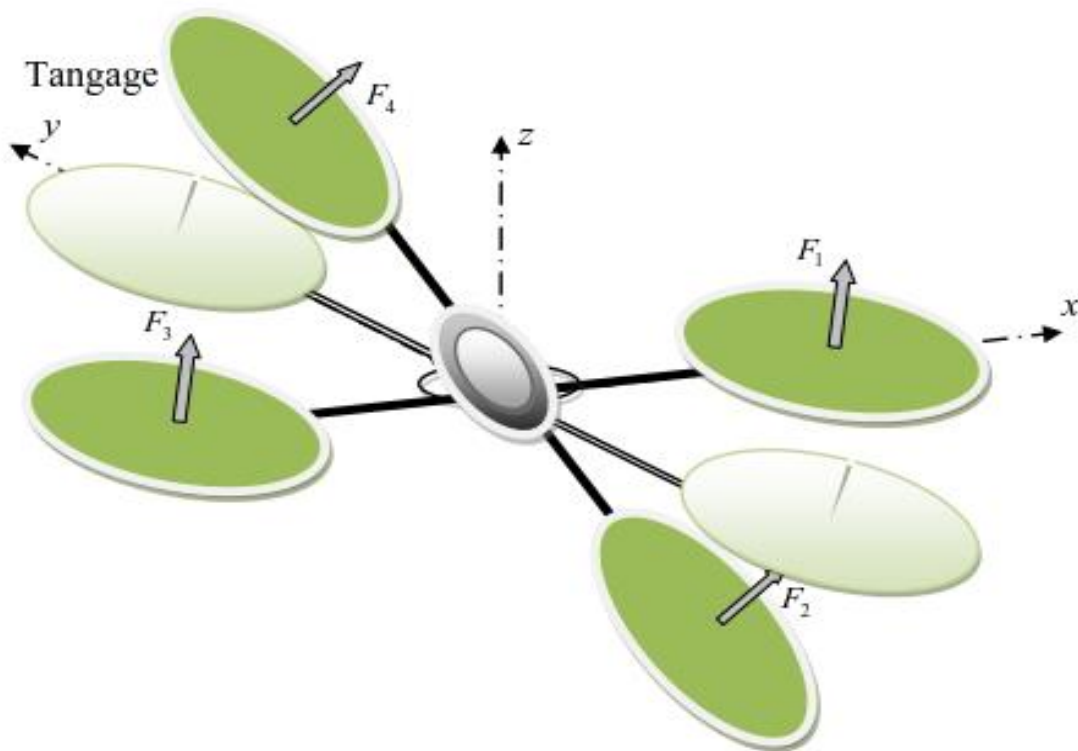
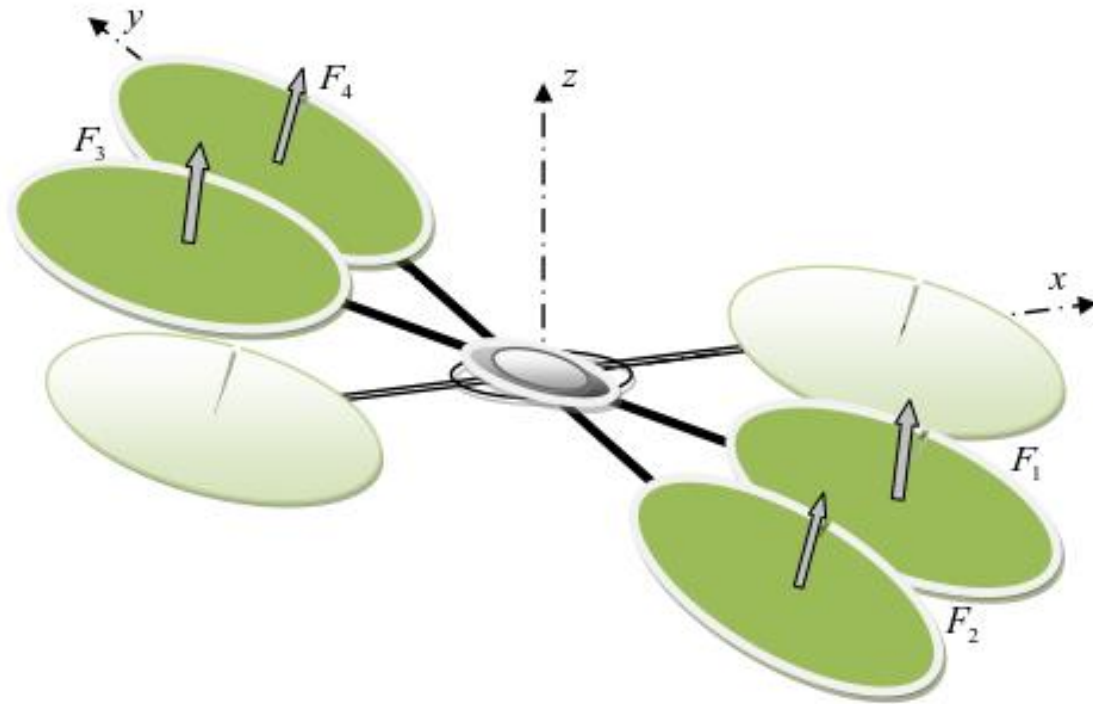


Figure II.9 : illustration du mouvement de tangage

En aéronautique, la rotation autour de l'axe X est appelée roulis. Une variation de l'angle de roulis est obtenue grâce à une différence de vitesse entre le moteur deux, et quatre (voir la Figure II.10).



**Figure II.10 :** Illustration du mouvement de roulis

### II.6.Mode 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.6.1 Vol vertical :

Sont deux forces ayant la même direction mais de sens opposé [16]. L'hélicoptère peut monter ou descendre, suivant l'effet aérodynamique soit supérieur ou inférieur au poids de l'appareil. (Voir la Figure II.11).

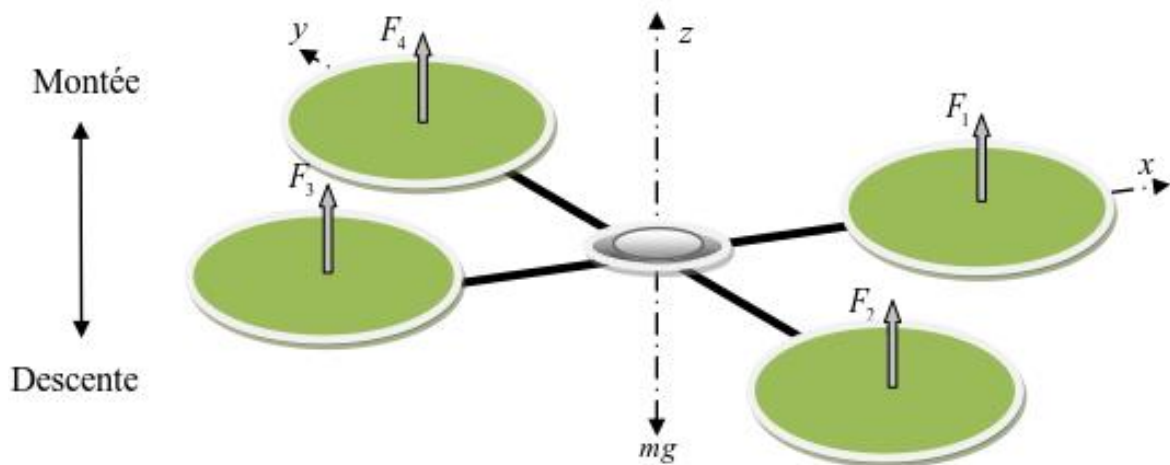


Figure II.11 : Illustration du mouvement vertical

### II.6.2 Vol stationnaire :

Quand la force de Portance, et celle de pesanteur sont égales et opposées, L'hélicoptère reste immobile. On parle de vol stationnaire

### II.6.3.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.12).

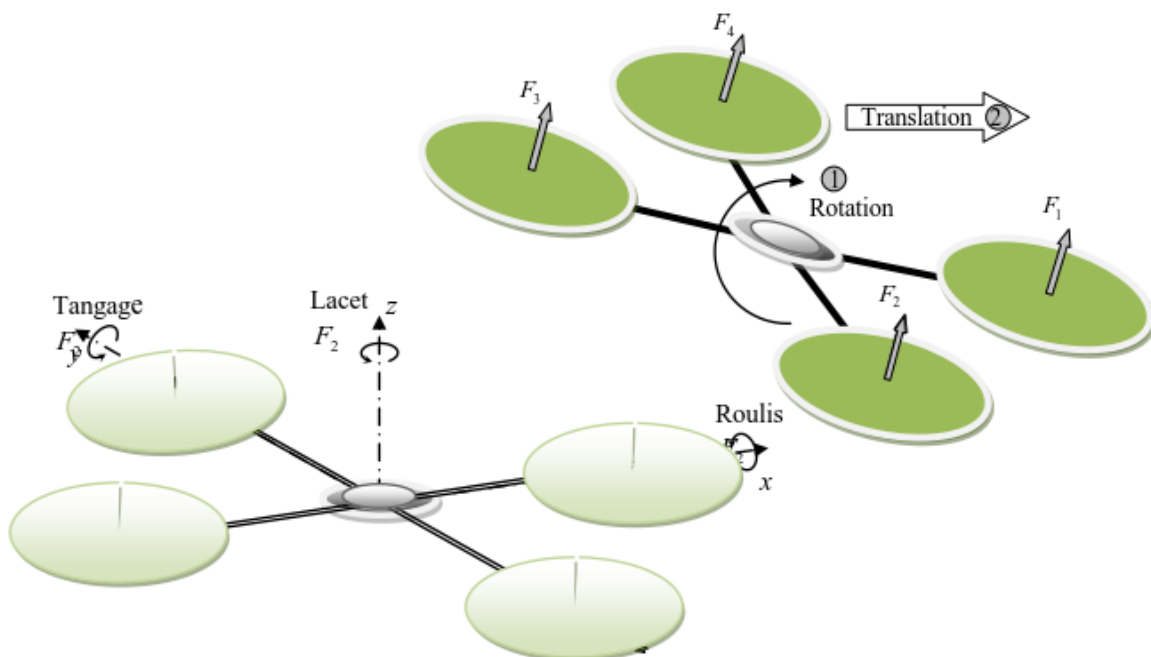


Figure II.12 : Illustration du mouvement de translation

## **II.7. Définition des repères :**

Pour décrire la dynamique de vol du quadrotor figure 4.1, un ensemble de repères de base et notations doivent être définis. Le premier repère est le repère inertiel  $R_0 = \{O, E_x, E_y, E_z\}$  Ou repère de référence. Ce repère inertiel est lié à la Terre, et peut être considéré comme Galiléen

En suite en considère  $R_G = \{G, E_1^g, E_2^g, E_3^g\}$  Un repère local ayant comme origine le centre de gravité du drone.

## **II.8.Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons donné des généralités sur le monde de drone et leurs domaines d'applications, et description du principe de fonctionnement du drone quadrotor est présentée avec une description détaillée 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 quadrotor.

Sa modélisation a été établi par l'usage du formalisme Newton-Euler, ce formalisme nous a permet d'établir le modèle dynamique du quadrotor. Nous concluons que le quadrotor est un système sous actionné

Finalement on a constaté que, l'une des configurations qu'a connue un développement et une exploitation considérables, cette dernière décennie, que ce soit à l'échelle scientifique ou industrielle est le quadrotor

## Chapitre. III. la commande d'un drone

### III.1. Introduction :

Avec la complexité des nouvelles installations industrielles, Le drone est piloté grâce à quatre commandes : la puissance (qui permet de contrôler l'altitude), le roulis, le tangage et de lacet. Ces commandes sont ensuite envoyées aux différents moteurs. La commande de puissance est envoyée à tous les moteurs, tout comme le lacet. Le tangage et le roulis sont obtenus en contrôlant seulement deux moteurs (1 et 3 pour le tangage et 2 et 4 pour le roulis).

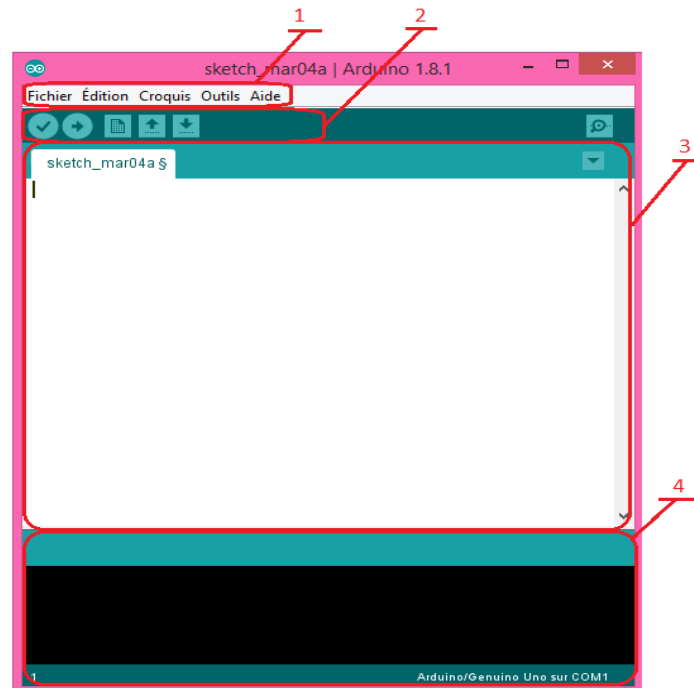
### III.2. Définition Arduino :

La carte Arduino Nano 3.0 est basée sur un ATmega328 cadencé à 16 MHz. Sa mémoire de 32 KB et son grand nombre d'E/S font de ce circuit compatible DIL30 un élément idéal pour les systèmes embarqués ou pour des applications robotiques nécessitant du multitâches. La Nano 3.0 peut se programmer avec le logiciel Arduino. Le contrôleur ATmega328 contient un boot loader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmeur. Le logiciel est téléchargeable gratuitement.

Arduino est un circuit imprimé en matériel libre (dont les plans de la carte elle-même sont publiés en licence libre mais dont certains composants sur la carte, comme le microcontrôleur par exemple, ne sont pas en licence libre) sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domestiques – éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, etc.

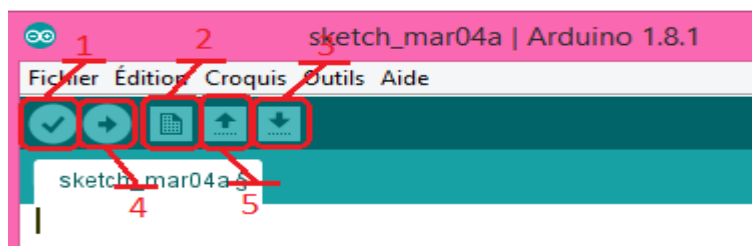
### III.3.L'interface

A l'ouverture, l'interface du logiciel Arduino se présente de la façon suivante :



**Figure III.1** : L'interface du logiciel Arduino.

- 1 : options de configuration du logiciel.
- 2 : boutons pour la programmation des cartes.
- 3 : programme à créer.
- 4 : débogueur (affichage des erreurs de programmation).



**Figure III.2** : Les boutons.

- 1 : permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans le programme.
- 2 : Créer un nouveau fichier.
- 3 : Sauvegarder le programme en cours.

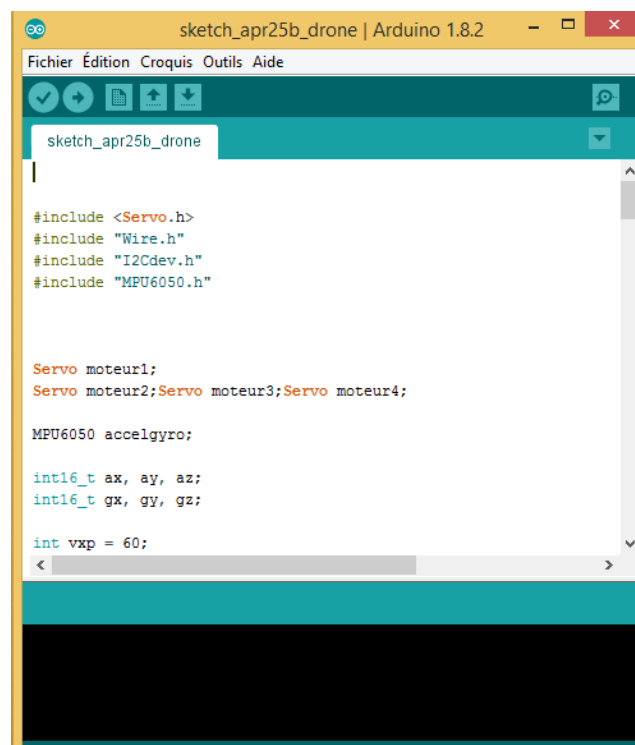
4 : Charger un programme existant.

5 : Compiler et envoyer le programme vers la carte.

### III.4.Les fenetres de commande ARDUINO :

#### III.4.1.La première étape

Pour programmer l'arduino on va ouvrir le sketch (le....) et après écrire le programme qui fait la commande (voir la figure III.3).



```
sketch_apr25b_drone
|
#include <Servo.h>
#include "Wire.h"
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"

Servo moteur1;
Servo moteur2;Servo moteur3;Servo moteur4;

MPU6050 accelgyro;

int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;

int vxp = 60;
```

Figure III.3 : la fenêtre pour écrire le programme

#### III.4.2.deuxième étape

Vérifier le programme et corrigé les erreurs (voir la figure III.3)



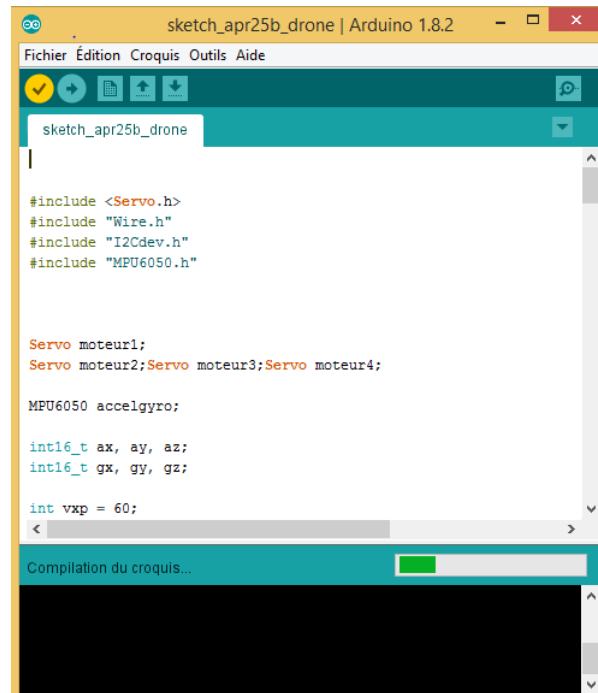


Figure III.4 : boutons pour la vérification le programme

### III.4.3.troisième étape

charger (téléverser)le programme dans L'ARDUINO (voir la figure III.5)

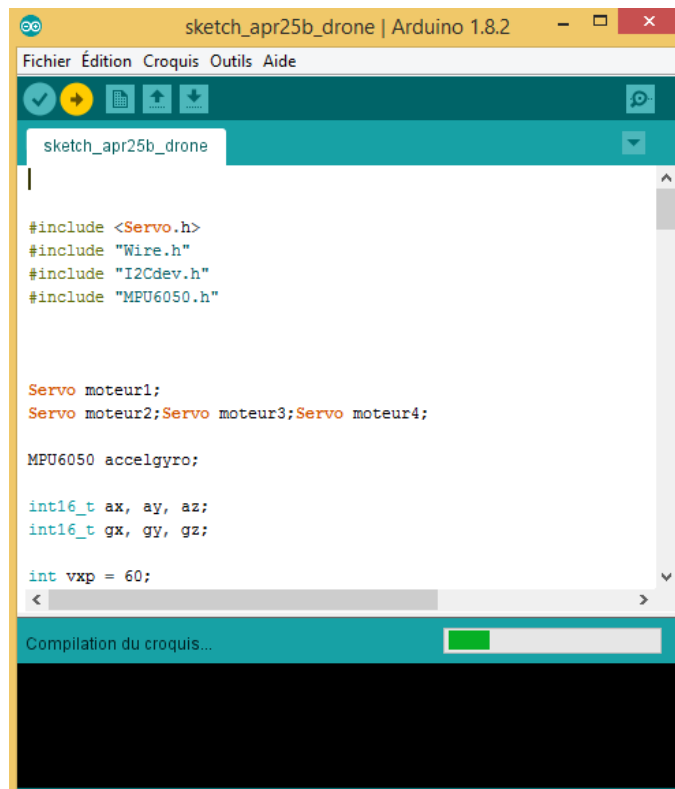


Figure III.5 :bouton pour téléverser le programme

### III.5.intérêt d'investir dans une carte Arduino

Les cartes Arduino donnent vraiment un potentiel de création quasi infini pourvu de disposer du matériel approprié (et oui, c'est comme tout, qui n'a rien ne fait rien). Il est possible de fabriquer des robots, de gérer des caméras, de commander des moteurs,

### III.6.Fonctionnement/utilisation

L'utilisation des cartes arduino est très simple : connectez la carte à l'ordinateur (via le câble USB, en général), lancez « Arduino IDE » (c'est le logiciel qui permet de programmer la carte), mettez en place vos composants et reliez-les à la carte (on verra comment plus tard), puis codez votre programme. Enfin, chargez-le sur la carte grâce au bouton téléverser. Votre programme s'exécutera ensuite en boucle.

### III.7.Un joystick

Est un périphérique\_informatique constitué d'un manche posé sur un socle. Des boutons-presseurs sont également accessibles sur le manche ou le socle. L'utilisateur peut agir sur le périphérique soit en bougeant le manche dans une direction, soit en pressant les boutons.

### III.8.Télécommande :

La télécommande que nous avons lors des tests ne nous satisfaisant pas de par son manque de précision, nous avons choisi d'en réaliser une par nos propres moyens. Un problème c'est alors posé : comment reproduire le fonctionnement d'une télécommande ?

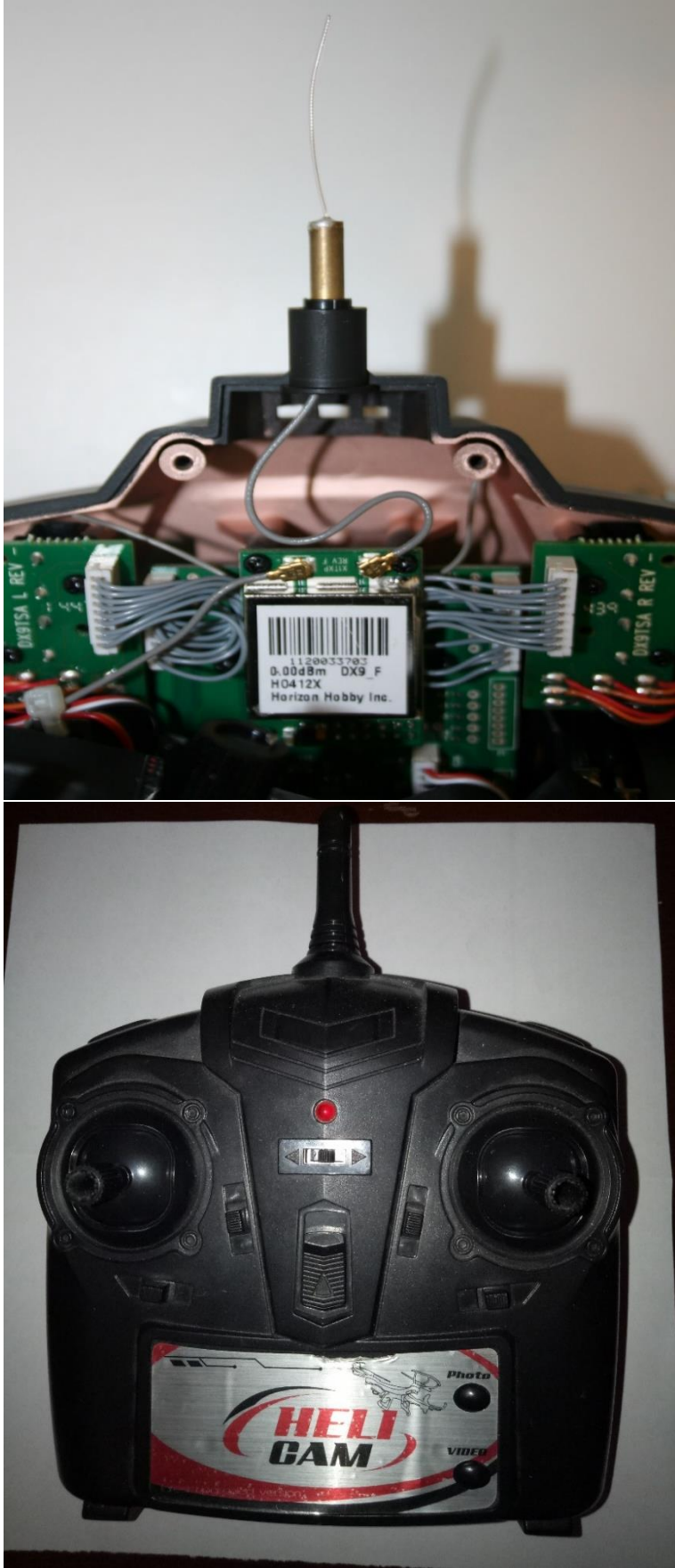


Figure III.6 : photographie de télécommande (joystick)

### III.9.Déterminer la position des axes

Le potentiomètre est indispensable dans tout joystick. Il permet en effet d'interpréter chaque position axiale du joystick en une tension qui sera appliqué à un signal numérique pouvant être « lu » par la carte de contrôle de notre drone.

Un potentiomètre est constitué de trois bornes dont une est considéré comme un curseur qui va changer de position sur une piste résistante dont les extrémités sont les deux autres bornes. Chaque position axiale donnée par le joystick va correspondre à une position du curseur sur la piste. La position du curseur est ensuite interprétée en fonction de la tension mesurée entre lui-même et une borne.

### III.10.Sérialisation des signaux reçus

En vérité, nous n'allons pas sommer directement les tensions, nous allons les sérialiser. Pour cela, nous allons mettre des valeurs numériques « bout à bout » ! En fait le concept est simple, il s'appelle signal PPM (Pulse-Position Modulation). L'avantage est de réduire toutes les connections qu'il peut y avoir en un seul fil ! Le signal se décompose en une trame d'impulsions dont en voici un exemple que nous allons étudier.

Le signal que vous pouvez voir figure 3 correspond à la représentation d'un signal ppm. Une trame de données est envoyée toutes les 22.5ms. Elle est normalement composée de 7 impulsions, car le signal peut envoyer jusqu'à 8 valeurs, mais peut être réduite si besoin est. La durée entre chaque impulsion correspond (à facteur multiplicatif près) à la valeur de la tension qui nous est donnée par les potentiomètres. Elle peut ainsi être lue facilement et rafraichie toutes les 22.5ms, ce qui est très suffisant pour ce genre de commandes

Le signal est ensuite éventuellement retraité par l'unité d'émission pour y inclure d'autres informations comme l'état De la liaison, un chiffage de la liaison, etc. Mais ce signal est totalement transparent en dehors de la liaison.

### III.11.Emission :

Lorsque le signal est généré, il ne reste plus qu'une étape dans la radiocommande : l'émettre.

En réalité le courant passe dans l'air, seulement, il n'est pas visible, il est sous la forme d'ondes électromagnétiques. Ce phénomène a été découvert par Faraday

La réciproque est également due à la découverte de Faraday. La fréquence du signal sérialisé est de l'ordre de 50Hz environ. Sachant que la longueur de l'antenne est (à facteur multiplicatif près) proportionnelle à la longueur d'onde de l'onde émise, l'antenne devrait être de plusieurs kilomètres de longueur

### III.12.L'ensemble Batterie-Variateur-Moteur :

Les moteurs ne pouvant être directement alimentés en courant continu, nous devons passer par un variateur. Le variateur va recevoir un courant continu directement de la batterie, puis va le transformer en signal adapté au moteur. On peut donc dans un premier temps schématiser le branchement à effectuer de cette manière :

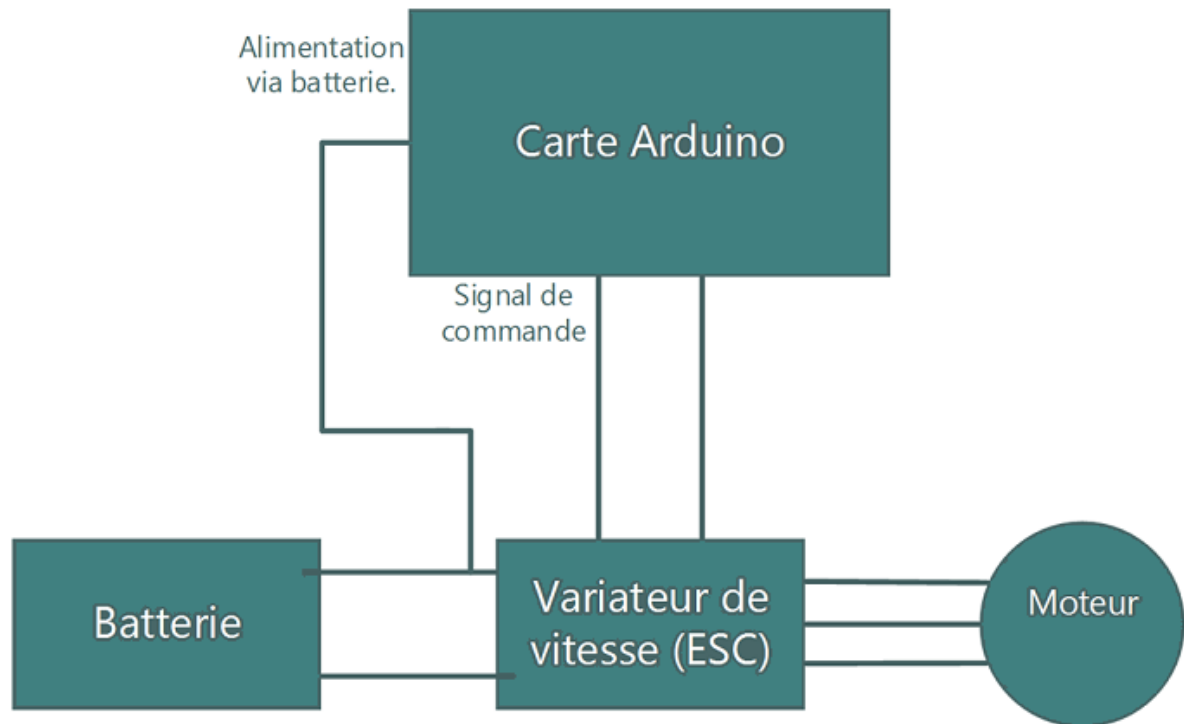


Figure III.7 : L'ensemble Batterie-Variateur-Moteur

### III.13.Le contrôle du moteur grâce à l'Arduino :

Avec le branchement précédent, le moteur ne tourne toujours pas car le variateur n'envoie aucun signal au moteur. Il va falloir envoyer un signal de commande au variateur afin de lui indiquer la vitesse à laquelle nous souhaitons faire tourner le moteur.

Finalement, nous allons profiter de la batterie pour alimenter la carte Arduino. Il n'y aura donc pas besoin d'une autre alimentation pour la carte. Nous obtenons au final le montage suivant :



**Figure III.8 :** Le contrôle du moteur grâce à l'Arduino

### III.14.les mouvements principaux du quadrotor :

➤ **L'axe de tangage :**

Est un axe transversal traversant le drone de gauche à droite. C'est sur cet axe que le drone s'incline vers l'avant ou l'arrière.

➤ **L'axe de roulis :**

Est un axe longitudinal traversant le drone d'avant en arrière. C'est sur cet axe que le drone s'incline sur la gauche et la droite.

➤ **L'axe de lacet :**

Est un axe vertical traversant le drone de bas en haut. C'est sur cet axe que le drone pivote sur lui-même.

Le sens de rotation des hélices est très important sur un quadrotor, en effet il y a deux hélices qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre.

### III.14.1.Monter/descendre :

Pour faire monter le drone il faut augmenter la vitesse des différents moteurs des hélices, afin qu'ils aient le même régime moteur (le régime moteur est le nombre de rotations effectuées par un moteur par unité de temps. En général, il est exprimé en tours par minute.) Pour descendre il faut faire l'inverse c'est-à-dire réduire le régime moteur de tous les moteurs.

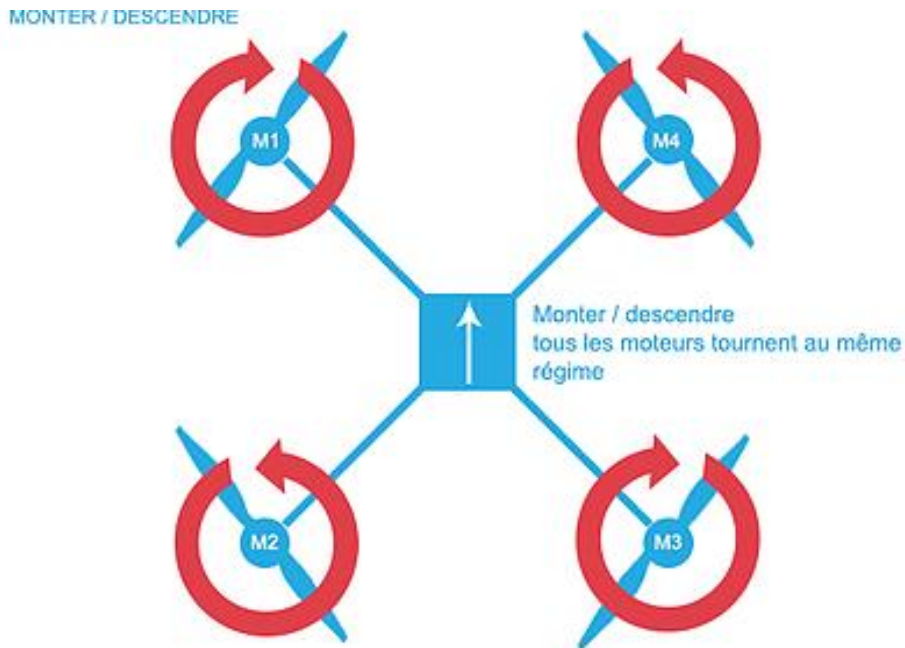


Figure III.9 : Monter/descendre

### III.14.2.Avancer/reculer Le tangage :

Pour incliner le drone vers l'avant (avancer), il faut réduire (diminuer) le régime des moteurs avant et augmenter celui des moteurs arrière et inversement pour incliner le drone vers l'arrière. On appelle cette action le tangage

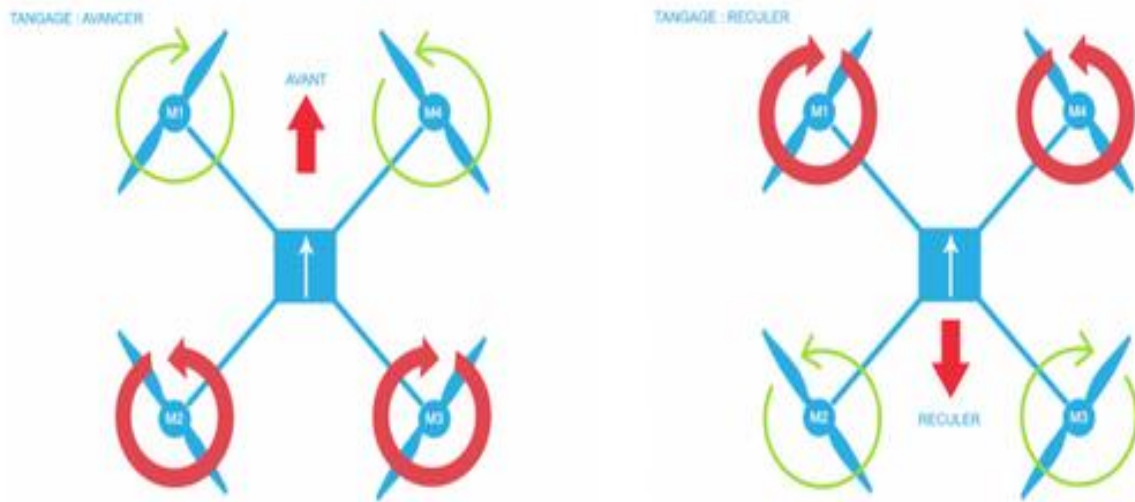


Figure III.10 : Avancer/reculer Le tangage

III.14.3. Gauche/Droite Le roulis :

Pour incliner le drone vers la gauche, on va diminuer (réduire) le régime des moteurs de gauche M1 et M2 et augmenter ceux de droite M3 et M4. Inversement pour incliner vers la droite. Cette action s'appelle le Roulis.

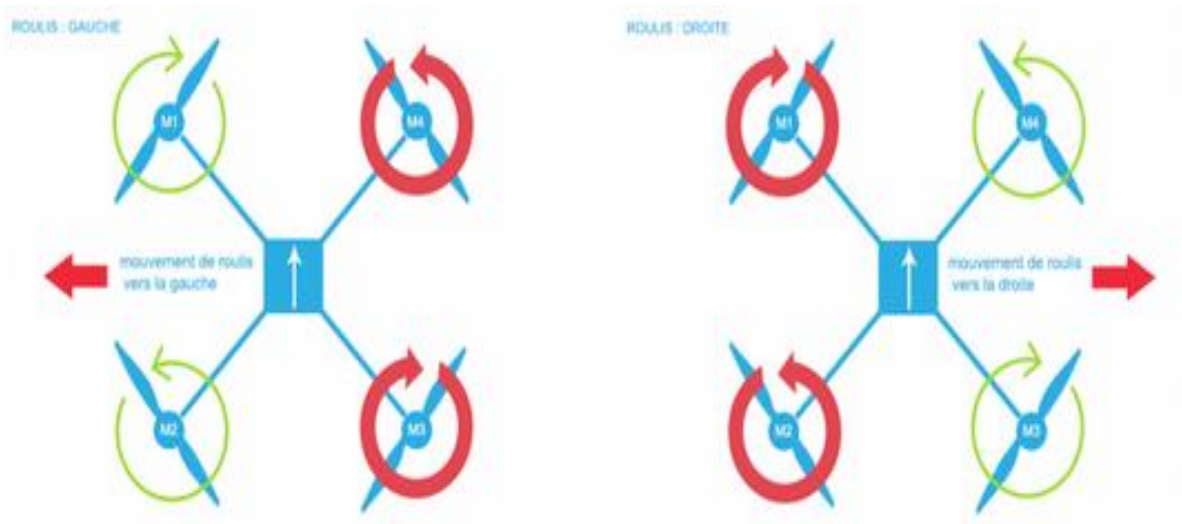


Figure III.11 : Gauche/Droite Le roulis



### III.14.4.Le lacet :

Pour un mouvement de rotation sur la droite ou la gauche il faut augmenter la vitesse de rotation des hélices tournant dans le même sens tout en réduisant la vitesse de rotation des autres hélices.

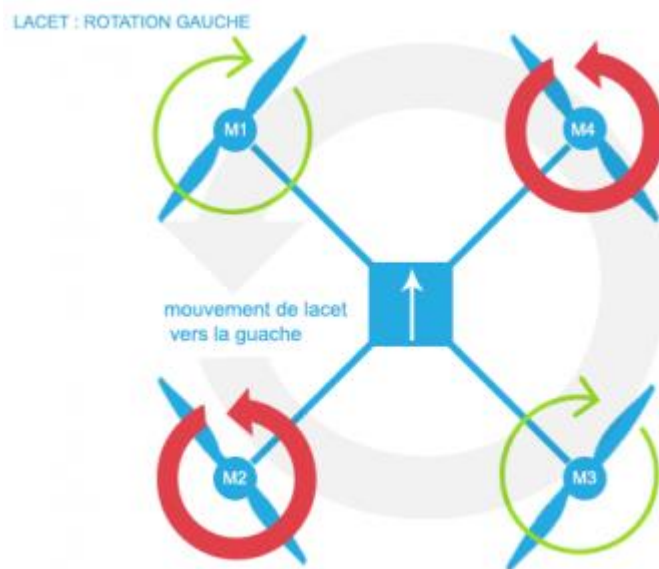


Figure III.12 : Le lacet

### III.15.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes cartes Arduino, et en parallèle on a défini le logiciel Arduino IDE et leur fonctionnement.

Dans cette partie une introduction sur la théorie de la dynamique des engins volants est abordée. Un modèle dynamique du quadrotor est donné, en se basant sur des références bibliographiques des études plus avancées.

## Chapitre. IV : Réalisation du drone quadrotor :

### IV.1.Introduction

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes de construction et la réalisation  
Un quadrotor est un objet volant composé de 4 moteurs munis d'hélices.L'objectif de ce projet est de construire un quadrotor facile à piloter, mais résistant à des atterrissages un peu brutaux

### IV.2.Cahier de charge :

Notre drone est réalisé à l'aide de quatre moteurs électriques, comme son nom l'indique « **quadrotor** ».

La structure mécanique sera réalisée comme un croisillon de quatre baguettes de plastique

La carte de contrôle est basée sur une carte **ARDUINO**, Le traitement de fusion de données des différents capteurs est traité par un programme développé en langage C de programmation du processeur ATMEGA intégré sur **ARDUINO**.

Un bloc de capteurs à 6 degrés de liberté (**DOF**) est relié à la carte **ARDUINO**. Le bloc capteur contient un accéléromètre à trois axes (X, et Y, et Z), qui mesurent l'accélération dans les trois axes orthogonaux. Le bloc contient également un gyromètre qui mesure le taux de rotation autour des mêmes axes.

Les commandes des quatre moteurs sont données sous la forme d'un signal, l'envoi des signaux pour les moteurs et le décodage du signal du récepteur, Lorsque le drone fonctionne de manière autonome la carte de contrôle peut définir la position de l'actionneur par l'intermédiaire de cette carte.

Il est convenu de noter que la configuration électronique de notre quadrotor ne contient pas de système de **positionnement global (RF)**, et de ce fait, la position absolue, de quadrotor ne peut pas être déterminée directement par mesure. Cela affecte sur le contrôle de la position ou le suivi d'une trajectoire.

### IV.3. Architecture du projet :

La commande du drone peut se faire manuellement, par radiocommande, ou automatiquement. Voici un schéma détaillé de l'architecture matérielle retenue pour le projet, avec les types de communications mis en jeu entre les éléments

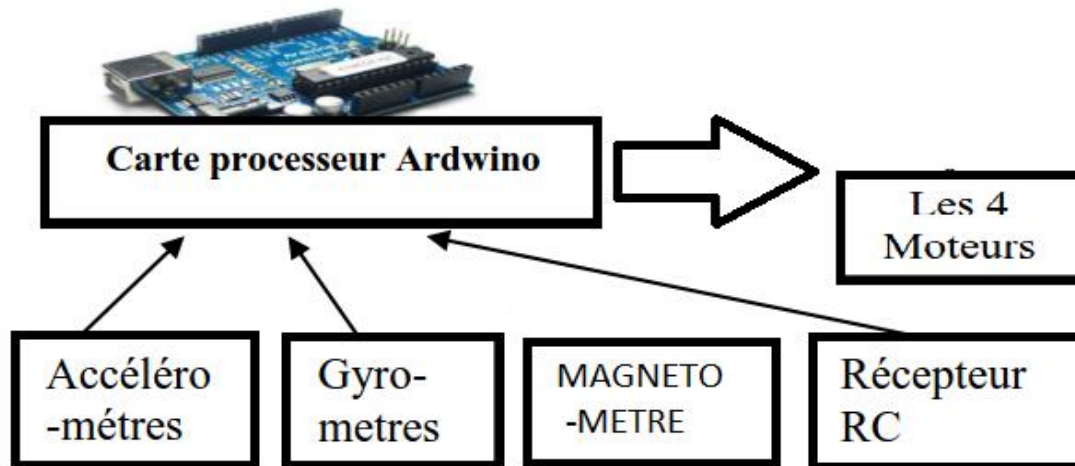


Figure IV.1 : Architecture du projet

### IV.4. Les capteurs :

La qualité et la précision des capteurs sont très importantes pour assurer une bonne connaissance de l'attitude du drone dans l'espace. La centrale inertielle est bien sûr l'élément le plus important et le plus complexe, et donc le plus cher. Dans notre projet la centrale inertielle a été réalisée à l'aide des accéléromètres et gyromètres, et la carte **ARDUINO**.

Ainsi le choix des capteurs résulte d'un compromis entre le prix et la qualité des mesures. L'utilisation du magnétomètre permet de comparer l'attitude mesurée par celui-ci à celle obtenue à partir des gyromètres et des accéléromètres.

Un magnétomètre 3 axes HMC5843 (Figure IV.2), qui permet de connaître la position (vecteur) du drone dans l'espace, ceci par rapport au pôle magnétique de la Terre. L'interface est en I<sup>2</sup>C



**Figure IV.2** Le magnétomètre 3axes HMC5843

Une carte équipée d'un accéléromètre 3 axes (Figure IV.3), de 3 gyromètres 1 axe, l'accéléromètre, et les gyroscopes sont trop petits, et difficiles à souder sur les cartes électroniques. Pour cette raison la société RAZOR a mis dans le marché ces nouvelles cartes



**Figure IV.3.**L'accéléromètre, et les gyroscopes.

La carte ARDUINO équipé d'un microcontrôleur ATMEGA328.



**Figure IV.4.**La carte ARDUINO

### IV.5. Branchement des capteurs avec la carte ARDUINO :

Les Gyroscopes et l'Accéléromètres sont connectés aux broches analogiques d'ARDUINO de 0 à 5 (voir la figure IV.5).

L'alimentation 3.3v des capteurs est obtenue à partir de la carte ARDUINO (broches VCC), ainsi que la tension de référence (pin AREF).

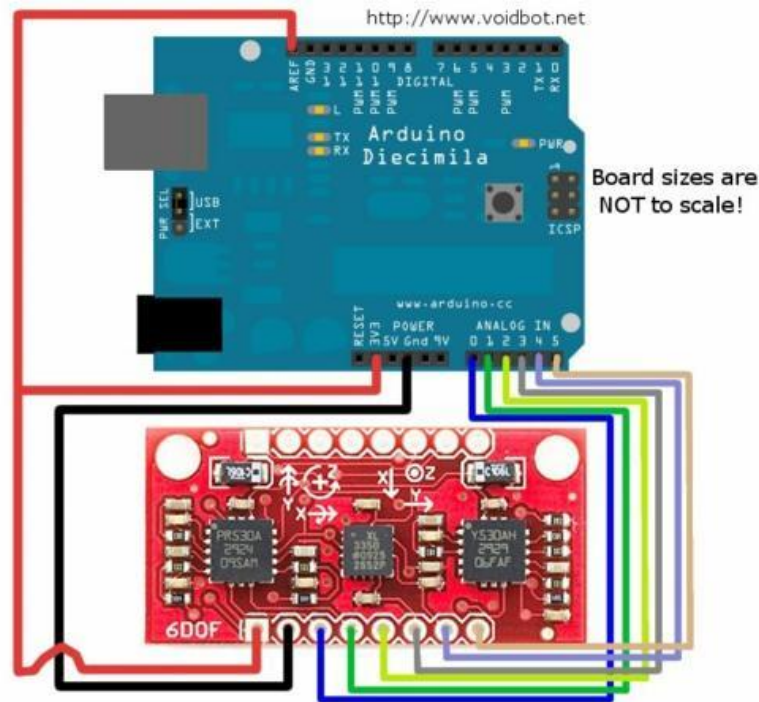


Figure.IV.5 branchement des capteurs sur l'ARDUINO

### IV.6. Matériel utilisé pour la structure mécanique et les étapes de la construction :

Afin de gagner en masse tout en conservant la rigidité en flexion du drone, on a choisi une conception d'un croisillon simple évidé à intervalles réguliers. Le centre du croisillon a été étudié afin de pouvoir aménager deux espaces pouvant contenir l'électronique embarquée et les batteries

#### IV.6.1. Le châssis :

C'est la structure du drone, c'est sur lui que l'on monte le reste des pièces. De lui dépend le comportement général du drone mais aussi son autonomie. Un châssis ultra léger permet de gagner en autonomie. Des bras longs amélioreront la stabilité alors que des bras

plus courts

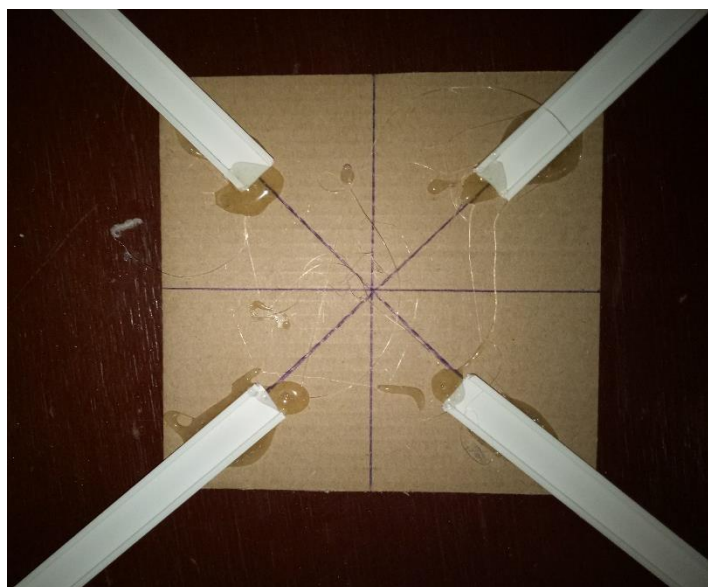
On en trouve principalement la conception de la structure. Pour la réalisation du croisillon on a utilisé quatre tubes en plastique à base d'un cartonne carré



**Figure IV.6** photographie de conception de la structure détaillé.

Le centre du croisillon est réalisé à l'aide d'une forme de croix en plastique, soudée avec un pistolet de plastique

En faisant place aux tubes. On a fixé les quatre tubes à chaque côté de la croix (voir la figure IV.7)



**Figure IV.7** photographie de conception de la structure assemblé.

### IV.6.2. Les hélices :

Elles doivent être adaptées à la taille de l'engin mais aussi aux moteurs que vous avez choisis



Figure.IV.8. Les hélices

### IV.6.3. Les moteurs :

C'est eux qui permettront au quadrotor de voler. Là encore il existe des centaines de modèles plus ou moins adaptés à l'utilisation

Les moteurs sont montés sur des supports fixés sur l'extrémité des tubes, à l'aide un pistolet de plastique (voir la figure IV.9).



**Figure IV.9** photographie d'un moteur avec hélice.



**Figure IV.10** photographie d'un moteur sans hélice.

Afin de respecter le fonctionnement de notre drone quadrotor les deux moteurs opposés vont tourner dans un sens différent des deux autres moteurs, donc on a besoin de types d'hélices : rotatives (sens des heures), et contrarotatives (sens antihoraire).

#### **IV.6.4.La batterie :**

C'est la source d'énergie de votre drone (voir la figure IV.11)





**Figure IV.11** : La batterie

#### **IV.7.La structure générale (complet) d'un drone quadrotor :**

La réalisation de notre quadrotor a passé par plusieurs étapes, on se base sur des tests de démarrage des moteurs, et le décollage. La construction mécanique a été changée à chaque fois que le drone montre une anomalie telle que des fortes vibrations, ou une mauvaise synchronisation des moteurs

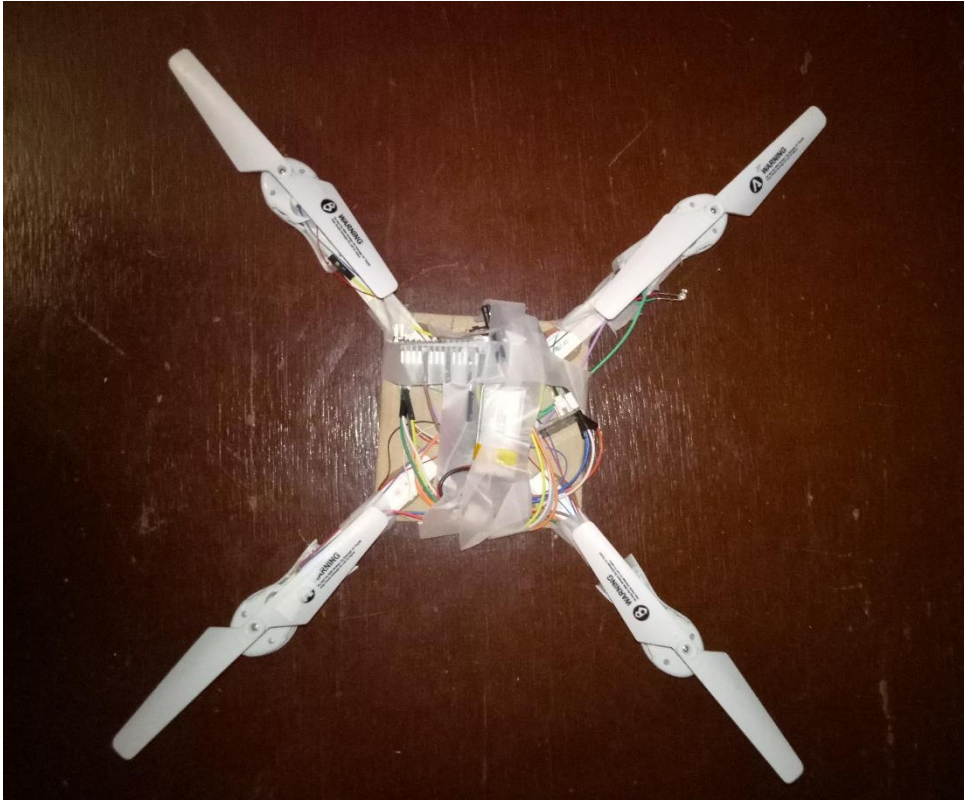


Figure 4.12 : La structure générale (complet) d'un drone quadrotor.

### IV.8.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons détaillé les différentes étapes de la construction mécanique de notre drone quadrotor. Ainsi que l'emplacement des différentes cartes électroniques réalisées (carte des capteurs à base d'**ARDUINO**, et la carte de puissance). Ensuite, nous avons présenté la manière dont on commande les quatre moteurs, et l'utilisation des capteurs (accéléromètre, et gyroscopes).

### Conclusion générale :

Au terme de ce projet, nous pouvons dire que nous avons touché à un nouveau domaine de l'intervention de l'automatique, c'est le domaine de l'aéronautique (drones).

Une description des différentes configurations des drones hélicoptères est donnée. Nous proposons aussi des configurations plus modernes réalisées très récemment soit par des chercheurs universitaires, soit par le secteur militaire.

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

La réalisation pratique de notre quadrotor est divisée en deux parties. Une partie de la description de la structure mécanique, et la réalisation de la carte électroniques.

La stabilisation de notre prototype (quadrotor) n'est pas encore achevée. Pour des questions de temps.

Le quadrotor n'est pas encore contrôlable sur ces axes. La réalisation électronique est aboutie, mais tous les éléments n'ont pas été intégrés sur le centre final, en raison de nos difficultés à stabiliser le drone.

### Respectives

Nous proposons dans cette partie diverses possibilités de poursuite du projet. La première étape qui s'impose est l'amélioration de la structure mécanique de notre prototype quadrotor. L'utilisation des moteurs et de nouvelles hélices pourra diminuer la dimension de notre quadrotor, ainsi améliore sa stabilisation.

Une correction plus robuste et plus rigoureuse en lacet. Ensuite, il faudrait stabiliser et asservir le drone quadrotor en position. Ces deux étapes effectuées, le drone sera viable pour lui appliquer diverses missions.

Nous pourrions intégrer un algorithme de guidage à l'aide du **RC** et des différents capteurs. Couplée aux données capteurs, l'implémentation de traitement d'images embarquées offrirait toute un panel d'activités que l'on pourrait imaginer (ex : détection de formes spécifiques, tracking d'objets, etc.).

Enfin, l'intégration d'un algorithme décisionnel lié à de l'intelligence artificielle rendrait complètement autonome pour des missions plus pointues.

### Difficultés rencontrées

**D**ans un premier temps, compte-tenu de la nature du projet, il nous a été difficile de déterminer l'ampleur de la tâche. La réalisation d'un drone quadrotor offre de nombreuses possibilités en matière d'applications.

La plus grande difficulté rencontrée lors de ce projet fait la stabilisation du drone. Nous nous sommes longtemps penchés sur le modèle théorique réalisé

Enfin, d'une manière générale nous avons mal estimé la durée à attribuer à certaines tâches, ce qui au final ne nous a pas permis de finir tout ce que nous souhaitions entreprendre.

## Résumé

Dans Ce projet, nous avons présenté le fruit d'un travail de six mois qui design conceptuel d'un drone .et après nous avons présenté un état de l'art et généralités sur les drones

Et L'objectif de ce travail est de présenter la commande et de l'appliquer sur un véhicule aérien sans pilot nommé quadrotor.

Nous avons élaboré le modèle complet du quadrotor qui permet d'étudier son comportement dans les différents régimes de fonctionnement et traite la modélisation, de la conception et de la réalisation d'un drone quadrotor.

Finalement, le drone quadrotor a été réalisé à base de quatre moteurs électriques, fixés sur l'extrémité de quatre baguettes en plastique.et nous donnons les différentes étapes de construction, et la réalisation de notre quadrotor.

**Mots clés :** drone, quadrotor, fonctionnement, la commande, la modélisation, la réalisation, la conception, moteurs électriques, design

## abstract

In this project, we presented the fruit of a six-month work that conceptual design of a drone. And after we presented a state of the art and general drones

And The objective of this work is to present the command and apply it on a pilotless air vehicle called quadrotor.

We have developed the complete model of the quadrotor which allows to study its behavior in the various operating regimes and deals with the modeling, design and realization of a quadrotor drone.

Finally, the quadrotor drone was made of four electric motors, fixed on the end of four plastic rods. And we give the different stages of construction, and the realization of our quadrotor

**Key words :** drone, quadrotor, pilotless air vehicle, modeling, command, electric motors construction, design.

## ملخص

في هذا المشروع، قدمنا ثمرة التصميم النظري من طائرة بدون طيار لمدة ستة أشهر. وبعد أن

قدمنا معلومات عامة عن الطائرات بدون طيار

والهدف من هذا العمل هو تقديم النظام وتطبيقه على مركبة جوية بدون طيار تدعى كوادروتور.

ثم قمنا بتطوير نموذج كامل من طائرة بدون طيار الذي يسمح لدراسة سلوكها في مختلف

العمليات وعملية النمذجة، وتصميم وتنفيذ طائرة بدون طيار.

وأخيراً، الطائرة بدون طيار تم صنعها باستخدام أربعة المحركات الكهربائية ونعطي مراحل

مختلفة من البناء، وتحقيق التصميم لأولى طائرة بدون طيار.

**كلمات مفتاحية :** طائرة بدون طيار، مركبة جوية، عملية النمذجة، تصميم وتنفيذ طائرة بدون طيار



## 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 Ltd. All rights reserved.
- [7]. RCtoys, <http://www.rc toys.com/>.
- [8]. S. Bouabdallah.” Design and control of quadrotors with application to autonomous
- [9] Direction Cosine Matrix IMU : Theory. William Premerlani and Paul Bizard. Mai2009flying”
- [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 flying ”, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL 2007.
- [12] H. Bouadi, M. Bouchoucha, and M. Tadjine “Modelling and Stabilizing Control

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, Venice, 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, algerie, Janvier 2011

[17] Prof. Kamel ADI, “La montée des drones : Comment construire le vôtre”, Université de Québec en Outaouais