



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للمناجم والمعادن - عمار العسكري - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET DE LA METALLURGIE
AMAR LASKRI- ANNABA

Département Science et Génie des Matériaux

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Science et Génie des Matériaux

Spécialité : Mécanique et Physique de Mise en Forme

Thème

Simulation du processus d'optimisation et de fabrication d'hélice de drone en composite Verre-Epoxyde

Présenté par : **M.LEBOUKH ABDERREZAK** en cadré par : **Dr. MATOUGUINEDJOUA**
Pr, MANAA RABAH

Jury de Soutenance

Dr. BELHANI MEHDI

MCA, ENSMM

Président

Dr. TAHRAOUI TAREK

MCB, ENSMM

Examineur Principal

Sept 2021



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie

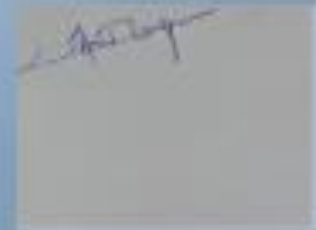
Département Science et Génie des Matériaux

**AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU
MEMOIRE DE MASTER**

Je soussigné (e) M.....
Président(e) du jury de soutenance de mémoire de Master, déclare avoir autorisé
M. Lebaoui Mohamed
à déposer son mémoire de Master après avoir apporté les corrections signalées
par les membres du jury.

Avis du Promoteur :

Dr N. MATOUGUI
Avis Favorable



Avis de l'Examinateur :

Dr. TAREK TAHRAOUI
A.F.

Président du Jury

Dr. Mehdi Belhani

A.F.

30.09.2021

Remerciements

Tout d'abord, louange à Allah qui grâce à son aide et sa volonté nous a amené au bout de ce travail en nous préservant la vie saine pendant toutes nos études.

Je tiens à remercier très sincèrement toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidé à réaliser ce travail.

Ces remerciements sont adressés principalement À mes directeurs de mémoire, Pr.Manaa Rabah et Dr.N.Matougui pour leurs disponibilité, leurs soutien moral et leurs conseils au cours de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier les examinateurs M.Belhani Mehdi et M.Tahraoui Tarek,

Et pour terminer je remercie tous les enseignants de l'ENSMM- Annaba.

Dédicace

Je tien à dédier ce travail aux êtres les plus chers à mon cœur.

*A celle qui a veillé des nuits pour mon bien être, à celle que
j'adore ma géniale, tendre, affectueuse et sacrée **mère**.*

*A mon cher père RABI YERHMOU qui m'a guidé vers les voies
de la réussite.*

*A mes frères **Fateh , Fouadet Hakou** ;*

A ma grande famille et toutes mes proches «Dhiya, Younes, Mesour, Ossama, Ali, Imad ,

Yahia , Amer, AbdoKhaled, yacine, Idris ».

*A mes amis de l'école ENSMM-Annaba, Je vous remercie vous
m'avez aidé toujours à avancer, vous êtes tous des grands amis
si gentils, Merci d'être toujours près de moi, amis avec lesquelles
je souris.*

Merci d'être toujours là pour moi.

Abderrezak

Résumé

Les modèles de drones professionnels capables de réaliser des vidéos stabilisées sont des drones professionnels légers, rapides, performants et simples à piloter. Le but du thème est de se familiariser avec les matériaux composites et leur intégration dans la productique mécanique. Nous avons cherché dans la littérature les informations pour explorer le domaine des drones. Le principe de légèreté et rigidité de la structure nous oblige à intégrer les matériaux composites réputés pour ces caractéristiques adéquates. De tous les composants, nous avons choisi le rotor comme pièce importante qui doit être dimensionnée spécifiquement en fonction de la charge utile embarquée. La conception du rotor nécessite la connaissance des systèmes aérodynamiques pour optimiser le dimensionnement. C'est pourquoi nous avons passé en revue les différents outils qui nous aideront à réaliser cet objectif, la connaissance de l'aérodynamisme (portance et traînée) combiné aux technologies composites nous ont permis de réaliser la pièce maitresse de la machine.

Mots clés :

Composites, sandwich, aérodynamisme, portance, traînée, rotor,

English

The professional drone models capable of making stabilized videos are light, fast, efficient and easy to fly professional drones. The aim of the theme is to familiarize ourselves with composite materials and their integration into mechanical production. We searched the literature for information to explore the field of drones. The principle of lightness and rigidity of the structure obliges us to integrate composite materials known for these adequate characteristics. Of all the components, we have chosen the rotor as an important part which must be dimensioned specifically according to the on-board payload. Rotor design requires knowledge of aerodynamic systems to optimize sizing, which is why we have reviewed the various tools that will help us achieve this goal, knowledge of aerodynamics (lift and drag) combined with composite technologies allowed us to build the centerpiece of the machine.

Arabic

تتميز نماذج الطائرات بدون طيار الاحترافية القادرة على إنشاء مقاطع فيديو ثابتة بخفة وسرعة وفعالية وسهولة تطبيق طائرات بدون طيار احترافية. الهدف من الموضوع هو التعرف على المواد المركبة ودمجها في الإنتاج الميكانيكي ، بحثنا في الأدبيات عن معلومات لاستكشاف مجال الطائرات بدون طيار. يُلزمنا مبدأ خفة وصلابة الهيكل بدمج المواد المركبة المعروفة بهذه الخصائص الملائمة. من بين جميع المكونات ، اخترنا الدوار كجزء مهم يجب تحديد أبعاده على وجه التحديد وفقاً للحمولة الصافية على متن الطائرة. يتطلب تصميم الدوار معرفة بالأنظمة الديناميكية الهوائية لتحسين الحجم ، ولهذا السبب قمنا بمراجعة الأدوات المختلفة التي ستساعدنا في تحقيق هذا الهدف ، ومعرفة الديناميكا الهوائية (الرفع والسحب) جنباً إلى جنب مع التقنيات المركبة سمح لنا ببناء محور الآلة

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I. 1: Exemple d'un drone de type HALE	10
Figure I. 2: Exemple d'un drone de type MALE	10
Figure I. 3: Exemple d'un Micro quadrirotor	11
Figure I. 4: Configuration d'un drone quad-copter	13
Figure I. 5: Mouvements d'un quad-copter	14

Chapitre II :

Figure II. 1: Différentes familles de matrice.	19
Figure II. 2: Organigramme des principaux matériaux de renforts	22

Chapitre III :

Figure III. 1: Les composants d'un quad-copter.....	27
Figure III. 2: châssis.....	28
Figure III. 3: hélices de quadrirotor	29
Figure III. 4: Diamètre Hélices:.....	30
Figure III. 5: Degrés d'inclinaison des pales	31
Figure III. 6: Hélice CW&CCW.....	31
Figure III. 7: Moteur Brushless et Les variateurs de vitesse électronique (ESC).....	33

Chapitre V :

Figure.V. 1: les forces appliqué sur l'avion.....	36
Figure.V. 2: portance sur l'aile	37
Figure.V. 3: portance sur l'aile.....	37
Figure.V. 4: portance sur l'aile	37
Figure.V. 5: l'angle d'incidence.....	38
Figure.V. 6: la relation entre le coefficient de portance et angle d'attaque.....	39
Figure.V. 7: l'angle d'incidence.....	39
Figure.V. 8: Cas d'un corps profilé.....	41
Figure.V. 9: Cas d'un corps non-profilé	41
Figure.V. 10: résultante aérodynamique	42

Liste des tableaux

Chapiter II:

Tableau.II. 1: Différentes familles de matrice.	21
Tableau.II. 2: Organigramme des principaux matériaux de renforts	23

Chapitre I

Introduction générale :	6
I. Drone-UAV(Unmanned Aerial Vehicle)	9
1.1. Définition :	9
1.2. Classification des drones:	9
I. Selon la taille :	9
II. Selon le mode de propulsion.....	11
I.3. Utilisation des drones :	11
I. 4 Les applications des drones :	12
Quadrirotor:	13
Principe de fonctionnement :	13
1.5. Fonctionnement :	14
1.5.1. Le mouvement vertical (Throttle) :	14
1.5.2. Le mouvement lacet (Yaw) :	14
1.5.3. Le roulis et le tangage (Roll and Pitch) :	14
1.6) Les forces et les moments agissants sur le quadrirotor.....	15
1. Les forces ;.....	15
le poids.....	15
les forces de poussée :.....	15
Les traînées :.....	15
2. Les moments.....	15
➤ Effet gyroscopique.....	16
1.1. Généralités Le terme « matériau composite ».....	18
Les matériaux composites sont classés en trois familles en fonction de la nature de la matrice :.....	18
Présentation des matériaux composites.....	19
1)- La matrice :.....	19
1-1.Les résines :.....	19
2) les renforts.....	21
2.1.1. Nature des principales fibres.....	22
Les fibres de verre :.....	23
1.3. Intérêt des matériaux composites :	24
Chapitre III:	26
Partie I : Mécanique	27
1. Le Châssis (FRAME) :	27

2. Les hélices :	28
3. Pales et Diamètre :	29
4. Le Pas:	30
5. La Rotation :	31
Partie 2 : Propulsion	32
1. Moteur Brushless :	32
2. Les variateurs de vitesse électronique (ESC) :	33
3. Batterie LIPO (Lithium Polymère) :	33
4. Les capteurs :	34
4.1. Capteur gyroscopique et accéléromètre.....	34
4.2. La carte programmable :	34
Chapitre V.....	35
Principe :	36
1) La Portance :	36
1.2. Écoulement de l'air sur un profil d'aile :	37
1.3. Expression de la portance :	38
1.4. Influence de l'angle d'incidence sur la portance :	38
1.5. Centre de poussée et foyer :	40
2) La traînée:	40
2.1. La traînée :	40
2.2. Influences sur la traînée :	41
2.3. La résultante aérodynamique :	41

Introduction générale

Durant les dix dernières années, un intérêt croissant est porté aux engins volants sans pilote humain à bord que l'on appelle drone. Un drone ou Unmanned Aerial Vehicle (UAV) est un aéronef sans passager ni pilote, capable de voler de façon autonome ou pilotés à distance. Le mot -drone- est extrait d'un terme anglais qui signifie -faux-bourdon-. En français, le terme est employé pour désigner des véhicules aériens, terrestres, de surface ou sous-marins.

Ces appareils sont capables de porter différents types de charges : caméras, radars, missiles, équipements de communication, etc. Ces charges les rendent capables d'accomplir des tâches spécifiques, civiles et militaires. Le véhicule aérien sans pilote connaît un essor croissant ces dernières années grâce à leurs différents domaines d'application, ces appareils ont notamment l'avantage de moins exposer le personnel au danger tout en couvrant une large gamme de missions. Au début, les applications du drone ont été orientées uniquement vers le domaine militaire. Aujourd'hui, ils sont aussi utilisés dans divers domaines tels que la recherche, le sauvetage, la cartographie, etc...

La taille de ces véhicules aérien peut aller de quelques centimètres pour les modèles miniatures à plusieurs mètres pour les drones spécialisés (surveillance, renseignement, combat, loisirs). Leur autonomie en vol va de quelques minutes à plus de 40 heures pour les drones de longue endurance.

De plus, un quadrirotor se présente en quelque sorte comme un hélicoptère miniature à quatre moteurs. C'est un système à six degrés de liberté, qui se pilote généralement avec des consignes en puissance, et en angle (tangage, roulis et lacet). Le pilotage d'un tel engin s'avère difficile, d'autant plus que sa structure est très légère, ce qui le rend très sensible aux perturbations extérieures.

Chapitre I :

Les drones

I. Drone-UAV(Unmanned Aerial Vehicle)

1.1. Définition :

Un drone est un aéronef sans pilote, télécommandé ou bien programmé. Il existe une multitude de drones. La taille, la masse, l'autonomie sont autant de paramètres qui différeront selon l'application que doit réaliser un drône. Il faut distinguer drone à voilure fixe et drone à voilure tournante.

- Un drone hélicoptère est à voilure tournante. Il assure sa poussée et sa portance par ses moteurs. Il a l'avantage de pouvoir voler à de faibles vitesses ou bien de rester immobile.

- Un drone avion est à voilure fixe. Il assure sa poussée par son moteur et sa portance par son moteur et ses ailes. Cela lui permet de couvrir de longues distances ou bien d'atteindre de hautes altitudes.

1.2. Classification des drones :

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

I. 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. 1: Exemple d'un drone de type HALE



Figure I. 2: Exemple d'un drone de type MALE



Figure I. 3:Exemple d'un Micro quadrirotor

II. 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. Utilisation des drones :

Les drones sont utilisés pour plusieurs besoins. En ce qui conceme, 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. 4 Les applications des drones :

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

- 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.). [1]

Quadrirotor:

Principe de fonctionnement :

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

Pour éviter au véhicule de tourner autour de son axe z (lacet), il est nécessaire que deux hélices tournent dans un sens, et les deux autres dans le sens contraire.

Pour pouvoir diriger l'engin, il faut que chaque couple d'hélices tourne dans le même sens, soit placé aux extrémités opposées d'une branche du châssis.

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

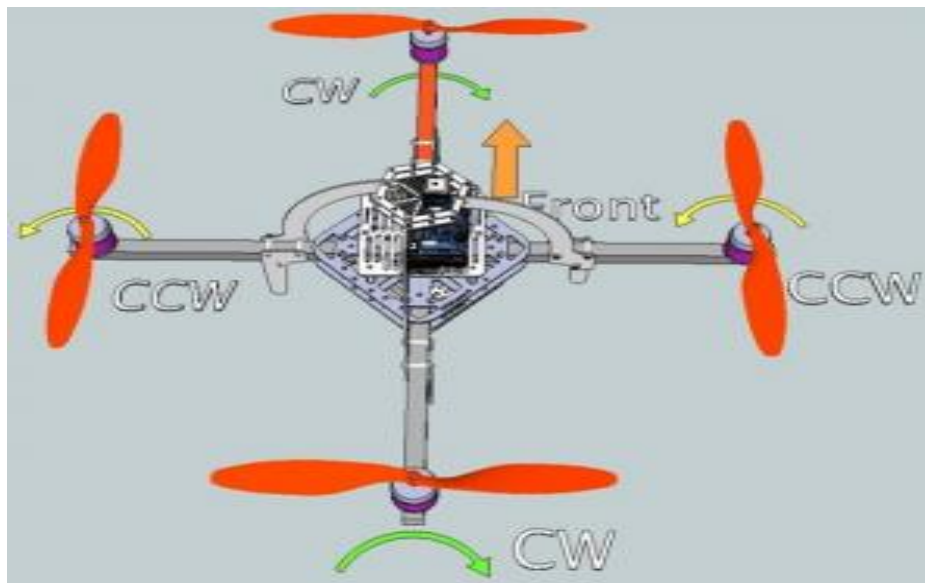


Figure I. 4: Configuration d'un drone quad-copter

Ainsi le drone quadrirotor est un système sous actionné (le nombre des entrées est inférieur au nombre des sorties) [2].

1.5. 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).

1.5.1. 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.

1.5.2. 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.

1.5.3. 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). [3]

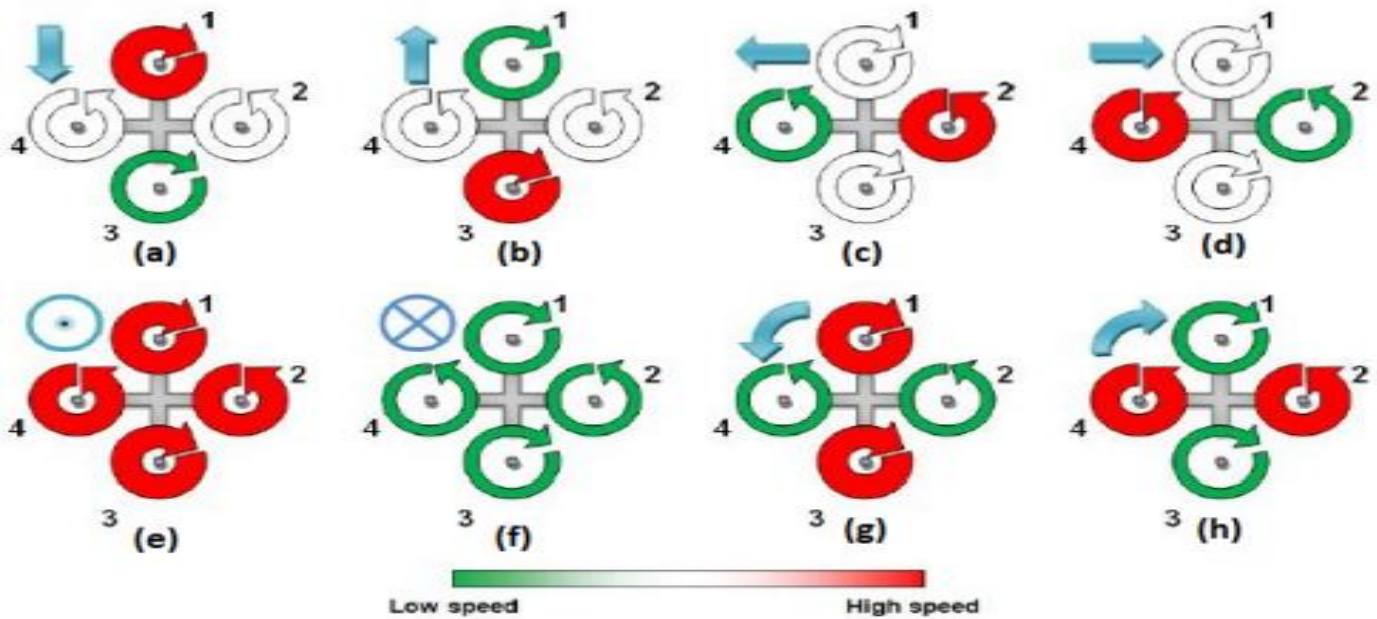


Figure I. 5: Mouvements d'un quad-copter

1.6) Les forces et les moments agissants sur le quadrotor

Le quadrotor est classé dans la catégorie des systèmes volants les plus complexes vu le nombre d'effets physiques qui affectent sa dynamique.

1. Les forces ;

le poids

➤ le poids donné par :

$$P=m.g \quad (1.1)$$

Où : m : la masse totale

g : l'accélération de la pesanteur qui est égale à 9.8 m. s^{-2}

les forces de poussée :

ces forces sont proportionnelles au carrée de la vitesse de rotation des moteurs.

$$F_Z = F_{Z1} + F_{Z2} + F_{Z3} + F_{Z4} \quad (1.2)$$

$$F_{Zi} = k\Omega_i^2$$

Avec,

F

Z_i : poussé individuelle de chaque couple moteur hélice

F_Z : poussé totale

k : coefficient de poussé

Ω_i : vitesse de rotation du moteur i

Les traînées :

qui agissent sur les pales et qui sont aussi proportionnelles au carré de la vitesse de rotation de l'hélice :

$$F_{xi} = b\Omega_i^2 \quad (1.3)$$

Avec, b le coefficient de traînée

2. Les moments

➤ La rotation autour de l'axe x, elle est due au moment suivant :

$$M_x = l(F_{Z4} - F_{Z2}) = lk(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \quad (1.4)$$

Avec, l la demi-envergure du quadrotor

➤ La rotation autour de l'axe y :

$$M_y = l(F_{z3} - F_{z1}) = lk(\Omega^2_3 - \Omega^2_1) \quad (1.5)$$

➤ La rotation autour de l'axe z :

$$M_z = F_{x2} + F_{x4} - F_{x1} - F_{x3} = b(\Omega^2_2 + \Omega^2_4 - \Omega^2_1 - \Omega^2_3) \quad (1.6)$$

➤ 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. L'effet gyroscopique est ainsi nommé en référence au mode de fonctionnement du gyroscope, appareil de contrôle de mouvement utilisé pour ce type d'appareil. [4]

Dans notre cas, il y a deux moments gyroscopiques, le premier est le moment gyroscopique des hélices :

$$M_{gh} = \sum_{i=1}^4 \omega \wedge I_r [0 \ 0 \ (-1)^{i+1} \Omega_i]^T \quad (1.7)$$

Avec,

I_r : le moment d'inertie des moteur en $kg \cdot m^2$

ω : la vitesse angulaire exprimée dans le repère fixe en rad/s

Ensuite, il y a le moment gyroscopique dû aux mouvements de l'appareil : il est donné par la relation suivante :

$$M_{gm} = \omega \wedge I \cdot \omega \quad (1.8)$$

Ici, I est la matrice d'inertie du système définie par l'équation (1.9)

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Chapiter II:

Matériaux composites

1.1. Généralités Le terme « matériau composite » :

Les matériaux composites désigne un matériau solide et hétérogène, constitué de plusieurs composants non miscibles, dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants considérés ne possède séparément. La réalisation d'un matériau composite nécessite donc l'association d'au moins deux composants : la matrice et le renfort qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser. Le renfort constitue l'ossature de la pièce, et supporte l'essentiel des contraintes, tandis que la matrice assure la liaison de l'ensemble, répartit les efforts et protège les renforts. Par ailleurs, des additifs peuvent être ajoutés au composite sous forme d'éléments fragmentaires ou de poudre, afin de modifier les propriétés des composites finis. Cette combinaison permet d'obtenir un nouveau matériau plus performant.

Les matériaux composites sont classés en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- Les composites à matrice organique (CMO) (volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle);
- Les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très hautes technicité (spatiale, nucléaire et militaire);
- Les composites à matrice métalliques (CMM) pour quelques applications spécialisées (aérospatiale). [5]

Chacune de ces familles possède des propriétés différentes et pour chacune d'entre elles, différents types de renfort sont employés. Dans cette étude, nous nous intéressons uniquement aux composites à matrice organique (CMO). En général, les CMO peuvent être classés en deux catégories :

- Les composites à grande diffusion, peu coûteux et représentant près de 95% des CMO fabriqués, sont utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées. Ce type de composites, généralement à base de fibres de verre convient parfaitement aux grandes série, par exemple la calandre de bus [6];

- Les composites à haute performance, plus onéreux mais présentant des qualités mécaniques supérieures, sont notamment employés dans l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle [7].

Présentation des matériaux composites

1)- La matrice :

La matrice constitue l'élément de liaison entre les divers éléments constitutifs et donne la forme voulue au produit réalisé. Elle assure également une protection chimique. Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à permettre aux matériaux composites de conserver ces caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. On distingue deux grandes familles de matrice (Figure 1.1) . [11 ;12]

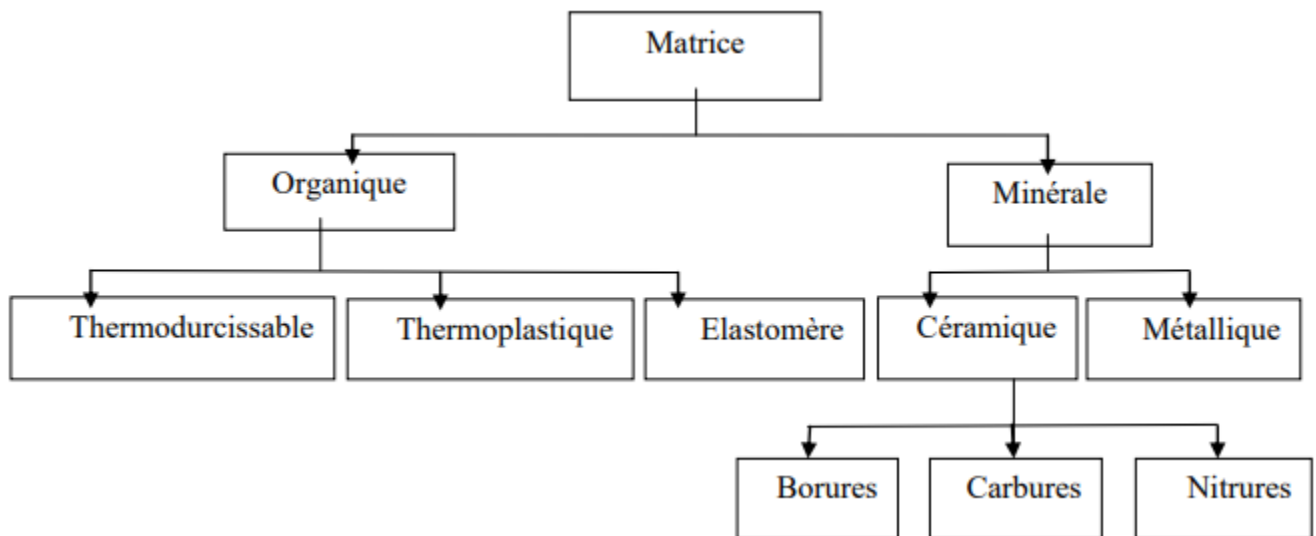


Figure II. 1:Différentes familles de matrice.

1-1.Les résines :

les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques .

a)Résines thermodurcissables : Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées (traitement thermique ou physico-chimique). Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois.Les principales résines thermodurcissables

utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : les résines polyesters insaturées, les résines de condensation, les résines époxydes [8] .

a) -1- Les résines époxydes:

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

❖ Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- ✓ Masse volumique 1 100 à 1 500 kg/m³
- ✓ Module d'élasticité en traction 3 à 5 GPa
- ✓ Contrainte à la rupture en traction 60 à 80 MPa
- ✓ Contrainte à la rupture en flexion 100 à 150 MPa
- ✓ Allongement à la rupture 2 à 5 %
- ✓ Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa
- ✓ Température de fléchissement sous charge 290 °C

b) Résines thermoplastiques Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité .

c) Résines thermostables Ce sont des polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques. [9]

* Le tableau suivant présente quelques caractéristiques des résines TP et TD

Tableau.II. 1:Différentes familles de matrice.

Matrices résineuses		ρ_m Kg/m ³	E_m MPa	G_m Mpa	ν_m	σ_m MPa	A %	α 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	T_{max} °C
Thermodurcissables	Epoxyde	1200	4500	1600	0.4	130	2(100°C)	11	90 à200
	Phénolique	1300	3000	1100	0.4	70	6(200°C) 2.5	1	120à200
	Polyster	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8	60à200
	Polycarbonate	1200	2400			60		6	120
	Vinylester	1150	3300			75	4	5	>100
	Silicone	1100	2200			35			100à350
	Uréthane	1100	700 à 7000			30	100		100
Polyimide	1400	4000à 19000	1100	0.35	70	1	8	250à300	
Thermoplastiques	Polypropylène	900	1200			30	20à 400	9	70à140
	Polysulfure de phénylène	1300	4000			65	100	5	130 à 250
	Polyamide	1100	2000			70	200	8	170
	Polyéther sulfone	1350	3000			85	60	6	180
	Polyéther imide	1250	3500			105	60	6	200
	Polyétheréthercétone	1300	4000			90	50	5	140 à 250

2) les renforts

Les matériaux de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Ces renforts permettent également d’améliorer certaines propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l’abrasion, propriétés électriques, etc.

Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont : caractéristiques mécaniques élevées, masse volumique faible, bonne compatibilité avec les résines, facilité de mise en œuvre, faible coût, etc. parmi ces renforts on peut citer :

Les fibres :

Les fibres sont des éléments du matériau composite qui apportent généralement les propriétés mécaniques recherchées. Elles se présentent sous forme de filaments de plus au moins longs. Les fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- ◆ Linéiques (fils, mèches, ... etc.)
- ◆ Tissus surfaciques (tissus simples, mats,... etc.)
- ◆ Multidirectionnelles (tresses, tissus complexes, ...etc.)

Il existe également des fibres courtes de 1 à 2mm qui sont dispersées dans la matrice, ou encore des fils coupés de 15 à 50mm de longueur. Leur utilisation est encore limitée en raison des difficultés de fabrication.

2.1.1. Nature des principales fibres : elles sont en :

- Verre
- Aramide (ou « kevlar »)
- Carbone
- Bore
- Carbure de silicium

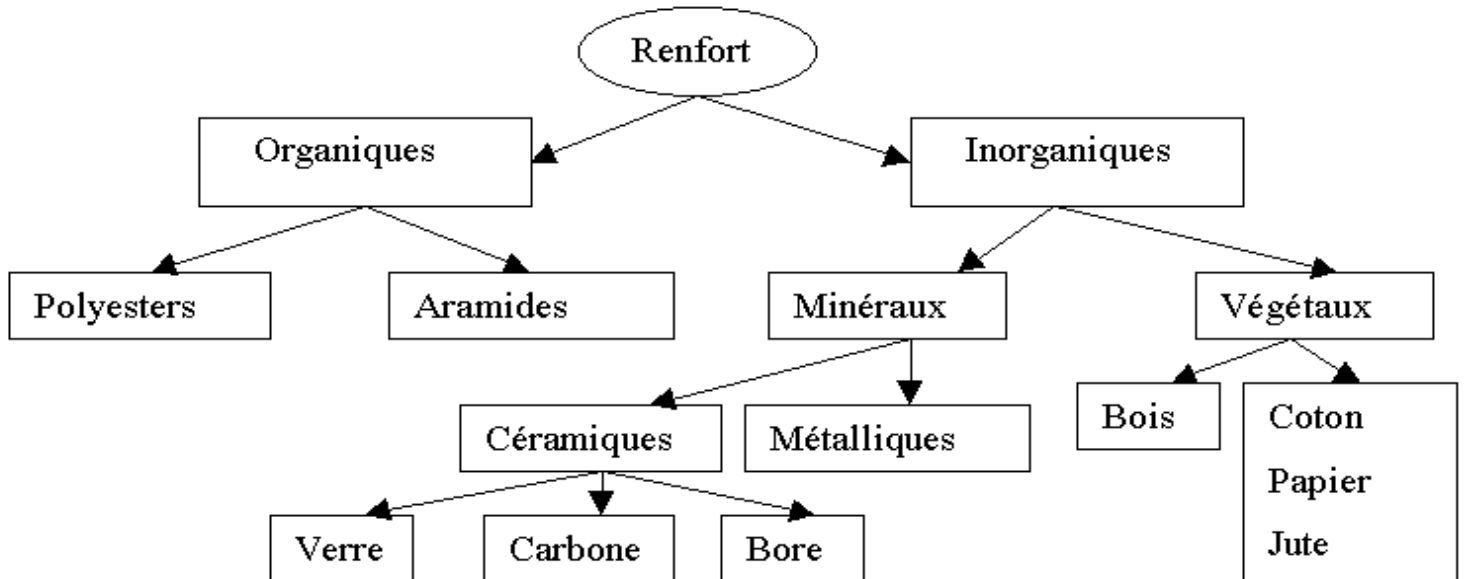


Figure II. 2:Organigramme des principaux matériaux de renforts

Les fibres de verre :

Les fibres de verre qui sont à faible coût de production, et qui constituent le renfort le plus utilisé actuellement (bâtiment, nautisme et autres applications non structurales aéronautiques). Leur fabrication se fait en général par étirage décrit par la figure 1.1. Les oxydes minéraux constituant la matière première (silice, alumine etc...) sont mélangés en proportion voulue suivant le type de fibre de verre désiré. Ce mélange est ensuite porté à très haute température (>1550°C) afin d'être liquéfié pour être étiré à travers une filière sous forme de filaments de diamètres calibrés. Ces filaments isotropes sont ensimés pour optimiser l'adhésion de la matrice, puis assemblés pour former les fils, eux mêmes stockés sous forme de bobine appelée gâteau. Le gâteau est alors étuvé, pour éliminer l'eau résiduelle et pour stabiliser l'ensimage. Les fibres de verre ainsi obtenues sont amorphes, ce qui leur confère des caractéristiques mécaniques parfaitement isotropes. Cependant, leur faible module d'élasticité, ainsi que leur densité supérieure aux fibres de carbone limitent leur utilisation pour la fabrication de pièces structurales. [10]

Tableau.II. 2:Organigramme des principaux matériaux de renforts

Fibre de	Module E (GPa)	Contrainte à rupture σ_u (MPa)	Masse vol ρ (Kg/m ³)	Module sp E/ρ (MN m/Kg)	Contrainte spé. σ_u/ρ (kN m/Kg)
Verre- E	72.4	3500	2540	28.5	1380
Verre- R	85.5	4600	2480	34.5	1850
Carbone					
-HM	390	2100	1900	205	1100
-HR	240	3500	1850	130	1890
Kevlar (aramide)	130	2800	1500	87	1870
Bore	385	2800	2630	146	1100

- Le verre E est utilisé pour les composites GD,
- les verres D pour les circuits imprimés (en raison de leur propriétés diélectrique).
- le verre R pour les composites HP (à cause de leurs haute résistance mécanique).

A.1. Les avantages de fibres de verre :

- Rapport performances mécaniques/prix
- Bonne résistance spécifique (pour verre R)
- Bonne adhérence avec toutes les résines (existence d'ensimage)
- Tenue à température élevée
- Dilatation et conductivité thermique faibles
- Bonne propriétés diélectriques

A.2. Les inconvénients de fibres de verre:

- Faible module (par rapport à la fibre de carbone ou d'aramide)
- Vieillissement au contact de l'eau

1.3. Intérêt des matériaux composites :

Le gain de poids réalisé a été une des principales raisons du développement de ce type de matériaux, citons par exemple :

le domaine de l'aviation commerciale : on peut placer en parallèle, d'une part les préoccupations majeures des constructeurs, de l'autre, les principales propriétés caractéristiques des pièces en matériaux composites :

- souci des avionneurs :
 - performance et économie.
- caractéristiques des pièces composites :
 - Gain de masse → économie de carburant, ou accroissement de charge utile, ou rayon d'action accru : ce sont de meilleures performances.

- un gain de 450 kg sur la structure de l'avion autorise 6 passagers supplémentaires ;
- 100 kg de gain sur la structure d'une fusée permet un allongement du parcours de 200 km.
 - Bonne tenue en fatigue → durée de vie augmentée ; il y a économie sur l'amortissement.
 - Absence de corrosion → allègement de l'inspection lors des visites : il y a économie sur le coût de maintenance.
 - Mise en forme de pièce complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structure métalliques).

Chapitre III: **composants**

Partie I : Mécanique

La figure suivante montre les composants essentiels d'un quad-copter :

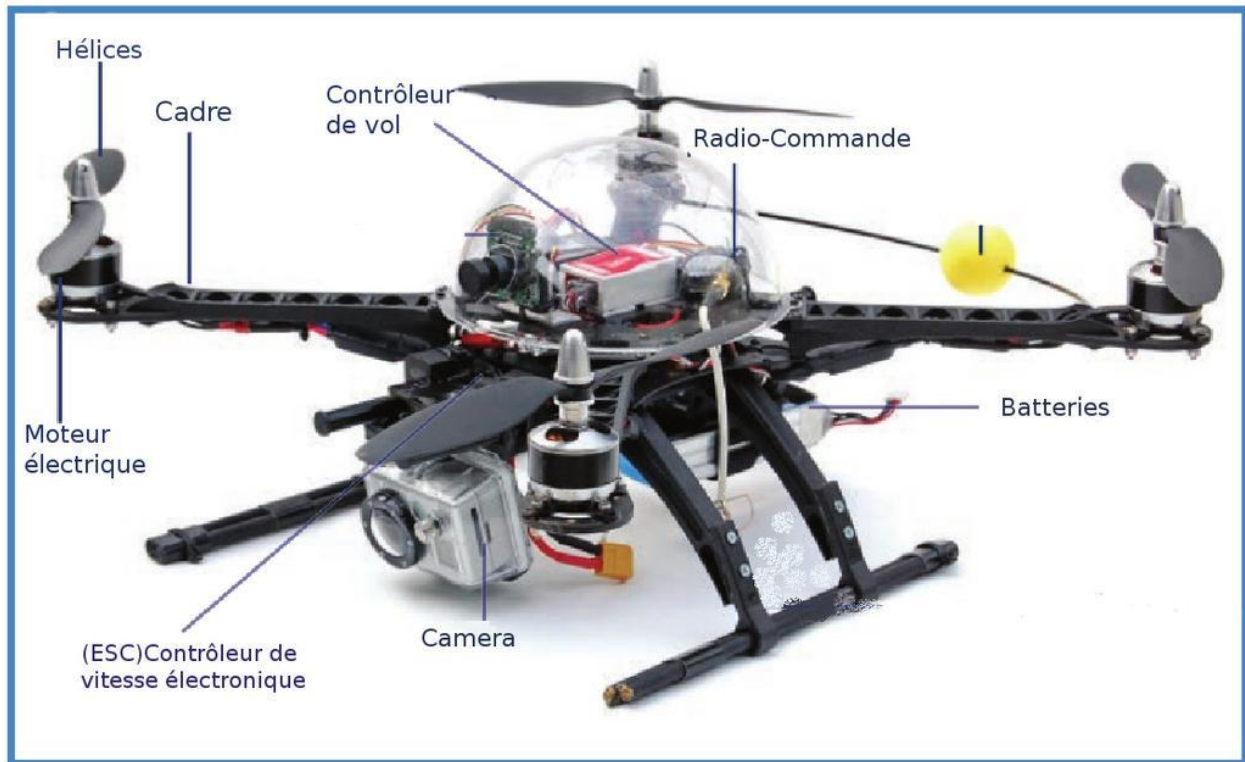


Figure III. 1: Les composants d'un quad-copter

1. Le Châssis (FRAME) :

Il existe bon nombre de type de drone allant du mono-copter jusqu'au Octocopter, et chaque type se distingue par sa morphologie. Le Quad-copter est doté de quatre bras, chacun d'eux connecté à un moteur. La face avant du drone est généralement placée entre deux bras (configuration en x), mais peut aussi se trouver le long d'un bras (configuration en +).

Le type de matériau de constructions d'une Frame est important, car le poids et la rigidité d'une frame est un facteur très important ainsi que la capacité de transmissions des vibrations des moteurs doit être aussi faible que possible, Pour ce faire le choix du matériau est crucial pour un bon comportement du drone. La prochaine étape est de choisir un matériel qui répond aux critères choisis. Il existe une grande quantité de matériaux aux différentes qualités et inconvénients différents :

- Le bois : peu couteux mais fragile.

- Le plastique : le matériau le plus utilisé pour sa polyvalence qui mêle légèreté solidité et faible coût.
- La fibre de carbone : sans aucun doute le matériau le plus adapté à ce genre de réalisation en raison de sa solidité et sa légèreté, mais c'est aussi le plus couteux.
- L'aluminium : un matériau léger, solide, facile a travailler et peu onéreux
- Il existe aussi différents alliages qu'il est possible d'utiliser. [13]



Figure III. 2:châssis

2. Les hélices :

La poussée produite par une hélice dépend de la densité de l'air, du régime de l'hélice, de son diamètre, de la forme et de la surface des pales, et de son pas.

Le choix des hélices est très important dans la mesure où il faut des hélices adaptées au type de vol que nous voulons réaliser (Vol nerveux, Vol Polyvalent, Vol stable), de grandes hélices (entre 9 et 11 pouces) assure un vol plus stable et pouvant soulever plus de poids et de petites hélices (entre 5 et 8 pouces) permettent d'avoir un vol « nerveux » plus rapide et nécessite un châssis plus léger [14].

Les matériaux utilisés pour construire des hélices sont nombreux :

- Le plastic : le plus répandu des matériaux de fabrication d'hélices qui permet d'avoir des hélices rigides solide et peu couteuse.
- Le bois : bien moins répandu les hélices en bois existent et ont des caractéristiques intéressantes en durabilité et en solidité, mais elles sont difficiles à trouver
- La fibre de carbone : le matériau le plus fiable mais aussi le plus couteux.



Figure III. 3: hélices de quadrirotor

3.Pales et Diamètre :

On trouve toute sortes d'hélices généralement a trois pales ou deux (pales configuration optimale), c'est-à-dire que le nombre de pales ne détermine pas forcément la puissance de la propulsion mais concrètement chaque pale d'hélices doit impérativement suivre le sillage des pales précédentes ainsi de manière à avoir une fréquence élevée de sillage, le nombre de pales augmente certes la fréquence de sillage mais augmente aussi le poids donc plus d'inertie toute

fois une hélices a deux pales avec un diamètre réduit aura une faible inertie donc répond rapidement au variations de vitesses ce qui permet un vol nerveux .

Nbr de pouces'	Type de vol
5''	Nerveux
8-10''	Polyvalent
10-13''	Stable

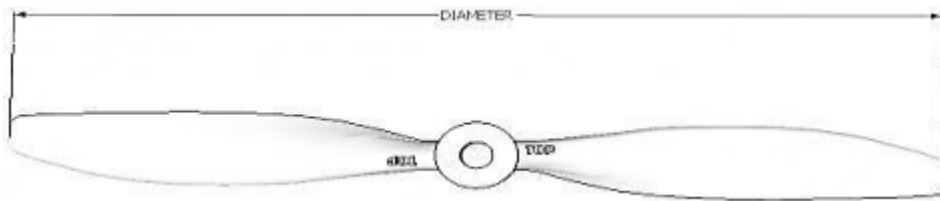


Figure III. 4:Diamètre Hélices:

4. Le Pas:

Poids	Diamètres hélices
Quadri-rotor 2kg	13''
Quadri-rotor 1kg	10''
Quadri-rotor 500g	5''

Le pas est le degré d'inclinaison figure 10 de l'hélice qui détermine un angle d'attaque qui se situe généralement entre 4'' et 6''. Ce qu'il faut savoir c'est que plus le pas est petit plus l'hélice offre de tractions à faible vitesse mais limite la vitesse de rotations par rapport à une hélice à grand pas.

Inclinaison en degrés	Type de vol
5''	Nerveux
4.5-5''	Polyvalent
4-5''	Stable

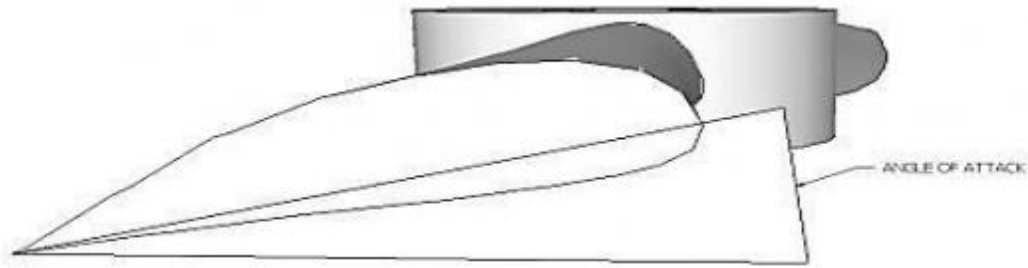


Figure III. 5:Degrés d'inclinaison des pales

5. La Rotation :

Les hélices sont conçues pour tourner dans le sens horaire (CW) ou antihoraire (CCW) (Figure 11). Il est important de savoir quelle partie de l'hélice est destinée à faire face au haut (la surface supérieure est incurvée vers l'extérieur). L'orientation des hélices, de sorte que la poussée soit toujours vers le bas. Le haut de l'hélice doit toujours faire face au ciel.

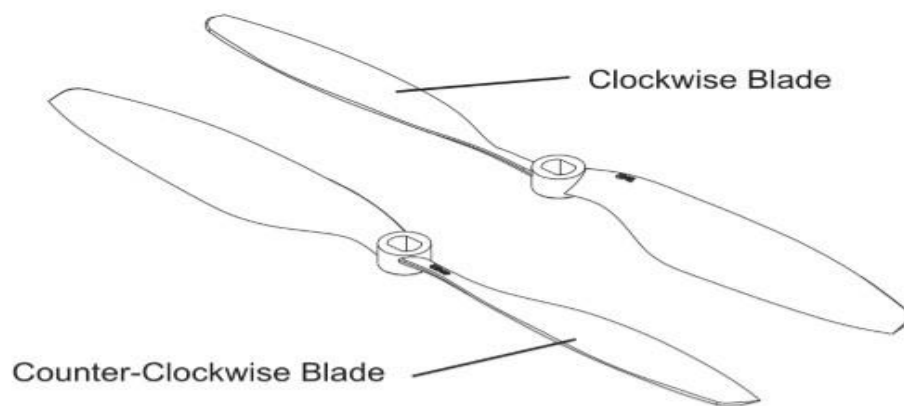


Figure III. 6: Hélice CW&CCW.

Partie 2 : Propulsion

1. Moteur Brushless :

Les moteurs Brushless sont des moteurs sans balais, un moteur à balais fait tourner la bobine à l'intérieur d'un boîtier doté d'aimants fixes montés sur le pourtour extérieur du boîtier. Les moteurs sans balais font l'inverse ; les bobines sont fixées soit à l'extérieure soit à l'intérieur du boîtier tandis que les aimants tournent.

Le choix du moteur se base donc sur un Coefficient de vélocité <Kv> et prend en considération le type de vol et la taille des hélices, pour un vol stable il faut de grandes hélices et des moteurs a fort couple et a petit ratio Kv, pour un vol « nerveux » ou rapide il faut de petites hélices et des moteurs a fort ratio Kv.

Chaque moteur a un Coefficient de vélocité « Kv » qui correspond au nombre de tour /min.

$$Kv=Rpm/U$$

Où Kv est le coefficient de vélocité ;

Rpm : nombre de tour/min ;

U : Tension

12000 tr/min	Vol nerveux
10000 tr/min	Vol Polyvalent
8000tr/min	Vol stable

Masse quad-copter	Coefficient de vélocité	Hélices diamètre
2kg	800kv	13''
1kg	980kv	10''
500kg	2300kv	5''

2. Les variateurs de vitesse électronique (ESC) :

Les variateurs de vitesse sont des petites cartes électroniques qui permettent de commander la vitesse des moteurs brushless.

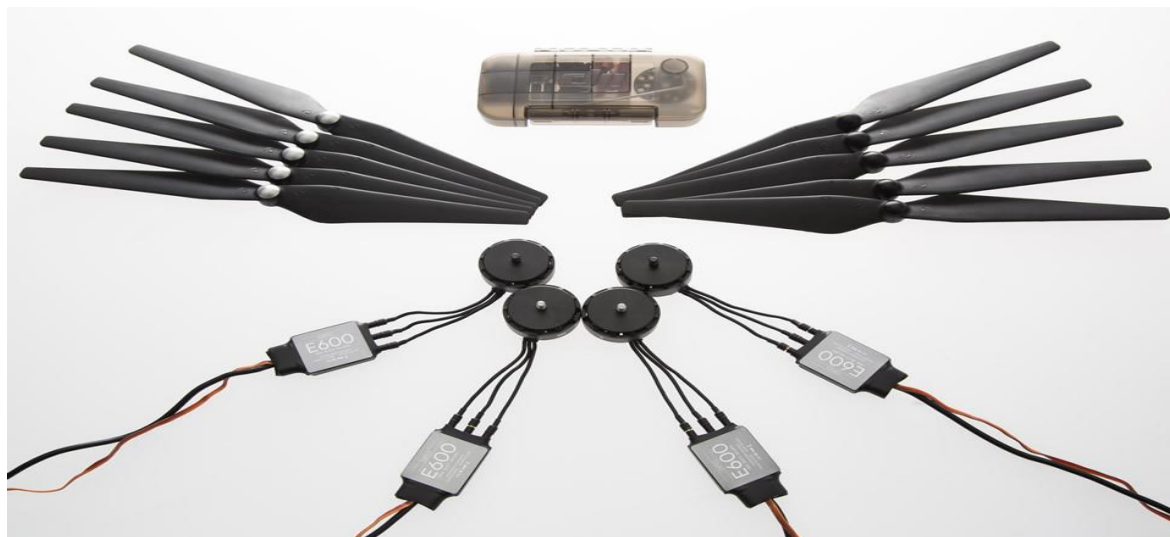


Figure III. 7:Moteur Brushless et Les variateurs de vitesse électronique (ESC)

3. Batterie LIPO (Lithium Polymère) :

La Batterie est l'élément le plus important dans un drone elle détermine la puissance et la durée de vol d'un drone, le choix d'une batterie pour un drone repose sur 4 caractéristiques de base

- ◆ La tension délivrée.
- ◆ Le taux de Charge
- ◆ La Capacité
- ◆ Le Poids.

4. Les capteurs :

Nous avons besoin de plusieurs capteurs pour récupérer les données nécessaires au bon fonctionnement de notre drone.

4.1. Capteur gyroskopique et accéléromètre :

Il représente le capteur le plus important, il permet de récupérer la valeur des angles de rotation autour des axes du quadricoptère à tout moment et ainsi de réaliser une boucle de régulation. Il est accompagné d'un accéléromètre qui permet de récupérer la valeur des accélérations sur les axes de translation.

4.2. La carte programmable :

Pour le choix de la carte de commande plusieurs possibilités s'offrent à nous :

- ◆ Cartes Raspberry.
- ◆ Cartes STM.
- ◆ Cartes Arduino.

Chapitère IV :

aérodynamique

Principe :

Un corps placé dans un écoulement d'air (ou d'eau) subit une force aérodynamique, il subit une force perpendiculaire au vent relatif : la portance, et une force parallèle au vent relatif : la traînée.

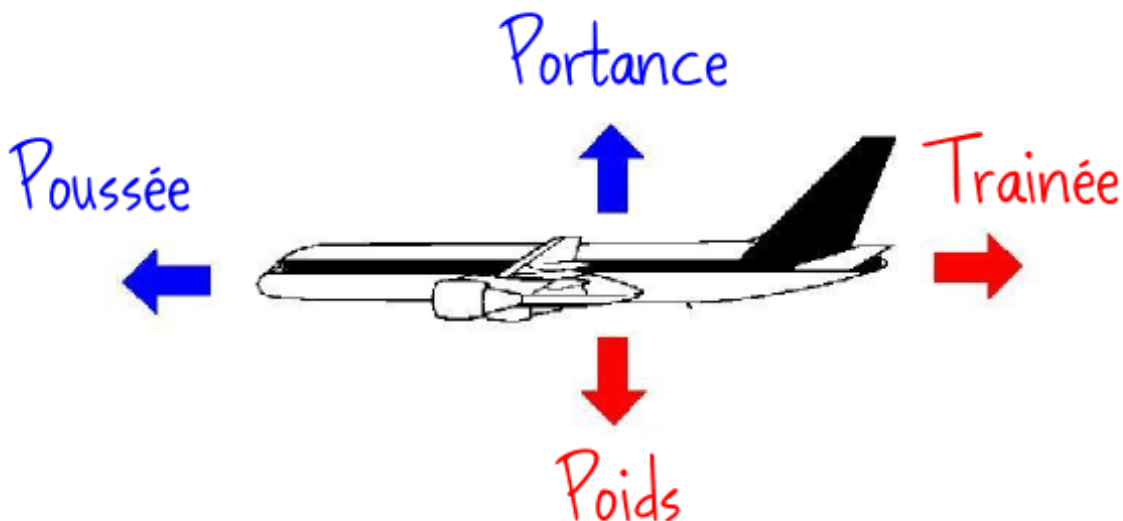


Figure.V. 1:les forces appliqué sur l'avion.

1) La Portance :

La portance est la force qui permet à un aéronef de s'élever et de se maintenir en altitude. la portance est dirigée de l'intrados (la face inférieure), vers l'extrados (la face supérieure).

- La portance s'applique au centre de gravité.
- Sa direction est perpendiculaire à la trajectoire.
- Son sens est toujours vers le haut.
- Son intensité varie selon les variables de la formule ci-après.

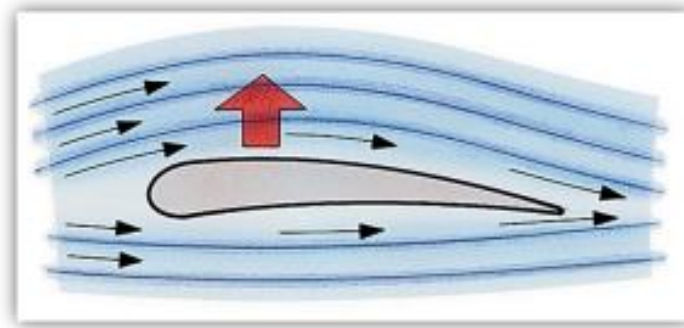


Figure.V. 2: portance sur l'aile

1.2.Ecoulement de l'air sur un profil d'aile :

-les filets d'air s'accélerent sur l'extrados

-il se forme donc une dépression sur l'extrados qui aspire l'aile vers haut.(75%de la portance)

-il se forme une surpression sur l'intrados qui pousse l'aile vers le haut (25 % de la portance)

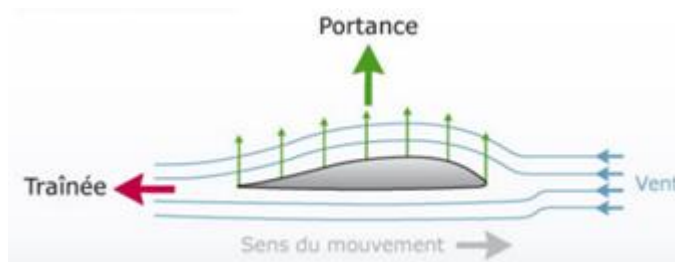


Figure.V. 3: portance sur l'aile

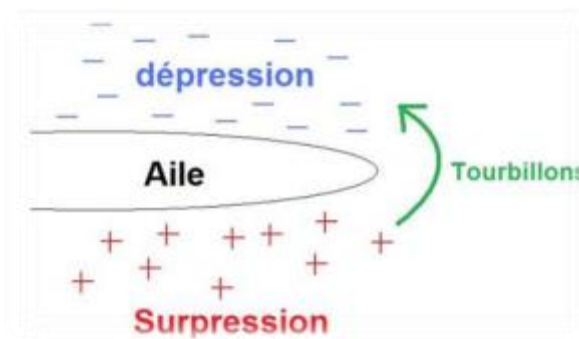


Figure.V. 4: portance sur l'aile

1.3.Expression de la portance :

La portance dépende de :

- ✓ ρ : Masse volumique du l'air(en kg/m³)
- ✓ V : la vitesse de l'écoulement d'air sur l'aile
- ✓ S : la surface alaire de l'aile en m²
- ✓ du Coefficient C_z (lie a la forme du profil de l'aile)

En vol rectiligne horizontal stabilité :

L'intensité de la portance est donnée par la formule :

$$R_z = 1/2 \rho S V^2 C_z$$

La portance s'oppose au poids(m.g)de l'avion.

1.4.Influence de l'angle d'incidence sur la portance :

- il fait d'augmenter l'incidence de l'aile va permettre d'augmenter la portance angle (18°)
- les filets d'air vont devenir turbulents ,la portance va chuter(et la trainée augmenter).
- on arrive au décrochage de l'aile ,la portance chute brutalement .
- le décrochage se produit toujours a la même incidence.

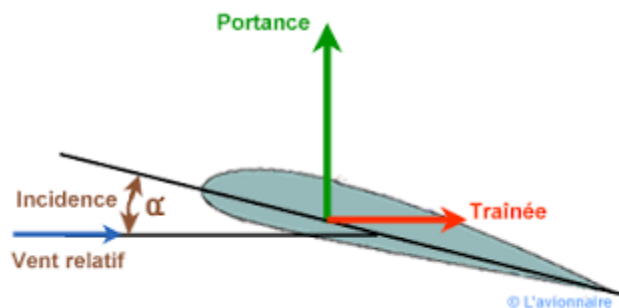


Figure.V. 5: l'angle d'incidence

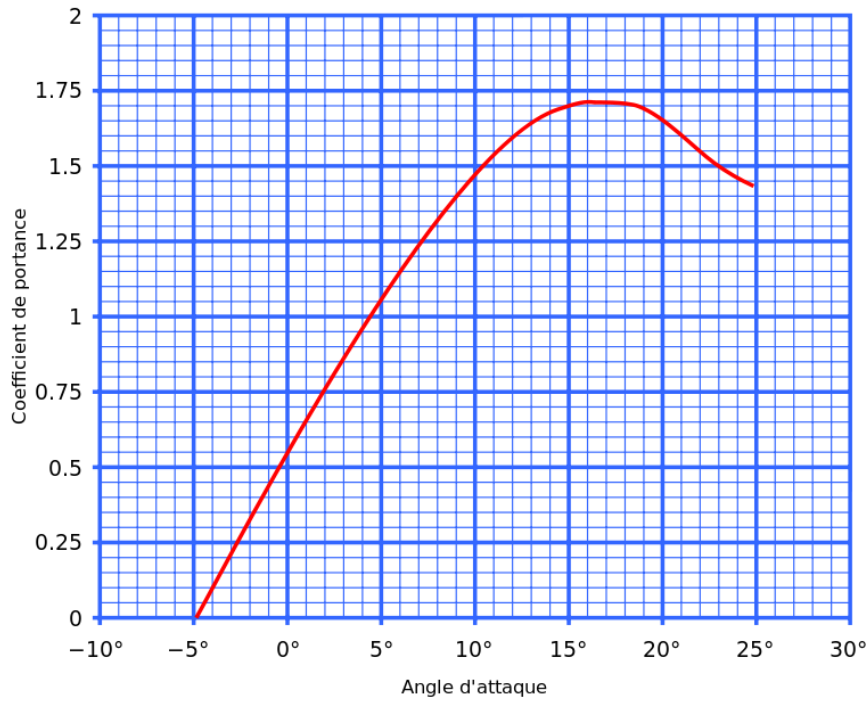


Figure.V. 6:la relation entre le coefficient de portance et angle d'attaque

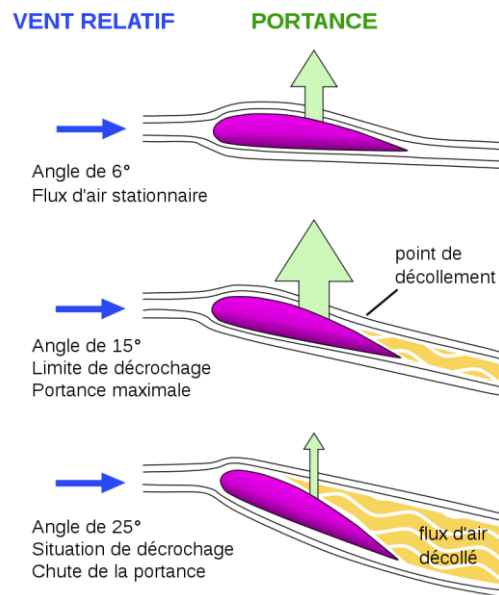


Figure.V. 7: l'angle d'incidence

1.5. Centre de poussée et foyer :

- la portance de crée partout ,sur l'aile .
- Pour simplifier sa représentation ,on la représente en un point d'application que l'on appelle centre de poussée .
- lors des différentes phases du vol,il se déplace sur l'aile en fonction de la vitesse et de l'incidence.
- plus ses déplacement sont importantes et plus l'avion sera délicate a piloter.
- les variations de la portance sont représentées par un autre point , fixe ,lui, que l'on appelle le Foyer. il se situe entre le quart (25%) et le tiers (33%)de la corde de profil, en partant du bord d'attaque.
- la foyer joue un role important dans le calcul du centrage de l'avion

2) La traînee:

En aérodynamique, c'est, avec la portance, l'une des deux grandeurs fondamentales. Le rapport entre portance et traînée s'appelle la finesse.

$$F_x = \frac{1}{2} \rho S C_x V^2$$

ρ : Masse volumique du fluide

V : Vitesse de l'écoulement d'air sur le solide

S : Maitre couple

C_x : Coefficient de traînée

maître couple : on appelle maître-couple la section transversale maximale d'un véhicule.

2.1. La traînée :

- elle résulte des forces de presffesion dans l'axe de l'avion.
- elle s'oppose a la traction (ou la poussée)
- on peut la décomposer en 3 traînées distinctes :
 - la traînée de forme, liée a la forme du profil.
 - la traînée de sillage liée au décollement des filets d'air a l'arrière du profil ;influencée par la vitesse et l'incidence de l'avion.
 - la tranée induite, due a la différence par de pression entre extradados et intrados (tourbillons marginaux).

2.2. Influences sur la traînée :

- influence de la forme du profil
- influence de la vitesse de l'avion (vitesse +, donc traînée +)
- influence de l'incidence (incidence +, donc traînée+)
- influence de l'allongement (envergure²/surface alaire)(allongement+=traînée-).

les winglets diminuent la traînée induite

- en vol rectiligne horizontale stabilisé : l'intensité de la traînée est donnée par la formule :

$$R_x = 1/2 \rho S V^2 C_x$$

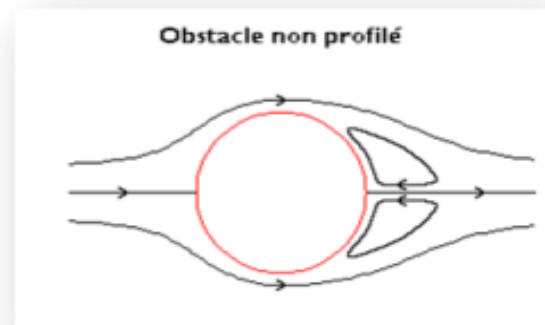
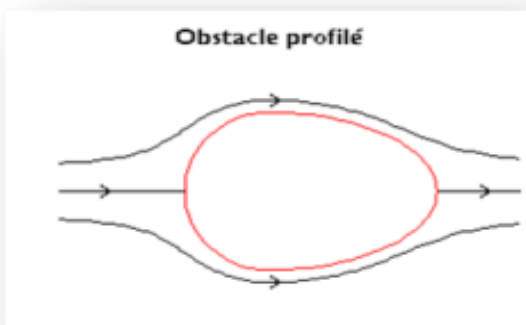


Figure.V. 8: Cas d'un corps profilé

Figure.V. 9: Cas d'un corps non-profilé

2.3. La résultante aérodynamique :

La résultante aérodynamique R_a est générée par l'ensemble des surpressions à l'intrados et dépressions à l'extrados.

Cette résultante aérodynamique R_a peut se décomposer en :

- une force perpendiculaire à la vitesse, appelée portance R_z
- une force parallèle à la vitesse appelée traînée R_x

le centre de poussée est le centre d'application de cette R_a , et se déplace sur l'extrados selon l'angle d'incidence par exemple.

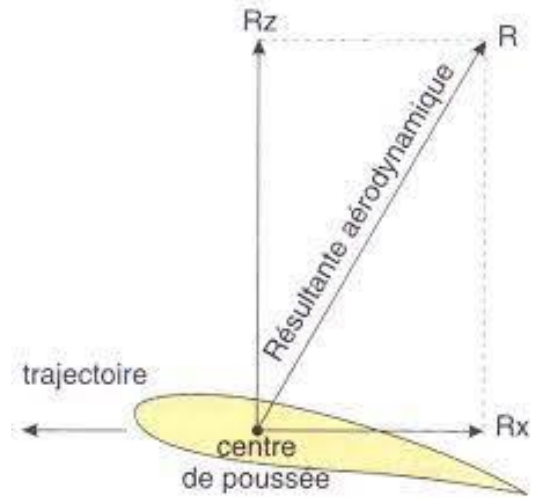


Figure.V. 10: résultante aérodynamique

Conclusion

Conclusion

Le but de cette étude est de se familiariser avec les matériaux composites et leur intégration dans la productique mécanique. Pour ce faire, nous avons opté pour une conception et réalisation d'un rotor de drone quadri-copter. Les modèles de drones professionnels capables de réaliser des vidéos stabilisées sont des drones professionnels légers, rapides, performants et simples à piloter.

Nous nous sommes intéressés au dimensionnement d'un rotor de drone quadri-copter de par son importance dans la machine. Ce composant dépend essentiellement de la charge utile (proportionnellement) et ses dimensions affectent directement son comportement et notamment la stabilité. Pour le reste des composants, ils sont disponibles sur le marché EBay.

Le rotor réalisé selon la technologie des composites et le dimensionnement (géométrie) selon les principes de l'aérodynamisme pour assurer la forme aérodynamique qui assure la portance suffisante pour faire décoller le drone (moment critique de fonctionnement). Le rotor est confectionné comme un sandwich autour d'une lame en aluminium léger accolée de pièces en polystyrène léger et le tout couvert de tissu de fibre de verre (serge) imbibé de résine époxyde.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Rodrigo Martinez-Val, Carlos Hernandez. "Preliminary design of a low speed, long endurance remote piloted vehicles (RPV) for civil applications". Aircraft Design 2 (1999) ,
- [2] F.MOHAMEDI et N.SACI. *Simulation d'un drone sous MATLAB*. En vue de l'obtention du diplôme master professionnel informatique. Université de Béjaia, faculté des Sciences Exactes, 2016.
- [3] 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
- [4] D. Oualid, « *Commande et navigation autonome d'un drone Quadrirotor* », MASTER EN AUTOMATIQUE, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF Faculté de Technologie, Mai 2015
- [5].Jones, R.M., Mechanics of composite materials. 1975: Mc Graw-Hill Company.
- [6].Drapier, S., Mécanique des Composites Hautes Performances. 2012, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.
- [7]. Gendre, L. Les grandes familles de matériaux composites, http://www.si.enscachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=166. consulté le 15/11/2014].
- [8] P. BARDONNET, "Résines époxydes (EP)," Techniques de l'Ingénieur, vol. A346
- [9]. Jean Marie. Berthelot, Matériaux composites « comportement mécanique et analyse des Structures », édition TEC et DOC, 1999.
- [10]. J.L. Billoët, 'Introduction aux matériaux composites à hautes performances', Edition Broché, 1993.
- [11] : DANIEL GAY « Matériaux composites » 4e édition revue et augmentée, Edition Hermes. 1997
- [12] : J.-M. BERTHELOT « Comportement mécanique et analyse des structures de matériaux composites » 3ième édition. Ed. TEC et DOC Paris.1999
- [13] Jean-Louis Naudin "Construire un Quadricoptère", Vers 1.2, 2011.
- [14] P. Pounds, R. Mahony, P. Hynes, J. Roberts "Design of a four rotor aerial robot", Australasian conference on robotics and automation, 2002